

Proyecto de Aprovechamiento y Manejo Ambiental del Lago Tláhuac-Xico

Informe Final

2022 Año de Ricardo Flores Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Proyecto de Aprovechamiento y Manejo Ambiental del Lago Tláhuac-Xico

Informe final

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Av. Ejército Nacional 223, Col. Anáhuac,
C.P. 11320, Ciudad de México.
Comisión Nacional del Agua
Subdirección General de Administración del Agua
Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, Ciudad de México.
Tel. (55) 5174-4000

AGRADECIMIENTO

Claudia Sheinbaum Pardo
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México
Germán Arturo Martínez Santoyo
Director General de CONAGUA
Jean Elaine Burns Stuck
Subdirectora General de Administración del Agua CONAGUA
Mtro. Victor Javier Bourguett Ortiz
Director General del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México OCAVM
Lic. Jorge Joaquín González Bezares
Vocal Ejecutivo de la Comisión del Agua del Estado de México CAEM
Dr. Felipe Zataráin Mendoza
Subdirector General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento CONAGUA
Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes
Coordinador General del Sistema de Aguas de la CDMX SACMEX
Dra. Marina Robles García
Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México
Ing. Columba Jazmín López Gutiérrez
Directora General de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural CORENA

COORDINACIÓN GENERAL

Lic. Jean Elaine Burns Stuck
Dr. Oscar Monroy Hermosillo
Dr. Leonardo Daniel Amores Rovelo
Dr. Jorge Adrián Flores Rangel
Lic. Leyda Jiménez Ramos

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Germán Arturo Martínez Santoyo
Director General

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN DEL AGUA

Jean Elaine Burns Stuck
Subdirectora General de Administración del Agua
Dr. Oscar Monroy Hermosillo
Mtro. Jose Alfredo Galindo Sosa
Gerente de Consejos de Cuenca
Ing. Isaac López Pozos
Subgerente de Fortalecimiento de Consejos de Cuenca
Lic. Salvador Contreras Esparza
Jefe de Departamento
Lic. Leyda Jiménez Ramos
Jefe de Departamento
Dr. Jorge Adrián Flores Rangel
Director de Área de información
Geog. Omar Aurelio Peña Ruiz
Jefe de Departamento
Geog. Brenda Alejandra Raya Isidro
Analista Geográfico
Ing. Juan Manuel García Reyes
Programador
Ing. Carlos Irving Romero Peña
Analista Estadístico
Mtro. Iván Alejandro Martínez Azueta
Consultor
Mtra. Erika Guadalupe León Soriano
Consultor
Mtro. Héctor Manuel López Hernández
Consultor
Lic. Irma Palma Arriaga
Consultor

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE AGUA POTABLE, DRENAJE Y SANEAMIENTO

Dr. Felipe Zataráin Mendoza
Subdirector General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento
Dr. Diego Pedrozo Acuña
Gerente de Estudios y Proyectos
Dr. Leonardo Daniel Amores Rovelo
Coordinador Técnico
Dra. María Lina Fuentes Galván
Jefa de Proyecto
Dr. Luis Fernando Orsini Zegada
Jefe de Proyecto
Ing. José Alfredo Hernández Salgado
Jefe de Proyecto
Ing. Serafín González Ramírez
Jefe de Proyecto
Arq. Luis Ramón Sánchez Peregrina
Jefe de Proyecto
Ing. José Manuel Mira Gutiérrez
Subgerente de Proyectos
Ing. Iván Zacarías Hernández
Jefe de Proyecto
Mtra. Sandra Vázquez Villanueva
Gerente de Potabilización y Tratamiento
Mtra. Sandra Vázquez Villanueva
Gerente de Potabilización y Tratamiento
Mtra. Irleth S. Segura Estrada
Subgerente de Potabilización
Ing. Beatriz Cabrera Gómez
Jefe de proyecto
Mtro. Saúl Lopez Saucedo
Jefe de departamento

OCAVAM

Mtro. Victor Javier Bourguett Ortiz
Director General del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México
Mtro. Juan César Luna Bahena
Director de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento
Mtra. Patricia Labrada Montalvo
Directora Técnica
Ing. Martín Raúl Colunga Chávez
Residente General de Operación Zona Sur

CAEM

Lic. Jorge Joaquín González Bezares
Vocal Ejecutivo
Lic. Raúl Chaparro Valdés
Director General del Programa Hidráulico
Ing. Jesús Barrera Maqueda
Director de Planeación y Programación
Ing. Rodrigo Rico Ramírez
Subdirector de Proyectos
Ing. Elvia Mateo Martínez
Subdirectora de Tratamiento de Aguas Residuales
Ing. Juan Carlos Espíritu Cortés
Subdirector de Planeación de la CAEM.
Ing. Carlos Olvera García
Jefe del Departamento de Saneamiento de la CAEM.

SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Dra. Marina Robles García
Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México

SACMEX

Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes
Coordinador General del Sistema de Aguas de la CDMX
René Calderón García
Director General de Agua Potable
Ernesto Armendáriz Ramírez
Gerente General de Coordinación Institucional de Operación y Servicios
Ing. Miguel Carmona Suárez
Director General de Drenaje
M. I. Mauricio Becerril Olivares
Director General de Planeación de los Servicios Hidráulicos
Lic. Gerardo Gutiérrez Gamiño
Director Ejecutivo de Asuntos Jurídicos
Lic. Juan Reyes Alvarado
Director de Proyectos de Drenaje, Tratamiento y Reúso
Ing. Herminio Simeón Quechol Hernández
Dirección de Drenaje, Tratamiento y Reúso
Mtro. Luis Arturo Correa Camacho
Subdirector para el Análisis y Gestión de la Calidad del Agua
Ing. Rubén Pineda Migueles
Subdirector de Planeación y Programación de Obras Hidráulicas
Ing. José Galván Gómez
Subdirector de Tratamiento y Reúso
Biol. Samantha Olimpia Peralta Crespo, Jefa de la Unidad Departamental de Gestión de Calidad

CORENA DR

Ing. Columba Jazmín López Gutiérrez
Directora General de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural
M. en B. Esther Sandoval Palacios
Directora Ejecutiva de la Zona Patrimonio Mundial Natural y Cultural en Xochimilco Tláhuac y Milpa Alta
Ing. Héctor Antonio Aguilar Velazco
Director de Capacitación para la Producción Sustentable
Ing. Juan Abel Vera Martínez
Coordinador del Centro de Innovación e Integración Comunitaria 4
Lic. Víctor Manuel Vanegas Tapia
Coordinador del Centro de Innovación e Integración Comunitaria 1
Biól. Silvia Iliana Philippe Cárdenas
Coordinador del Centro de Innovación e Integración Comunitaria 3
Dr. César Antonio Abarca García
Subdirector de Capacitación para la Sustentabilidad
Geo. Sammary Terán Moreno
Jefa de la Unidad Departamental de Reservas y Áreas de Conservación Comunitaria
Lic. Felipe de Jesús López Domínguez
Técnico Operativo Supervisor
Ing. Alondra Guerra Nava

Técnico Operativo Enlace
Lic. Viridiana Muñiz Araujo
Técnico Operativo Enlace
Biól. Vanessa Herrera Pérez
Técnico Operativo
Ing. Juan Manuel Sánchez Velázquez
Técnico Operativo
Téc. Rodrigo Solares Martínez
Técnico Operativo
Ing. Ricardo Torres López
Técnico Operativo
Ing. Edith Palafox Rangel
Técnico Operativo
Dr. Gabriel Gutiérrez Granados
Académico de la UNAM
M. en C. Sergio Aburto Castañeda
Académico de la UNAM
Dr. Arturo Sánchez González
Académico de la UNAM
Dra. Eloísa Domínguez Mariani
Académica de la UAM

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

Mtra. Norma Ramírez Salinas. Coordinadora de Calidad del Agua.
Dra. Jennifer Bañuelos Díaz. Subcoordinadora de Potabilización.
Mtro. César Guillermo Calderón Mólgora. Subcoordinador de Tratamiento de Aguas Residuales.

EXTERNOS

Dr. Alejandro Alva Martínez
Lic. Joaquín Solorio Urrutia
Mtro. Antelmo García Hernández
Lic. Alejandra García Hernández
Mtro. Moisés Gerardo Hernández Cruz
Mtra. Estefanía Lezama Barquet
Dr. Mitl Maqueda Silva
Mtra. Itzel Quetzalli López Ramírez
Mtro. Armando Caballero Guerras
Lic. Julio César Cervantes Ortega
Lic. Mario Reyes Cantú
Dr. Dario Espinoza Figueroa
Dr. Jonathan Gilberto Bolaños Castillo
Ing. José Miguel Segundo Vázquez
Ing. Leopoldo Isaac Alaniz Ceja
Lic. Joel Carbajal Barrera
Julio Cesar Ramírez Alvarado
Ing. Alejandro Navarro Guerrero
Ing. Antonio Morales Mireles
Ing. León Jiménez Tapia



Formación del grupo multidisciplinario 10 de junio de 2021

Resumen

El propósito de este informe es presentar los resultados derivados de la recopilación y análisis de información existente, así como de la generada a través de la realización de estudios y trabajos de campo en la zona del Lago Tláhuac-Xico. Para identificar las mejores alternativas a nivel conceptual respecto al incremento en el volumen de almacenamiento del Lago, y a las fuentes de las cuales podría suministrarse agua y las vías para esto.

Así mismo, se analiza desde el aspecto normativo y técnico, las alternativas para obtener 750 L/s de agua potable, utilizando como fuente de abastecimiento el Lago de Tláhuac-Xico (LTX).

Por otra parte, se presentan los resultados de la caracterización de la degradación del suelo y la contaminación debido a la presencia de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, la calidad del agua, y la distribución de la biodiversidad. De la integración de los resultados obtenidos de la caracterización, se propone una estrategia de restauración hidroecológica regional.

En el ámbito social, se presentan los resultados obtenidos del proceso participativo inter-ejidal e interinstitucional del proyecto integral del Lago Tláhuac-Xico, así como, del proceso de extensión de los resultados técnicos obtenidos en los estudios realizados. De esta forma, se recopilaron y plasmaron experiencias, percepciones y perspectivas de las comunidades. En el ámbito jurídico, se describe la información relacionada de los ejidos que conforman la zona de interés.

Se implementó un geovisualizador para integrar la información geográfica y para explorar los datos geoespaciales generados a partir de los estudios realizados. El cual está compuesto por bases de datos a nivel de Región Hidrológica Administrativa. La herramienta muestra información del proyecto conceptual y la propiedad social, así como la descripción de la zona e información técnica generada por el proyecto, cartografía participativa, entre otros.

Contenido

Acrónimos, Siglas y Unidades *28*

Glosario *31*

Antecedentes *39*

1.1 Ubicación geográfica **39**

1.2 Fisiografía **41**

1.3 Geomorfología **42**

2.1.1 Características Morfológicas de la cuenca 42

Colectores/Fuentes y Profundización *48*

2.1 Sistema Hidrogeológico Tláhuac-Xico **48**

2.2 Cuenca Hidrográfica **48**

2.3 Zona Hidrogeológica **50**

2.4 Infraestructura hidráulica **51**

2.5 Balance Hídrico **54**

2.5.1 Esquema Hidrológico 54

2.5.2 Balance en el Lago 64

2.6 Fuentes de agua **66**

2.6.1 Contexto Hídrico 66

2.7 Características del Lago **73**

2.7.1 Introducción 73

2.7.2 Levantamiento Topográfico y Fotogramétrico del Lago Tláhuac-Xico 73

2.7.3 Ejecución de los vuelos fotogramétricos y levantamiento de los puntos de control y verificación terrestre 78

2.7.4 Levantamiento de puntos de compatibilidad batimétrica 82

2.7.5 Aforo de caudales 86

2.7.6 Elevaciones de la superficie libre del agua 89

2.7.7 Evaluación Geológico y Geofísica 91

2.7.8 Estudio geofísico 91

2.7.9 Geología Regional 94

2.7.10 Geología Histórica 94

2.7.11 Estratigrafía Valle de México 96

2.7.12 Exploración Geofísica 105

2.7.13 Exploración geotécnica 115

2.7.14 Geohidrología 122

2.7.15 Conclusiones 128

2.8 Profundización del Lago **130**

2.8.1 Introducción 130

2.8.2 Alternativas para aumentar la capacidad del Lago 131

2.8.3 Procedimiento para aumentar la capacidad del Lago mediante la sobre-elevación de bordos 133

2.8.4 Modelo Geotécnico Preliminar 133
2.8.5 Estabilidad de taludes 135
2.8.6 Procedimiento para aumentar la capacidad del Lago mediante Dragado 139
2.8.7 Dragado marino 141
2.8.8 Dragado mixto: arrastre y marino 142
2.8.9 Procedimiento combinado para aumentar la capacidad de almacenamiento del Lago Tláhuac-Xico: Elevación de bordo perimetral y dragado marino 143
2.8.10 Análisis multicriterio para selección de alternativa para incrementar capacidad del Lago 144

2.10 Colectores/Fuentes 147
2.10.1 Introducción 147
2.10.2 Descripción de alternativas conceptuales 148
2.10.3 Aprovechamiento de agua residual de la Planta de Bombeo La Caldera 149
2.10.4 Aprovechamiento de aguas residuales de Valle de Chalco y Tláhuac, canal Liconsa y Canal General 151
2.10.5 Selección de alternativa viable 153

Normatividad 157

3.1 Marco normativo internacional para el reúso potable 157
3.1.1 Reúso potable directo 158
3.1.2 Reúso potable indirecto 167

3.2 Marco normativo nacional 184
3.2.1 NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación. 186
3.2.2 NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. 188
3.2.3 NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. 189
3.2.4 NOM-179-SSA1-2020 sobre agua para uso y consumo humano 191
3.2.5 NOM-014-CONAGUA-2003, que establece los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada 192

3.3 Propuesta sobre lineamientos para reúso indirecto de agua residual en México 193

3.4 Casos de estudio en el mundo para reúso potable indirecto 198
3.4.1 Gwinnett County, Georgia E.U. 199
3.4.2 The Western Corridor Recycled Water Project, Australia 202
3.4.3 NEWater, Singapur 203
3.4.4 Clayton County, E.U. 205

3.5 Situación nacional en cuanto a reúso potable de agua 213

Calidad de agua en el Lago Xico 214

3.6 Medición de la calidad en los cuerpos de agua 214
3.6.1 Medición de la calidad del agua en México 219

Tratamiento de agua residual 246

3.7 Introducción 246
3.7.1 Descargas existentes al Lago Tláhuac-Xico 246
3.7.2 Características del agua residual esperada. 246
3.7.3 Tipo de reúso potable 247

3.7.4 Consideraciones técnicas en el Proyecto Integral Tláhuac-Xico 247
3.7.5 Tecnologías recomendadas 249
3.7.6 Adaptación de experiencias internacionales a México, Caso Lago Tláhuac-Xico 252
3.7.7 Riesgos del proyecto 254

3.8 Datos básicos de diseño de las PTAR en el PITLX 255
3.8.1 Caudal 255
3.8.2 Fuentes de agua residual 256
3.8.3 Temperatura del sitio y del agua residual 256
3.8.4 Calidad del Agua Influente 258
3.8.5 Calidad del Agua Efluente 260
3.8.6 Modulación del sistema 261
3.8.7 Pre-Selección del Proceso 264
3.8.8 Trenes de Proceso Propuesto 269

3.9 Análisis de las opciones 281
3.9.1 Resultados 286
3.9.2 Opción Seleccionada escenario A 287

3.10 Ingeniería Conceptual de la Opción Seleccionada 288
3.10.1 Diagrama general de bloques 289
3.10.2 Diagrama de Flujo de Proceso DFP 290
3.10.3 Bases de diseño 293
3.10.4 Unidades de Proceso 294
3.10.5 Diagrama de Flujo de Proceso 304
3.10.6 Layout en Fase Conceptual 305
3.10.7 Estimación de costos 309
3.10.8 Estimación del Personal Operativo Necesario 314
3.10.9 Cronograma general del proyecto 315

3.11 Comentarios finales 316

Tratamiento de agua para consumo humano 317

3.12 Introducción 317

3.13 Procesos de tratamiento para las características específicas de calidad del agua del influente 318

3.14 Costos de inversión, operación y mantenimiento 320
3.14.1 Inversión de la planta 320
3.14.2 Costos de operación y mantenimiento 320
3.14.3 Ingeniería conceptual de la alternativa seleccionada 323
3.14.4 Comentarios finales 333

3.15 Cierre 333

Restauración ecológica y Red Hidroagrícola 335

4.1 Introducción 335

4.2 Antecedentes 337
4.2.1 Caracterización Ambiental 337

4.3 Estudios de biodiversidad, calidad del agua y del suelo 350
4.3.1 Zona de estudio 350

4.3.2 Distribución y diversidad de especies 350
4.3.3 Calidad del agua 356

4.4 Zonificación del ecosistema 367
4.4.1 Zonificación del ecosistema de acuerdo con la distribución y diversidad de especies 367
4.4.2 Zonificación del cuerpo de agua de acuerdo con su calidad 368
4.4.3 Zonificación de la calidad del suelo 370
4.4.4 Zonificación integral 373

4.5 Estrategias de restauración socioambiental 375
4.5.1 Aumento de la cobertura vegetal hidrófila y terrestre 375

4.6 Mejoramiento de suelos 378
4.6.1 Rehabilitación de suelos salinos con drenaje subterráneo 378
4.6.2 Mejoramiento de suelos para reforestación 378
4.6.3 Reforestación de bordes 378
4.6.4 Mejoramiento del suelo para agricultura 379

4.7 Humedal de Fitoremediación en la Zona II 380
4.7.1 Componente vegetal 381
4.7.2 Beneficios esperados 382
4.7.3 Guía de bioindicadores para monitoreo de la calidad del ecosistema 384
4.7.4 Características de los bioindicadores de agua 388
4.7.5 Proyecciones 391
4.7.6 Corredores hidro-culturales 391
4.7.7 Reconocimientos, decretos, nombramientos y declaratorias 392
4.7.8 Centro Ecoturístico Humedales de Tláhuac 393

4.8 Sistema Hidroagrícola 396
4.8.1 Centro Ecoturístico Humedales de Tláhuac 396
4.8.2 Problemática 397
4.8.3 Zona de riego actual, superficie y volumen requerido 400
4.8.4 Operación actual con el caudal disponible 409
4.8.5 Estrategias del Sistema Hidroagrícola 412

4.9 Uso de nuevas tecnologías LiDAR, batimetría y drones 417
4.9.1 Antecedentes 417
4.9.2 Tecnología Lidar 417
4.9.3 Tecnología batimétrica 418
4.9.4 Drones 420

..... 422

Social Jurídico 424

5.1 Introducción 424
5.1.1 Objetivo general 430
5.1.2 Antecedentes históricos agrarios del Lago Tláhuac-Xico 431

5.2 Planteamientos colaborativos en la región 442
5.2.1 Ejido de San Pedro Tláhuac 442
5.2.2 Ejido de San Antonio Tecómitl 442
5.2.3 Ejido de San Nicolás Tetelco 445
5.2.4 ODAPAS Valle de Chalco Solidaridad 446

5.3 Perspectiva colaborativa de ejidos y comunidad de la región 448
5.3.1 Ejido de San Pedro Tláhuac 448
5.3.2 Ejido de San Juan Ixtayopan 453
5.3.3 Ejido de San Antonio Tecomitl 458
5.3.4 Ejido de San Nicolas Tetelco 461
5.3.5 Integración de problemáticas Interejidales y beneficios del proyecto en la región 461
5.3.6 Perspectivas interejidales y de la comunidad 466
5.3.7 Evidencias ideológicas relacionadas con el PHLTX 467

5.4 Coordinación interinstitucional colaborativa 470
5.4.1 Reunión de Estrategias Integrales frente a necesidades de Ejidos Ixtayopan, Tetelco, Tecómitl y Tláhuac 471
5.4.2 Construcciones dentro de la zona del Santuario del Agua 473
5.4.3 Programación de acciones inmediatas 478

5.5 Plan de Mejora Integral de la Región 480
5.5.1 Solicitudes técnicas 480
5.5.2 Peticiones jurídicas 482

5.6 Concepción de proyectos ecoturísticos regionales 483
5.6.1 Recomendación jurídica 483
5.6.2 Visión de proyectos productivos y ecoturísticos ejidales 485
5.6.3 Antecedentes 489
5.6.4 II. Marco jurídico de la contraloría 489
5.6.5 Integración de la contraloría ciudadana autónoma del agua, Lago Tláhuac Xico 491
5.6.6 Pasos a seguir 493
5.7.1 Actividades de difusión del proyecto 494
5.7.2 Voces por el lago 494
5.7.3 Redes sociales 495
5.7.4 Presentaciones públicas del proyecto HLTX 496

5.8 Conclusiones y recomendaciones 497
5.8.1 Conclusiones 497
5.8.2 Recomendaciones 498
5.8.3 Recomendaciones interejidales 499

Geovisualizador 503

6.1 Introducción 503
6.1.1 Talleres de diagnóstico (28 de diciembre de 2021 y 12 de enero de 2022) 504
6.1.2 Taller de cartografía participativa (29 de enero de 2022) 504
6.1.3 Taller “Presente con mi espacio”, dirigido a ejidatarios de San Pedro Tláhuac (22 y 26 de febrero de 2022) 505
6.1.4 Taller San Juan Ixtayopan (16 de marzo de 2022) 506
6.1.5 Talleres San Pedro Tláhuac (31 de marzo y 5 de abril de 2022) 506
6.1.6 Conclusiones 508
6.1.7 Recomendaciones 509

Conclusiones y pasos a seguir 510

Referencias 511

Anexos 523

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación y zonas del Lago Tláhuac–Xico y Zonas 40
Figura 2. Delimitación morfológica de la subcuenca Chalco. Fuente: Elaboración propia con información de INEGI, 2013 41
Las características morfológicas de la subcuenca, a través del modelo digital de elevación (..... 42
Figura 3. Características morfológicas de la zona, elaboración propia con base en MDE, INEGI (2013) 43
Figura 4. Topografía de la zona de estudio 44
Figura 5. Clasificación de climas de la zona de estudio e isoyetas 44
Figura 6. Edafología de la zona de estudio 45
Figura 7. Cobertura vegetal en la zona de estudio 46
Figura 8. Hidrografía de la zona de estudio 49
Figura 9. Cuencas hidrográficas del sistema Tláhuac-Xico 50
Figura 10. Zona hidrogeológica del sistema Tláhuac–Xico. 51
Figura 11. Esquema Infraestructura hidráulica alrededor del Lago Tláhuac-Xico 52
Figura 12. Esquema hidrológico del sistema Tláhuac Xico. 55
Figura 13. Esquema hidrológico del sistema Tláhuac Xico. 56
Figura 13. Esquema de proyectos en la alcaldía Tláhuac. 57
Figura 14. Volúmenes de almacenamiento del Lago Tláhuac–Xico según zona. 63
Figura 15. Balance de volúmenes en el lago Tláhuac–Xico 65
Figura 16. Balance general diario en el lago Tláhuac–Xico 66
Figura 17. Variación del uso del suelo alrededor del Lago Tláhuac-Xico. 67
Figura 18. Potencial de agua pluvial en la zona de estudio 69
Figura 19. Potencial de agua residual en la zona de estudio 69
Figura 20. Potencial de agua tratada en la zona de estudio 70
Figura 21. Potencial de agua superficial en la zona de estudio 71
Figura 22. Potencial de agua superficial en estiaje y época de lluvias en la zona de estudio. 72
Figura 23. Referencia topográfica a través de placa metálica C(S14E11)01 del SACMEX 75
Figura 24. Ubicación de referencias topográficas evitando interferir con la dinámica social del sitio de los trabajos 76
Figura 25. Ubicación de las referencias topográficas utilizadas para el levantamiento del Lago Tláhuac-Xico. 77
Figura 26. Líneas base formadas para la liga del BN Pozo 12 a la RGNA de INEGI. 77
Figura 27. Cobertura de cada vuelo efectuado para el levantamiento fotogramétrico del Lago Tláhuac-Xico. 78
Figura 28. Ubicación de los 29 puntos de control del levantamiento fotogramétrico. 79
Figura 29. Levantamiento de puntos de control en la cobertura del vuelo 2. 81
Figura 30. Puntos de verificación de los vuelos fotogramétricos. 81
Figura 31. Gráfica de distribución de frecuencias de los errores obtenidos en vuelo fotogramétrico y comparados con la medición directa de la superficie del terreno mediante equipos GNSS en modo RTK. 82
Figura 32. Puntos de medición de profundidades. 83

Figura 33. Comparación de las elevaciones del fondo de la laguna según el levantamiento efectuado como parte de los alcances de este diseño conceptual y la información proporcionada por el SACMEX del año 2019. 85
Figura 35. Sección de aforo en el Canal General. 87
Figura 36. Sección de aforo canal de entrada a la Zona 2 del Lago 87
Figura 37. Ubicación de sitios de medición de las elevaciones de la superficie libre del agua 89
Figura 38. Elevaciones de la superficie libre del agua en el Lago Tláhuac-Xico. 90
Figura 39. Localización de cuerpos volcánicos en las inmediaciones del Lago Tláhuac-Xico. 95
Figura 40. Localización de perforaciones realizadas en la zona del Lago Tláhuac-Xico en Lozano-García et al., 2017 97
Figura 41. Facies identificadas en los núcleos de Chalco. Tomado de Herrera-Hernández, 2011. 98
Figura 42. Sección geológica de la batería de pozos Santa Catarina-Mixquic tomado de Vergara Huerta F. (2015) 100
Figura 43. Interpretación litológica de la zona del Lago Tláhuac-Xico, Vergara-Huerta (2015). 101
Figura 44. Delimitación del Lago Tláhuac-Xico, por zona, Elaboración propia, con base en Google Earth, (2020). 102
Figura 46. Secuencia lacustre superficial 103
Figura 47. Trazo de fallas reportadas en estudios realizados previamente en la zona 104
Figura 48. Líneas de corriente (en línea llena) y potencial (líneas a trazos) generadas en el SEV. 108
Figura 49. Configuración seudosección 108
Figura 50. Localización Líneas de Calicateo Geoeléctrico (LCG) y SEV. Elaboración propia, base Google Earth 109
Figura 51. Perfil Electro-Estratigráfico 1, SEV- 4, 1 y 2. 112
Figura 52. Perfil Electro-Estratigráfico 2, SEV-3 y 2. 112
Figura 53. Perfil Electro-Estratigráfico 2, SEV-3 y 2. 113
Figura 54. Zonificación geotécnica Ciudad de México y ubicación de zona de interés. 117
Figura 55. Localización de sondeos exploratorios. 118
Figura 56. Modelo Geotécnico obtenido de la campaña de exploración 121
Figura 57. Delimitación de acuíferos y ubicación de zona de estudio. Elaboración propia, con base en Google Earth y CONAGUA 122
Figura 58. Localización de aprovechamientos existentes en un diámetro de 3 km 124
Figura 59. Profundidad de Pozos de la Batería Mixquic y Santa Catarina 124
Figura 60. Valores de elevación del nivel estático 126
Figura 61. Planta general del Lago de Tláhuac Xico y alternativas para incrementar volumen 131
Figura 62. Alternativas para incrementar volumen del Lago de Tláhuac Xico 132
Figura 63. Sección propuesta para la conformación del bordo perimetral 133
Figura 64. Malla de modelo numérico-elaborada en software de elementos finitos 134
Figura 65. Dragado de arrastre 140
Figura 66. Propuesta de circuitos, peines y caminos de acceso y salidas 140
Figura 67. Zonas de Dragado Marino. 142
Figura 68. Dragado de arrastre y marino 142
Figura 69. Planteamiento de alternativa de dragado mixto 143

Figura 70. Procedimiento combinado: elevación de bordos y dragado marino 144

Figura 71. Esquema conceptual correspondiente a la alternativa 1 148

Figura 72. Potencial de agua residual en la zona de estudio 150

Figura 73. Esquema conceptual correspondiente a la alternativa 2 150

Figura 74. Esquema conceptual correspondiente a la alternativa 3 152

Figura 75. Representación esquemática del sistema de tratamiento de la planta de Goreangab en Windhoek, Namibia. Modificado de (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013). 158

Figura 76. Representación esquemática del sistema de tratamiento de la planta de Big Spring en Texas, E.U. Modificado de (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013) 160

Figura 77. Créditos asignados a cada proceso de tratamiento que conforma el esquema de RPD de Big Spring en Texas, E.U. Modificado de (World Health Organization, 2017). 161

Figura 84. Representación esquemática del sistema de tratamiento de Gwinnett County, Georgia E.U. (Meeker, Funk, Bell, & Hopper, 2018). 201

Figura 86. Representación esquemática del sistema de tratamiento NEWater, Singapur. Modificado de (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013) y (University of New South Wales, 2014). 204

Figura 87. Ubicación del sistema LAS Huie (posteriormente se convirtió en humedales) y los embalses Shoal Creek y Blalock que reciben el agua tratada por los humedales. Modificado de (Thomas, 2002). 208

Figura 88. Esquema de humedales E.L. Huie. Fuente: (American Academy of Environmental Engineers&Scientists, 2011) 209

Figura 91. Ubicación de los sitios de muestreo de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA) en el Lago de Chapala. 222

Figura 92. Calidad del agua: DBO5 (mg/L), agosto-septiembre 2019. 226

Figura 93.. Calidad del agua: DBO5 (mg/L), agosto-septiembre 2019, promedio. 226

Figura 94. Calidad del agua: DQO (mg/L), agosto-septiembre 2019. 226

Figura 95. Calidad del agua: DQO (mg/L), agosto-septiembre 2019, promedio 226

Figura 96. Calidad del agua: SST (mg/L), agosto-septiembre 2019. 227

Figura 97. Calidad del agua: SST (mg/L), agosto-septiembre 2019, promedio. 227

Figura 98. Calidad del agua: CF (UFC/100 ml), agosto-septiembre 2019. 227

Figura 99. Calidad del agua: CF (UFC/100 ml), agosto-septiembre 2019, promedio. 227

Figura 100. Calidad del agua: OD (%), agosto-septiembre 2019. 228

Figura 101. Calidad del agua: OD (%), agosto-septiembre 2019, promedio. 228

Figura 102. LMP para demanda bioquímica de oxígeno promedio mensual de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997. 230

Figura 103. LMP para fósforo total promedio mensual de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996. 231

Figura 104. LMP para nitrógeno total promedio mensual de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996. 231

Figura 105. Localización geográfica de los sitios de muestreo, Lago Tláhuac-Xico. 233

Figura 106. Zona 5 (sitio 1), contaminación por residuos sólidos urbanos principalmente de construcción. 234

Figura 107. Dureza total (%) para cada zona de laguna. 237

Figura 108. Calidad del agua: DBO_5 (mg/L), febrero 2022. 237

Figura 109. Calidad del agua: DQO (mg/L), febrero 2022. 238

Figura 110. Calidad del agua: SST (mg/L), febrero 2022. 239

Figura 111. Calidad del del agua: CF (UFC/100 ml), febrero 2022. ..... *240*
Figura 112. Calidad del agua: OD (%), febrero 2022. ..... *241*
Figura 113. Límite máximo permisible de acuerdo a NOM-003-SEMARNAT-1997 con contacto directo, febrero 2022. ..... *244*
Figura 114. Ejemplos de trenes de tratamiento existentes a 2015 ..... *251*
Figura 115. Diagrama de Bloques de Posibles Esquemas Generales de Tratamiento para Reúso en Potabilización *253*
Figura 116. Balance del caudal generado en las PTAR *256*
Figura 117. Fuentes de agua influente a la PTAR (de azul se muestra el caudal de aguas pluviales y de verde las aguas residuales que reciben). Fuente: (CONAGUA, 2022). *256*
Figura 118. Temperatura media normal en LTX (promedio de Tláhua y Chalco) *257*
Figura 119. . Temperatura del agua durante campaña de muestreo *258*
Figura 120. Modulación de las PTARs en el Escenario A *262*
Figura 121. Modulación de las PTARs en el Escenario B *262*
Figura 122. Ubicaciones propuestas para PTARs lago Tláhuac-Xico *264*
Figura 123. Tren general de tratamiento avanzado *266*
Figura 124. Opción de tratamiento A1 ..... *269*
Figura 125. Perfil de remoción de contaminantes Opción de Tratamiento A1 ..... *271*
Figura 126. Opción de tratamiento A2 ..... *272*
Figura 127. Perfil de remoción de contaminantes Opción de Tratamiento A2 ..... *273*
Figura 128. Opción de tratamiento A3 ..... *274*
Figura 129. Perfil de remoción de contaminantes Opción de Tratamiento A3 ..... *275*
Figura 130. Opción de tratamiento A4 ..... *276*
Figura 131. Perfil de remoción de contaminantes. Opción de tratamiento A4 ..... *277*
Figura 132. Opción de Tratamiento B1 ..... *278*
Figura 133. Perfil de remoción de contaminantes. Opción de tratamiento B1 ..... *279*
Figura 134. Opción de Tratamiento B2 ..... *280*
Figura 135. Perfil de remoción de contaminantes. Opción de tratamiento B2 ..... *280*
Figura 136. Diagrama de bloques PTAR Tláhuac *289*
Figura 137. Diagrama de bloques PTAR Chalco *290*
Figura 138. Diagrama General del Proceso *291*
Figura 139. Diagrama General de Flujo de Proceso *304*
Figura 140. Arreglo General Conceptual PTAR Chalco *305*
Figura 141. Sembrado PTAR Chalco *306*
Figura 142. Arreglo General Conceptual PTAR Chalco *307*
Figura 143. Sembrado PTAR Chalco *308*
Figura 144. Diagrama de flujo de Planta Potabilizadora. *324*
Figura 145. Dimensionamiento de la Planta Potabilizadora. *327*
Figura 146. Sembrado de la Planta Potabilizadora. *328*

Figura 147. Diagrama general de proceso para la PP. Opción A1 330
Figura 148. Perfil de remoción de contaminantes en la PP. Opción A1 330
Figura 149. Diagrama general de proceso para la PP. Opción A2 331
Figura 150. Perfil de remoción de contaminantes en la PP. Opción 331
Figura 151. Diagrama general de proceso para la PP. Opción A3 332
Figura 152. Perfil de remoción de contaminantes en la PP. Opción A3 332
Figura 153. Ubicación de aportaciones de agua residual, tratada y combinada en el Lago Tláhuac-Xico. 337
Figura 154. Degradación del suelo en la periferia del Lago Tláhuac-Xico. 339
Figura 155. Avifauna presente en el Lago Tláhuac-Xico, 2021. 340
Figura 156. Vegetación presente en el Lago Tláhuac-Xico, 2021. 341
Figura 157. Comunidades fitoplanctónicas presentes en el Lago Tláhuac-Xico. 342
Figura 158. Análisis de densidad, biodiversidad y abundancias de microorganismos en el agua del Lago Tláhuac-Xico. 343
Figura 159. Ubicación y cuantificación de residuos en la periferia del Lago Tláhuac-Xico. 344
Figura 160. Zonificación de degradación y calidad del agua. 346
Figura 161. Tequios en Tláhuac, 2021. 348
Figura 162. Tequios en Tláhuac, 2022. 349
Figura 163. Ubicación de puntos de muestreo en el Lago Tláhuac-Xico. 350
Figura 164. Pato mexicano (Anas diazi), muestreo 2022. 351
Figura 165. Variación en la distribución y composición de las aves del Lago Tláhuac–Xico; A) muestreo de invierno de Ayala y colaboradores (2006), B) caracterización ambiental de CORENADR (2021) y C) muestreo 2022. 354
Figura 166. Número de individuos de Anas diazi registrados en el lago de Tláhuac–Xico, en diferentes años (2006, 2021 y 2022). 355
Figura 167. Muestreo de agua en el Lago Tláhuac-Xico, 2022. 357
Figura 168. Abundancias totales de los diferentes sitios dentro del Lago; el recuadro naranja marca una relación entre ambos sitios, las barras azules son los mayores valores y las barras amarillas los menores valores, los valores de Riachuelo Serpentino son muy bajas para visualizarse. 362
Figura 169. Zona de cultivo en la periferia del Lago Tláhuac-Xico. 363
Figura 170. Descripción del suelo para el Grupo 1. 365
Figura 171. Descripción del suelo para el Grupo 2. 365
Figura 172. Descripción del suelo para el Grupo 3. 366
Figura 173. Zonificación de las tablas del Lago basada en un índice que pondera la riqueza de especies documentada. 368
Figura 174. Zonificación de la calidad del agua del Lago Tláhuac-Xico. 370
Figura 175. Mapa de caracterización por tipos de suelo en la periferia del Lago Tláhuac-Xico. 371
Figura 176. Mapa de la calidad de los suelos en la periferia del Lago Tláhuac-Xico. 372
Figura 177. Mapa del uso actual del suelo en la periferia del Lago Tláhuac-Xico. 373
Figura 178. Zonificación general del Lago Tláhuac - Xico, acorde con la calidad del suelo, agua y diversidad de especies. 374
Figura 179. Ubicación de estrategias de restauración ecológica en el Lago Tláhuac-Xico. 383
Figura 180. Distribución de órdenes de invertebrados de acuerdo con la calidad de agua en el Lago Tláhuac – Xico. 389

Figura 181. Especies distribuidas por tipo de vegetación y calidad de agua en el Lago Tláhuac – Xico. La correlación del ID con del género y especie de invertebrados se puede visualizar en el Anexo XXIII. 390
Figura 182. Propuesta integral del Proyecto Parques lineales. 392
Figura 183. Imagen objetivo sección II Lago Tláhuac-Xico. 393
Figura 184. Acceso emblemático con puente que conecta las zonas II y III del Lago Tláhuac-Xico. 394
Figura 185. Plan maestro conceptual "Centro ecoturístico Humedales de Tláhuac". 395
Figura 186. Riego con aguas residuales, Paraje El Llano de Tecómitl (colector Barranca Seca). 398
Figura 187. Riego con aguas residuales, Paraje El Llano de Mixquic (colector Ameca). 398
Figura 188. Contaminación de los canales en los parajes de San Agustín y San Miguel, Mixquic. 399
Figura 189. Zona inundada en paraje La Habana, Mixquic. 400
Figura 190. Zona inundada en el Ejido de Tulyehualco, en la colindancia con el ejido de Tláhuac. 400
Figura 191. Infraestructura de riego existente en 2018 405
Figura 192. Acciones realizadas por la CORENADR en la zona agrícola de 2019 a 2022. 406
Figura 193. Zona de Riego actual. 407
Figura 194. Unidades productivas apoyadas por el programa Altepetl. 408
Figura 195. Operación de la nueva zona de riego con agua tratada de la PTAR Chalco. 414
Figura 196. Ejemplo de la distribución del agua en las unidades de riego. 416
Figura 197. Representación de puntos Lidar de Lago Tláhuac-Xico y periferias. 418
Figura 198. Representación 3D Modelo de Elevación Digital. 418
Figura 199. Representación 3D Modelo Batimétrico Lago Tláhuac-Xico. 419
Figura 200. Curvas Batimétricas (Izquierda) y Bases de control terrestre(derecha). 420
Figura 201. Ortofoto. 421
Figura 202. Presentación de los trabajos iniciales con ejidatarios de Tláhuac. Fuente: Fotografía propia, diciembre de 2021 ... 424
Figura 203. Ejidos de la región del Lago Tláhuac-Xico. Fuente: elaboración propia. 425
Figura 204. Proyecto conceptual metropolitano y ejidos de la región. Fuente: Elaboración propia. 426
Figura 205. Reunión presencial interinstitucional. Fuente: fotografía propia, febrero de 2022. 427
Figura 206. Parvadas de patos en el lago V durante recorrido de campo, de fondo el tiradero de cascajo y desarrollo urbano de Valle de Chalco. Fuente: fotografía propia, abril de 2022 428
Figura 207. Grado de presión sobre el recurso hídrico en México, 2018. Fuente: CONAGUA (2018). 429
Figura 208. Mesa de trabajo con ejido de San Juan Ixtayopan. Fuente: Fotografía propia, marzo de 2022. 430
Figura 209. Presentación del proyecto con participación de 6 de los 7 ejidos de la región. Fuente: Elaboración propia. 431
Figura 210. Cuenca de México con los valles que la componente 432
Figura 211. Los cinco lagos de la Cuenca de México Fuente: Plan hídrico de la Comisión de Cuenca de los ríos Amecameca y La Compañía. 433
Figura 212. Lago de Chalco en 1872 434
Figura 213. Cerro de Xico rodeado por la Laguna de Xico y por la ciudad de Valle de Chalco que se fundó en 1994 en lo que fue el Lago de Chalco. 434
Figura 214. Dotación de tierras a los pueblos de Tláhuac y Milpa Alta 436

Figura 215. Ejido de San Pedro Tláhuac, decretos de dotación y expropiación 437

Figura 216. Ejido de San Juan Ixtayopan, decretos de dotación y expropiación 437

Figura 217. Ejido de San Antonio Tecómitl, decretos de dotación y expropiación 438

Figura 218. Ejido de San Nicolás Tetelco, dotaciones y expropiaciones 438

Figura 219. Secuencia de Inundación. Tomado de Google Time Lapse. Fuente: https://earthengine.google.com/timelapse#v=19.26466,-98.96621,11.369,latLng&t=0&ps=50&bt=19840101&et=20201231&startDwell=0&endDwell=0 440

Figura 220. Ejido de Tláhuac, y ampliaciones de Ixtayopan, Tetelco y Tecómitl que fueron afectados por el nacimiento del PHLTX. Fuente: Elaboración propia. 441

Figura 221. Proyectos del San Juan Ixtayopan. Fuente: Elaboración propia. 444

Figura 222. Árbol de problemas en el ejido de Tláhuac. Fuente: Elaboración propia. 448

Figura 223. Árbol de soluciones. Fuente: Elaboración propia. 449

Figura 224. Cronología de dotaciones y expropiaciones en el ejido de Tláhuac. Fuente: Elaboración propia. 452

Figura 225. Propuesta de ecoparque en la ampliación del Ejido de Ixtayopan.Fuente: Elaboración propia. 457

Figura 226. Recorrido de campo con CORENADR, para el tema de infraestructura hidroagrícola. Fuente: fotografía propia, mayo de 2022. 471

Figura 227. Ubicación de las construcciones dentro de la zona Santuario del Agua. 473

Figura 228. Construcciones dentro de la zona Santuario del Agua. 473

Figura 229. Ortofoto de la zona de invasión de febrero 2022. 474

Figura 230. Acercamiento de ortofoto de la zona de invasión de febrero 2022. 474

Figura 231. Planteamiento de las acciones inmediatas 478

Figura 232. Presupuesto de acciones inmediatas 478

Figura 233. Tiro de cascajo en los municipios de Valle de Chalco Solidaridad y Chalco. 479

Figura 234. Santuario del Agua Lagunas de Xico 479

Figura 235. Ciclo de proyecto de Conagua. Fuente: Manual de Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento, libro 2 481

Figura 236. Proyecto ecoturístico socioambiental. Fuente: Elaboración propia. 483

Figura 237. Propuesta de administración de ecoparque. Fuente: Elaboración propia. 484

Figura 238. Propuestas de proyectos productivos y ecoturísticos en el ejido de Tláhuac. Fuente: Elaboración propia. 485

Figura 239. Propuesta de ecoparque en la ampliación del Ejido de Ixtayopan. Fuente: Elaboración propia. 486

Figura 240. Mapa del ejido de San Nicolás Totoloapan. Fuente: Presentación del ejido 487

Figura 241. Actividades recreativas. Fuente: Presentación del ejido 488

Figura 242. Estructuras de conservación de agua 488

Figura 243. Apoyo de CORENADR. Fuente: Presentación del ejido 489

Figura 244. Evento académico entre UAM – TUVCH. Fuente: fotografía propia. 493

Figura 245. Historietas del axolotl informativo. Fuente: Elaboración propia. 494

Figura 246. Vista de la página en redes sociales "Yo digo Sí al lago Tláhuac Xico" 496

Figura 247. Presentación pública del PHLTX Fuente: fotografías propias. 497

Figura 248. Mapas resultantes de las sesiones 1 y 2 504

Figura 249. Presentación del Taller de cartografía participativa *505*
Figura 250. Participación en el ejercicio "Presente con mi espacio" *506*
Figura 251. Participación del ejido San Juan Ixtayopan *506*
Figura 252. Participación del ejido San Pedro Tláhuac en la sesión seis *507*
Figura 253. Costo nivelado por alternativa ($/m3) a pesos al 2022 ..... *510*

Índice de Tablas

Tabla 1. Relación de sitios y problemática presentada para el saneamiento del área circundante a las lagunas de Tláhuac Xico 52
Tabla 1. Precipitación por cuenca hidrográfica ... 58
Tabla 2. Precipitación por cuenca hidrográfica ... 59
Tabla 3. Escurrimiento directo por cuenca hidrográfica ... 59
Tabla 4. Agua residual por cuenca hidrográfica ... 60
Tabla 5. Recarga potencial al acuífero por cuenca hidrográfica ... 61
Tabla 6. Demanda de riego en las parcelas agrícolas ... 62
Tabla 7. Evapotranspiración en el Lago Tláhuac-Xico ... 62
Tabla 8. Escurrimientos en el esquema hidrológico Tláhuac – Xico ... 63
Tabla 9. Ingresos al Lago Tláhuac–Xico ... 64
Tabla 10. Volúmenes concesionados en la zona de estudio ... 67
Tabla 11. Crecimiento poblacional en la zona de estudio ... 68
Tabla 12. Coordenadas de las referencias topográficas para el levantamiento fotogramétrico y topográfico del Lago Tláhuac-Xico. ... 76
Tabla 13. Coordenadas y elevaciones de los puntos de control para los 15 vuelos fotogramétricos. ... 79
Tabla 14. Comparación de las elevaciones del fondo del Lago Tláhuac-Xico. ... 83
Tabla 15. Gastos de entrada, Canal General ... 88
Tabla 16. Gastos de entrada en Canal a la zona 2 del Lago Tláhuac-Xico ... 88
Tabla 17. Localización de perforaciones exploratorias ... 117
Tabla 18. Propiedades de las unidades correspondientes al modelo geotécnico ... 121
Tabla 19. Propiedades consideradas para el cuerpo del terraplén ... 122
Tabla 20. Niveles estáticos ... 125
Tabla 21. Resultados obtenidos de los modelos analizados ... 135
Tabla 22. Factores de seguridad permisibles (Duncan, 2005; Comisión de Vialidad y Transporte Urbano COVITUR, 1987) ... 137
Tabla 23. Resultados de análisis talud izquierdo ... 138
Tabla 24. Resultados de análisis talud derecho ... 138
Tabla 25. Resultados de análisis talud derecho relación 2:1. ... 139
Tabla 26. Resultados de análisis de talud derecho relación 3:1. ... 139
Tabla 27. Matriz discriminante, Alternativas de profundización del Lago. ... 146
Tabla 28. Costo de inversión de alternativas Colectores/Fuentes ... 153
Tabla 29. Normativas desarrolladas para sistema de reúso potable. Modificado de Alcalde Sanz & Manfred Gawlik (2014) ... 157
Tabla 30. Reducción de parámetros que incumplían los Estándares primarios de agua potable. Modificado de (K. Nix , 2019). 163
Tabla 31. Componentes en un sistema de reúso potable. Modificado de (World Health Organization (2017). ... 167
Tabla 32. Métodos de remoción de disruptores endocrinos durante la potabilización. Modificado de (W. Birkett & N. Lester, 2003). ... 170

Tabla 33. Normativa para reúso de agua, específicamente del RPI con aumento de los reservorios de suministro de agua superficial. Modificado de Environmental Protection Agency (2012). 171

Tabla 34. Comparativa de diferentes procesos aplicados a la remoción de algunos CEs. Modificado de Environmental Protection Agency (2012) y Taoufik, Boumya, Achak, Sillanpää, & Barka (2021). 174

Tabla 35. Tipos de reúso apropiados de acuerdo al nivel de tratamiento. Modificado de Environmental Protection Agency (2012) 176

Tabla 36. Normativa de estados de Estados Unidos que abordan el reúso potable indirecto a partir de 2017. Modificado de Environmental Protection Agency (2017). 180

Tabla 37. Normas mexicanas del sector agua relacionadas al reúso potable. 185

Tabla 39. Comparativa de límites máximos permisibles de metales pesados de NOM-001-SEMARNAT-2021 que sustituye a la NOM-001-SEMARNAT-1996. 188

Tabla 40. Comparativa de límites máximos permisibles de la calidad para agua potable. 189

Tabla 41. Calidad de agua residual tratada para recarga artificial. 192

Tabla 42. Distancia mínima a las captaciones y tiempo de residencia en el subsuelo del agua de recarga. 192

Tabla 43. Resumen de procesos: efectividad de remoción de contaminantes y costos. Fuente: (Jiménez-Cisneros, 2014) 194

Tabla 44. Sistemas en operación de reúso potable indirecto, descarga a cuerpo de agua para posterior potabilización y suministro a la población. 198

Tabla 45. Calidad del agua de alimentación para cada una de las plantas. Modificado de (Lozier, Schimmoller, & Curl, 2016) . 201

Tabla 46. Parámetros monitoreados en Gwinnett County. Modificado de (Environmental Protection Agency, 2017) 201

Tabla 47. Datos importantes de la presa en el lago Wivenhoe 203

Tabla 48. Procesos aplicados en el sistema de tratamiento NEWater. Adaptado de (PUB Singapore´s National Water Agency, s.f.) y (WHO, 2017) 204

Tabla 49. Ejemplos de parámetros clave de monitoreo de la calidad del agua del NEWater Fuente:. (University of New South Wales, 2014) 205

Tabla 50. Humedales del sistema CCWA. Modificado de Environmental Protection Agency (2012). 207

Tabla 51. Estándares de calidad del agua tratada por E.L. Huie. Modificado de (Austin & Yu, 2016). 209

Tabla 52. Concentraciones "naturales" en humedales de flujo subsuperficial. Fuente: (Environmental Protection Agency, 2000). 210

Tabla 53. Eficiencia de remoción de contaminantes emergentes en humedales construidos a escala. Modificado de (Boshir Ahmed, y otros, 2017). 211

Tabla 54. Metodologías para determinación de índices de calidad del agua. Modificada de (Uddin, Nash, & I. Olbert, 2021) y (Castro, Almeida, Ferrer, & Díaz, 2014). 217

Tabla 55. Monitoreo de agua superficial en 2020. Modificado de (CONAGUA, 2021). 219

Tabla 56. Criterios de calidad del agua de acuerdo al indicador DBO5. 223

Tabla 57. Criterios de calidad del agua de acuerdo con el indicador DQO. 223

Tabla 58. Criterios de calidad del agua de acuerdo con el indicador SST. 224

Tabla 59. Criterios de calidad del agua de acuerdo con el indicador CF. 224

Tabla 60. Criterios de calidad del agua de acuerdo al indicador %OD. 225

Tabla 61. Calidad del agua de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997. 229

Tabla 62. Calidad del agua de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997. Continuación 229

Tabla 63. Calidad del agua de acuerdo límites máximos permisibles para metales pesados (NOM-001-SEMARNAT-1996. 231

Tabla 64. Sitios de muestreo. 232
Tabla 65. Calidad del agua: límites permisibles NOM-127-SSA1-1994 Mod. 2000. 234
Tabla 66. Resumen y comparativa de los contaminantes orgánicos y nutrientes en las descargas 242
Tabla 67. Límites máximos permisibles establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997, contacto directo. 243
Tabla 68. Límites permisibles de metales pesados establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021. 244
Tabla 69. Actividades económicas más importantes en el Valle de Chalco-Solidaridad que pueden impactar en la calidad de agua y presencia de CEs. 247
Tabla 70. Comparación de sistemas RPD y RPI con el Proyecto Integral Tláhuac-Xico. 247
Tabla 71. Aspectos analizados en la propuesta de solución para el proyecto RPI en el Lago Tláhuac-Xico 248
Tabla 72. Riesgos del proyecto y propuestas de solución 254
Tabla 73. Bases de diseño propuestas para TDRs de PTAR Chalco y Tláhuac 258
Tabla 74. Parámetros límite en la normativa nacional 260
Tabla 75. Ubicación y capacidad de las PTARs 263
Tabla 76. Trenes de tratamiento de referencia 264
Tabla 77. Áreas estimadas para la instalación de las diferentes opciones del tren de tratamiento (400 L/s) 282
Tabla 78. Estimación del costo de inversión CAPEX por módulo de 400 L/s 283
Tabla 79. Estimación del costo operativo OPEX por módulo de 400 L/s 284
Tabla 80. Matriz de decisión entre las diferentes opciones de PTAR del Escenario A 285
Tabla 81. Matriz de decisión entre las diferentes opciones de PTAR del Escenario B 286
Tabla 82. Calidad del agua del afluente del proceso anaerobio-anóxico-aerobio-oxidación avanzada. 294
Tabla 83. Calidad del agua de influente 294
Tabla 84. Especificación técnica de cribas gruesas 295
Tabla 85. Especificación técnica de cribas finas 295
Tabla 86. Desarenador-Desengrasador 296
Tabla 87. Especificación técnica del proceso anaerobio 296
Tabla 88. Especificación técnica del proceso A2O 296
Tabla 89. Especificación técnica de aireación del proceso 297
Tabla 90. Especificación técnica de eliminación química de fósforo / coagulación 298
Tabla 91. Especificación técnica de tanques de membrana 298
Tabla 92. Especificación técnica de productos químicos para limpieza y recuperación 298
Tabla 93. Especificación técnica sistema generación de ozono 299
Tabla 94. Especificación técnica 299
Tabla 95. Especificación técnica de desinfección UV 300
Tabla 96. Especificación técnica del tanque de almacenamiento de lodos 300
Tabla 97. Especificación técnica de la unidad de espesado mecánico 301
Tabla 98. Especificación técnica del tanque de mezcla de lodos 301
Tabla 99. Especificación técnica del digestor anaerobio 301

Tabla 100. Especificación técnica del tanque desgasificador de lodos 302
Tabla 101. Especificación técnica de unidad deshidratradora de lodos 302
Tabla 102. Especificación técnica de los sistemas de preparación de polímero 302
Tabla 103. Especificación técnica del tanque de almacenamiento de biogás 303
Tabla 104. Especificación de la unidad de potencia de cogeneración 303
Tabla 105. Especificación técnica del quemador de biogás exceso 303
Tabla 106. CAPEX estimado 309
Tabla 107. Estimación de Costo Operativo PTAR Tláhuac 311
Tabla 108. Estimación de Costo Operativo PTAR Chalco (Actual-Etapa1) 311
Tabla 109. Estimación de Costo Operativo PTAR Chalco (Con ampliación a Futuro) 312
Tabla 110. Estimación de personal requerido para la operación de la PTAR 314
Tabla 111. Programa de obra 315
Tabla 112. Calidad del influente a la Planta Potabilizadora. 317
Tabla 113. Desglose del monto de inversión por partidas. 320
Tabla 114. Personal considerado para la operatividad de la planta. 321
Tabla 115. Tarifa de energía por metro cúbico de agua potabilizada. 321
Tabla 116. Costos por reactivos. 322
Tabla 117. Costos por mantenimiento. 322
Tabla 118. Resumen de costos por operación y mantenimiento 323
Tabla 119. Balance de masa de la planta potabilizadora. 325
Tabla 120. Requerimiento de personal. 325
Tabla 121. Programa de obra. 326
Tabla 122 Valores de Conductividad Eléctrica y pH en el Lago Tláhuac-Xico. 338
Tabla 123. Riqueza y diversidad de especies estimadas a través del Índice de Shannon para las cinco secciones del Lago Tláhuac-Xico 352
Tabla 124. Riqueza y diversidad de especies de aves, estimada a través del índice de Shannon para siete secciones del Lago Tláhuac–Xico 352
Tabla 125. Grupos morfológicos funcionales (MBFG) encontrados en el lago Tláhuac-Xico, según Kruk et al. 2010 y la descripción de sus características 360
Tabla 126. Valores de diversidad de acuerdo con el índice de Shannon-Wiener (H') por sitio 361
Tabla 127. Superficies a revegetar en las estrategias de restauración de la biodiversidad. 376
Tabla 128. Paleta vegetal propuesta para la revegetación de las orillas de las zonas y los bordes de éstas. 377
Tabla 129. Especificaciones por Módulo en el sistema de humedales de la Zona II del Lago Tláhuac-Xico. 380
Tabla 130. Organismos vegetales para los sistemas HAFSS y HAFS. 381
Tabla 131. Clasificación de bioindicadores para monitoreo de calidad de agua en cuerpos lacustres. 384
Tabla 132. Bioindicadores propuestos para el seguimiento de la calidad de agua posterior a la implementación de las estrategias de restauración del Lago Tláhuac-Xico. 386
Tabla 133. Registro de especies acuáticas depredadoras, registradas en el Lago de Tláhuac-Xico (enero—febrero 2022). 390

Tabla 134. Acciones realizadas con el Programa Altépetl Bienestar de 2019-2020 al sistema hidroagrícola..... 402
Tabla 135. Caudal necesario para la zona de riego. 409
Tabla 136. Operación actual con el caudal disponible 409
Tabla 137 Operación actual de infraestructura hidroagrícola independiente de Cerro de la Estrella. 410
Tabla 138. Caudal para la zona de riego..... 412
Tabla 139. Operación con el caudal de la PTAR Chalco. 413
Tabla 140. Zona Agrícola que cuenta con infraestructura de riego. 415
Tabla 141. Zona Agrícola que no cuenta con infraestructura de riego. 415
Tabla 142. Dotaciones y ampliaciones de tierra del Lago de Chalco desecado..... 435
Tabla 143. Objetivos particulares para el árbol de soluciones..... 449
Tabla 144. Problemáticas sociales y ambientales en San Pedro Tláhuac..... 451
Tabla 145. Problemáticas sociales y ambientales en San Juan Ixtayopan 453
Tabla 146. Conflictividad potencial en el ejido de San Juan Ixtayopan. 454
Tabla 147. Aspiraciones y expectativas respecto al PHLTX, Ixtayopan. 455
Tabla 148. Problemáticas sociales y ambientales en San Antonio Tecómitl 458
Tabla 149. Aspiraciones y expectativas de Tecomitl 458
Tabla 150. Conflictividad potencial de Tecomitl 459
Tabla 151. Evidencias ideológicas relacionadas con el plan HLTX 467
Tabla 152. Factibilidad social y jurídica 468
Tabla 153. Resultados de análisis de manzanas y superficies en zona de invasión 475
Tabla 154. Resultados de la clasificación de las construcciones 475
Tabla 155. Resultados del análisis de los predios de acuerdo al tipo y material..... 477
Tabla 156. Resultados del análisis de los predios de acuerdo al tipo y material..... 477
Tabla 157. Cartera de proyectos del PMIR, situación actual conforme al ciclo de proyectos 481
Tabla 158. Situación de las peticiones jurídicas de los ejidos de Tláhuac y Tecomitl. 482

Acrónimos, Siglas y Unidades

Acrónimo, siglas y unidades	Significado
AGWR	Australian Guidelines for Water Recycling
AVAD	Año de Vida Ajustado por Discapacidad. Una unidad AVAD puede considerarse como la pérdida de un año de vida "saludable". (por sus siglas en inglés *Disability Adjusted Life Years, DALY*)
BAC	Filtración biológica sobre carbón activado (por sus siglas en inglés *Biological Activated Carbon*)
CAPEX	Costos de inversión
CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CCWA	Clayton County Water Authority
CDMX	Ciudad de México
Ces	Contaminantes emergentes
CH_4	Metano
CNR	Contaminantes no regulados en fuentes
CF	Coliformes fecales
CFE	Comisión Federal de Electricidad
Cl	Cloración
Cl_2	Cloro gas
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CO_2	Dióxido de carbono
COT	Carbono orgánico total
DAF	Flotación por aire disuelto (pro sus siglas en *inglés Dissolved Aire Flotation*)
DBO_5	Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días
$DBOC_5$	Demanda bioquímica de oxígeno carbonácea a los 5 días
DOF	Diario Oficial de la Federación
DQO	Demanda química de oxígeno, utilizando dicromato de potasio como agente oxidante
E. coli	*Escherichia coli (patógeno)*
EPA	Agencia de Protección Ambiental de EUA (por sus siglas en inglés *Environmental Protection Agency*)
EUA	Estados Unidos de América
FCA	Filtro de carbón activado
FWH WRC	Centro de Recursos Hídricos F. Wayne Hill (e Goergia, EUA)
GAC	Carbón activado granular (por sus siglas en inglés *Granular activated carbon*)
Ha	Hectárea
HC	Humedales construidos
hm3	Hectómetros cúbicos (millones de metros cúbicos)

H_2O_2	Peróxido de hidrógeno
H_2S	Ácido sulfhídrico
ICA	Índice de Calidad del Agua
kW	Kilowatt (equivalente a kWh/h)
kWh	Kilowatt-hora
LAS	Tratamiento por aplicación al suelo (por sus siglas en inglés *Land Application System*)
LP	Límites Permisibles
L/s	Litros por segundo (flujo)
LTX	Lago Tláhuac-Xico
MCPA	Ácido 4-cloro-2-toliloxiacético (herbicida)
MBR	Reactor biológico de membranas (por sus siglas en inglés *Membrane Bioreactor*)
MF	Microfiltración
mg/L	Miligramo por litro (1 mg/L = 1 ppm (parte por millón))
µg/L	Microgramo por litro (1,000 µg/L = 1 mg/L)
µS/cm	Microsiemens por centímetro (unidad de conductividad)
NEWater	Estudio de Recuperación de Agua de Singapur
NF	Nanofiltración
ng/L	Nanogramo por litro (1,000 ng/L = 1 µg/L= 0.001 mg/L)
NMP	Número más probable
NH_3	Amoniaco
$N\text{-}NH_4$	Nitrógeno en forma de nitrógeno amoniacal
$N\text{-}NO_2$	Nitrógeno en forma de nitrito
$N\text{-}NO_3$	Nitrógeno en forma de nitrato
NOM	Normal Oficial Mexicana
NTK	Nitrógeno total Kjeldahl
NTU	Unidad de medición de turbidez (por sus siglas en inglés, *Nephelometric Turbidity Unit*).
OA	Oxidación avanzada
OI	Ósmosis inversa
OMS	Organización Mundial de la Salud (también encontrado como WHO, por sus siglas en inglés *World Health Organization*)
OPEX	Costos de operación
O_2	Oxígeno
O_3	Ozono
PAC	Carbón activado en polvo
PCC	Punto de control crítico
P.D.	Promedio diario
pH	Potencial de hidrógeno
PITLX	Proyecto Integral Lago Tláhuac-Xico

HLTX	Habilitación del Lago Tláhuac-Xico
P.M.	Promedio mensual
PP	Planta potabilizadora
Pppa	Por persona por año (también conocido como pppy por sus iniciales en inglés *per person per year*)
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
RPD	Reúso Potable Directo
RPI	Reúso Potable Indirecto
RPIIAS	Reúso Potable Indirecto para el Incremento de Aguas Superficiales
SAAM	Sustancias activas al azul de metileno
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (México)
$SO_4^=$	Sulfatos
SSA	Secretaría de Salud
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
STD	Sólidos totales disueltos
STV	Sólidos totales volátiles
TiO_2	Óxido de titanio (IV)
TOX	Haluros orgánicos totales
TRC	Tiempo de retención celular
TRH	Tiempo de retención hidráulica
TTC	Umbrales de preocupación toxicológica (por sus siglas en inglés *Threshold of Toxicological Concern*)
UASB	Reactor anaeróbico de lecho de lodos y flujo ascendente (por sus siglas en inglés *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)
UC	Unidades de color verdadero
UF	Ultrafiltración
UFC	Unidades formadoras de colonias
UT	Unidades de Toxicidad
UV	Radiación ultravioleta
V.I	Valor instantáneo
WRC	Centro de Recursos Hídricos (por sus siglas en inglés *Water Rosources Center*)

Glosario

Abundancia. Se refiere al número de individuos por especies en un espacio o población determinados. La abundancia puede ser absoluta o relativa. La primera hace referencia al total de individuos de interés, mientras que la segunda a su porcentaje o proporción con respecto al total.

Adsorción. El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. Los sistemas de adsorción en ocasiones se utilizan como filtros biológicos donde el carbón activado granular sirve como soporte para las bacterias, sin embargo, suele ir precedido con la adición de ozono para fracturar las moléculas refractarias a la oxidación biológica, esta combinación es una excelente herramienta para remoción de contaminantes emergentes, convirtiéndolo en uno de los métodos preferidos para la remoción de estos contaminantes, bajo algunas categorizaciones, este proceso cae dentro de la clasificación de procesos de Oxidación Avanzada.

Aguas recuperadas. Aguas residuales que **han sido tratadas para cumplir con criterios específicos de calidad del agua con la intención de ser utilizadas para una variedad de propósitos**, obtenida después de un proceso RPI o RPD. También conocida como **agua reciclada** (Environmental Protection Agency, 2012; Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013). Los términos recuperación, reúso, reutilización y reciclaje de agua serán considerados como sinónimos para el presente documento

Anátidos. Aves acuáticas palmípedas del orden de las anseriformes, como los patos, gansos, cisnes, etc. Se alimentan de pequeños animales, plantas acuáticas, semillas, insectos, pescados, moluscos, crustáceos, etc. Se encuentran en todas partes del mundo
Avifauna. Conjunto de especies de aves que habitan una determinada región en un período de tiempo determinado.

Chaponeo. El chaponeo consiste en eliminar hierbas y arbustos, con el fin de disminuir la competencia por luz que se requiere para la promoción de la regeneración natural. Esta labor se puede realizar antes o después del aprovechamiento. También contribuye a reducir el material combustible, aminorando los efectos adversos en caso de presentarse un incendio forestal.

Cianobacterias. Son microorganismos similares a las bacterias en su estructura, pero sin núcleo ni orgánulos, que pueden llevar a cabo la fotosíntesis oxigenada y contener clorofila. Tienen una notable capacidad de adaptación a los cambios climáticos. Logran sobrevivir muchos años a la luz ultravioleta de alta intensidad, a la deshidratación, a los ambientes hipersalinos y a las temperaturas extremas.

Contaminantes emergentes (CES). Microcomponentes o componentes químicos traza presentes en el medio ambiente, incluyen una gran variedad de compuestos químicos, productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, agentes tensoactivos, plastificantes, aditivos industriales, etc. (Gil, 2012). Son considerados contaminantes de interés por los efectos negativos que causan a los organismos del medio ambiente acuático y la salud humana.

Digestores anaerobios. es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), en donde se realiza el proceso biológico para la estabilización de lodos de PTAR o aguas residuales, en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o "biogás" (CH4, CO2, H2, H2S, etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

Endémico. Es un término empleado para indicar que la distribución de una especie es limitada a un ámbito geográfico reducido y que no se encuentra en ninguna otra parte del mundo. En otras palabras, aquellas especies endémicas, donde quiera que estén, son únicas para esa región y solo es posible encontrarlas de forma natural en dicho lugar.

Endorreico. Cuenca hidrográfica cuyas aguas de escorrentía terminan vertiendo hacia una depresión interna.

Especie Exótica-invasora. Son especies introducidas de forma natural, accidental o intencionada en un medio que no es el suyo y que, después de cierto tiempo, consiguen adaptarse al él y colonizarlo. Estas especies son la segunda causa de pérdida de biodiversidad en el mundo.

Eutrófico. Se refiere a un cuerpo de agua que es rico en nutrientes y minerales y, por tanto, que presenta un exceso de crecimiento de algas, lo que ocasiona una disminución del contenido de oxígeno en detrimento de otros organismos.

Eutrofización. Proceso natural en ecosistemas acuáticos, especialmente en lagos, caracterizado por un aumento en la concentración de nutrientes como nitratos y fosfatos, con los consiguientes cambios en la composición de la comunidad de seres vivos.

Fitoplancton. Microalgas que obtienen su energía y nutrientes a través de la energía solar por el proceso conocido como fotosíntesis y por ello, casi siempre se encuentran cerca de la superficie del agua

Germoplasma. Se refiere al conjunto de genes que, mediante células reproductoras o gametos, son transmitidos a los descendientes a través de la reproducción. Es un concepto que alude a la diversidad genética de las diferentes especies de plantas, ya sean cultivadas por el hombre o silvestres.

Grupo Morfológico Funcional. Que se establecen con base en la relación que existe entre la morfología de su estructura o una sección del organismo con la función que lleva a cabo.

Grupo Taxonómico. Es un grupo de organismos emparentados que, en una clasificación dada, han sido agrupados asignándole un nombre en latín, una descripción si es una especie y un tipo.

Hábitat. Conjunto de factores físicos y geográficos que permiten la vida de una especie determinada. En un ecosistema, es el lugar físico en el que vive una comunidad. En ecología, dicho lugar es el que reúne las condiciones adecuadas para la vida de un organismo, especie o comunidad, ya sea de carácter animal o vegetal.

Hipertrófico. Organismo o sistema que sufre hipertrofia, es decir, el crecimiento desmedido de alguno de sus órganos o componentes y que causa algún tipo de disfuncionalidad.

Hipoxia. Fenómeno natural producido en cuerpos de agua dulce y salada en los que los factores climáticos, la geografía del océano, las corrientes y nutrientes favorecen el estado hipóxico, es decir, la escasez de oxígeno.

Indicador: parámetro o valor que proporciona información sobre la descripción del estado de un fenómeno/ambiente/área, con un significado que se extiende más allá de un valor directamente relacionado con un parámetro.

Índice. un conjunto de parámetros o indicadores agregados o ponderados.

Índice de diversidad de Simpson. Se emplea para medir la dominancia más que de diversidad y representa la probabilidad de que dos individuos escogidos al azar pertenezcan a la misma especie (Moreno 2001). Es decir, cuanto más se acerca el valor de este índice a la unidad, existe una mayor posibilidad de dominancia de una especie y de una población; y cuanto más se acerque el valor de este índice a cero mayor es la biodiversidad de un hábitat.

Índices de Margalef. Se emplea para estimar la biodiversidad de una comunidad con base en la distribución numérica de los individuos de las diferentes especies en función del número de individuos existentes en la muestra analizada. Valores inferiores a dos son considerados como zonas de baja biodiversidad y valores superiores a cinco son indicativos de alta biodiversidad.

Índice de Shannon. También conocido en la literatura como Shannon-Weaver, se usa para medir la biodiversidad específica, es decir, la cantidad de diferentes microorganismos y organismos que hay en un ecosistema. Se usa el símbolo H' para representarlo, y sus valores oscilan entre números positivos, generalmente entre 2, 3 y 4.

Índice de Shannon-Wiener. Se usa para medir la heterogeneidad de una comunidad sobre la base de dos factores: el número de especies presentes y su abundancia relativa. Conceptualmente es una medida del grado de incertidumbre asociada a la selección aleatoria de un individuo en la comunidad.

Filtración. La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso

Filtración biológica sobre carbón activado (BAC). Este proceso generalmente va precedido de la inyección de ozono, el cual oxida la materia orgánica convirtiendo los compuestos no biodegradables y lentamente biodegradables en biodegradables, consiguiendo que puedan ser posteriormente eliminados biológicamente en los filtros de carbón activo. Sin embargo, la inestabilidad del ozono en el agua hace que se produzcan ácidos carboxilos, alcoholes y aldehídos, conocidos como subproductos de la desinfección. Por lo tanto, en el filtro se adiciona un medio soporte (carbón activado granular) para que los microorganismos remuevan la materia orgánica biodegradable. Debido a que parte del ozono se convierte en oxígeno, el agua que llega al filtro de carbón activado tiene las condiciones ideales para que exista un desarrollo de bacterias aerobias. En el filtro se eliminan subproductos de la desinfección no deseados, y reduce los niveles de carbono orgánico disuelto biodegradable, asimilándolo a valores que consigan la bioestabilidad del agua producto, a fin de evitar recrecimiento de *biofilm* en las redes de distribución. Aunque la capacidad de eliminación de materia orgánica se reduce a medida que el filtro se satura y entra en la fase biológica, la biodegradación en esta fase se mantiene estable y perdura a lo lago de los meses sin preocupaciones por la regeneración del carbón.

Filtro percolador. Sistema de tratamiento biológico que consiste en una cama de grava o un medio plástico sobre el cual se rocían las aguas negras pretratadas. En los filtros percoladores, los microorganismos se apegan al medio del lecho y forman una capa biológica sobre éste. A medida que las aguas negras se percolan por el medio, los microorganismos digieren y eliminan los contaminantes del agua.

Lixiviado. Es el proceso de pérdida de líquido de un material. En el caso concreto de los residuos, el proceso de degradación biológica puede resultar en un líquido con contaminantes orgánicos y minerales por extracción de compuestos solubles.

Lixiviación. Disolución de materiales como las sales y los minerales solubles por el agua que se filtra a través del suelo, especialmente en regiones de fuerte precipitación.

Lodos activados. El proceso de lodos activados consiste en un tanque de aireación con mezcla completa y continúa provista por difusores y sopladores de aire, o bien por aireadores mecánicos. Los "lodos" (biomasa) se alimentan y crecen a partir de la materia orgánica del agua residual. Los lodos crecen en forma de flóculos que sedimentan al pasar por un clarificador secundario; el agua clarificada desborda por la parte superior de dicho tanque, en tanto que la biomasa concentrada se recircula al tanque de aireación y una pequeña fracción, la purga, se envía al sistema de tratamiento de lodos.

Materia carbonosa biodegradable. Sustancias producidas a partir de materias primas que contienen carbono y que se producen en procesos térmicos, químicos o hidrotermales en fases gaseosa, líquidas o sólidas, y que son susceptibles a ser descompuestas por microorganismos.
Materia carbonosa no biodegradable. Sustancia producida a partir de materias primas que contienen carbono y que se producen en procesos térmicos, químicos o hidrotermales en fases gaseosa, líquidas o sólidas, y que no pueden ser descompuestas por la acción de microorganismos.

Normas Oficiales Mexicanas (NOMs). Son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes, que tienen como finalidad establecer las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana. Algunas NOMs revisadas en el presente informe fueron:

NOM -001-SEMARNAT-1996 – Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM -001-SEMARNAT-2021-Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación.
NOM -014-CONAGUA-2003 – Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
NOM-127-SSA1-2021 (por publicarse). Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
NOM-179-SSA1-2020. Agua para uso y consumo humano. Control de la calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua.

Oxígeno Disuelto. El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno gaseoso que esta disuelto en el agua. El oxígeno libre es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismos; por eso, desde siempre, se ha considerado como un indicador de la capacidad de un río para mantener la vida acuática.

Oxidación avanzada. Son aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales libres hidroxilos en cantidad suficiente para interaccionar con los compuestos orgánicos del medio, son capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. El radical hidroxilo puede ser formado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) u otras formas de energía, posee una alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica, su reactividad únicamente es superada por el flúor

Parámetro. Una propiedad que se mide o se observa.

Predominancia. Se refiere a la relación entre dos versiones de un gen. Cada individuo recibe dos versiones de cada gen, conocidas como alelos, una de cada padre. Si los alelos de un gen son diferentes, el alelo que se expresa es el gen dominante. El efecto del otro alelo, denominado recesivo, queda enmascarado.

Procesos de membrana. En general se pueden decir que los procesos de membranas usan una barrera permeable para filtrar componentes seleccionados de mezclas. Los sistemas de procesamiento con membranas pueden disminuir los costos de energía, eliminar emisiones y mejorar la calidad del producto en alguna aplicación.

Microfiltración. Elimina los sólidos en suspensión de tamaño superior a 0,1 – 1,0 µm. Es efectiva eliminando los patógenos de gran tamaño como Giardia y Cryptosporidium. Se suele emplear la ultrafiltración cuando la concentración de STD (Sólidos Totales Disueltos) no es problemática, ya que los poros de la membrana son comparativamente grandes como para filtrar partículas muy pequeñas. Más usualmente se emplea como pretratamiento de sistemas con las membranas más delicadas, como la osmosis inversa o la nanofiltración.

Ultrafiltración. Puede emplearse para eliminar esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes (0,01 mm). Se utiliza la UF cuando deben eliminarse prácticamente todas las partículas coloidales (incluyendo la mayor parte de microorganismos patógenos). Estos sistemas, capaces de eliminar bacterias y virus se suelen utilizar como pretratamiento para sistemas de nanofiltración, hiperfiltración u osmosis inversa. Puesto que los coloides se eliminan, el agua tratada debe tener una turbidez prácticamente nula.

Nanofiltración. Elimina los contaminantes de tamaño superior al nanómetro (0.001µm). Las membranas de NF se emplean cuando se requiere eliminar prácticamente, aunque no todos, los sólidos disueltos. La tecnología se llama también ablandamiento por membrana, ya que se eliminan del agua los iones de la dureza que tienen 2 cargas (calcio y magnesio) mejor que los que solo tienen una (sodio, potasio, cloro, entre otros).

Ósmosis inversa. Es una tecnología de membrana en la cual el solvente (agua) es transferido a través de una membrana densa diseñada para retener sales y solutos de bajo peso molecular. La OI elimina prácticamente todas las sales y los solutos de bajo peso molecular. Se considera una eliminación prácticamente total de todas las sales disueltas y total de los sólidos en suspensión. Debido a esto, las membranas de OI son la elección cuando se necesita agua muy pura o de bebida, especialmente si la fuente es agua salobre o agua de mar.

Reducción logarítmica. La reducción logarítmica es una medida de qué tan a fondo un proceso de descontaminación reduce la concentración de un contaminante. Una reducción

n- log significa que la concentración de contaminantes restantes es sólo 10 n veces menor que el original. Así, por ejemplo, una reducción de 0 logaritmos no es reducción en absoluto, mientras que una reducción de 1 logaritmo corresponde a una reducción del 90 por ciento de la concentración original, y una reducción de 2 logaritmos corresponde a una reducción del 99 por ciento de la concentración original:

Log Reduction	Number of CFUs Remaining	Percentage Reduction
0 log	1,000,000	0%
1log	100,000	90%
2log	10,000	99%
3log	1,000	99.9%
4log	100	99.99%
5log	10	99.999%
6log	1	99.9999%

Recarga artificial. Conjunto de técnicas hidrogeológicas aplicadas para introducir agua a un acuífero, a través de obras construidas con ese fin. (NOM-014-CONAGUA-2003).

Reservorio. Es el almacenamiento de aguas superficiales o subterráneas, para brindar la oportunidad de cortar físicamente la conexión a la fuente, así como ofrecer tiempo para responder a alteraciones imprevistas del proceso. Puede ser de tipo ambiental (natural) o diseñado (construido).

Reúso de agua.

Reúso de facto: Ocurre cuando las comunidades utilizan agua superficial como fuente de agua potable que ha sido sometida a descargas de aguas residuales río arriba.

Reúso no potable: Se refiere al agua tratada que no se usa para beber pero que es segura de usar para irrigación o procesos industriales.

Reúso potable: Se refiere al agua reciclada o recuperada que es segura para beber, ya que ha pasado por un proceso de tratamiento avanzado que garantiza el uso potable

Reúso potable directo (RPD): Representa la introducción de aguas residuales tratadas (con o sin retención en un almacenamiento diseñado) en un suministro de agua potable sin descarga previa a un reservorio ambiental. Las aguas residuales tratadas pueden mezclarse con agua sin tratar de un río, lago, embalse o acuífero antes de una planta potabilizadora; mezclarse con agua tratada aguas abajo de una planta potabilizadora convencional; o introducir directamente en un sistema de distribución de agua potable.

Reúso potable indirecto (RPI): Representa la adición planificada de aguas residuales tratadas a cuerpos de agua utilizados como fuentes de agua potable. Los cuerpos de agua, que pueden incluir ríos, lagos, embalses y acuíferos, se denominan reservorios ambientales. El agua que contiene una proporción de aguas residuales tratadas se toma de la reserva ambiental y se trata para proporcionar agua potable.

Silvopastoril. Combinación de especies forestales o frutales y animales, sin la presencia de cultivos. Se practican a diferentes niveles, desde las grandes plantaciones arbóreas comerciales con inclusión de ganado, hasta el pastoreo de animales como complemento a la agricultura de subsistencia.

Sumidero de carbono. Se refiere al depósito natural o artificial con la capacidad de absorber y almacenar carbono, por ejemplo, de la atmósfera, contribuyendo a reducir la cantidad de CO_2 del aire.

Substrato. En biología un sustrato es la superficie en la que una planta o un animal vive. El sustrato puede incluir materiales bióticos o abióticos. Por ejemplo, las algas que viven incrustadas en una roca pueden ser el sustrato para otro animal que vive en la parte superior de las algas.

Taludes. Se entiende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, presenta una pendiente o cambios significativos de altura. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención.

Taxón. Unidad sistemática que designa un nivel jerárquico en la clasificación de los seres vivos, como la especie, el género, la familia, el orden y la clase.

Tequios. Deriva de la palabra en náhuatl tequitl, que significa trabajo o tributo, y se refiere a la cooperación en especie y trabajo de los miembros de una región para construir, reparar y preservar sus alrededores.

Tropical oligomíctico. Término que define las masas de aguas continentales con escasos periodos de circulación, que se disponen de forma irregular a lo largo de un año. Se caracterizan por presentar temperaturas superiores a los 4° C, y corresponden a zonas tropicales húmedas.

UASB. Los reactores UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket), también conocido como RAFA (reactor anaerobio de flujo ascendente) son un tipo de biorreactor tubular que operan en régimen continuo y en flujo ascendente, es decir, el afluente entra por la parte inferior del reactor, atraviesa todo el perfil longitudinal, y sale por la parte superior. Son reactores anaerobios en los que los microorganismos se agrupan formando biogránulos.

Vegetación hidrófila. Son plantas adaptadas a los medios muy húmedos o acuáticos, como lagos, estanques, estuarios, pantanos, orillas de los ríos y deltas. Su adaptación al medio acuático es variable. Se pueden encontrar diferentes grupos de plantas: unas totalmente sumergidas, otras, las más numerosas, parcialmente sumergidas o con hojas flotantes.

Proyecto de Aprovechamiento y Manejo Ambiental del Lago Tláhuac-Xico

Informe final

Antecedentes

Durante el año 2021 se retoma la rehabilitación o recuperación del Lago Tláhuac-Xico por distintas dependencias como un tema prioritario. Por ello, para la evaluación de la factibilidad y viabilidad sobre la habilitación se conformó un grupo multidisciplinario de trabajo.

Tomando en cuenta las variables sociales, jurídicas, normativas, territoriales, ecológicas y técnicas, identificadas en el ámbito regional del Lago Tláhuac-Xico, se establecieron componentes como ejes de trabajo. Lo anterior, para plantear a nivel conceptual, un proyecto de aprovechamiento y manejo ambiental del Lago, considerando las dinámicas presentes en la zona, y a través del planteamiento de objetivos específicos por componente.

Así pues, los componentes determinados fueron los siguientes: Social jurídico; Geovisualizador; Restauración lacustre y ecológica; normatividad; Plantas de Tratamiento y Potabilizadora; Fuentes y colectores; Profundización; Arquitectura del Paisaje.

Como punto de partida se retomaron los planteamientos descritos en el “Plan hídrico de las subcuencas Amecameca, La Compañía y Tláhuac–Xico” elaborado en el año 2011 por la Comisión de Cuenca de los Ríos Amecameca y La Compañía y la Universidad Metropolitana. Cuyo objetivo fue el de consensar estrategias y acciones requeridas para la restauración y gestión equilibrada de la Subcuenca Amecameca, La Compañía y Tláhuac-Xico y sus recursos hídricos, para la seguridad y bienestar de sus habitantes.

En las siguientes secciones se describen las características de la zona del Lago Tláhuac-Xico, objeto del presente informe, así como, algunas de las características a nivel regional o de cuenca. Lo anterior para considerar posteriormente su influencia, relación y las implicaciones en el sistema de interés. Así mismo, se describen las zonas que componen el Lago para su identificación.

1.1 Ubicación geográfica

El Lago Tláhuac-Xico se ubica al sureste de la Ciudad de México en los límites con el Estado de México, su superficie ocupa parte de la Alcaldía de Tláhuac (Ciudad de México) y de Valle de Chalco Solidaridad (Estado de México). Colinda con el municipio mexiquense de Chalco, y de las alcaldías de la Ciudad de México de Milpa Alta y Xochimilco.

En la Figura 1 se observa la ubicación del Lago, el cual se encuentra conformado por 5 cuerpos de agua, derivado de las vialidades que lo cruzan (calzada Tláhuac-Chalco y la Av. De Las Bombas, o también llamado camino de los pozos Mixquic-Santa Catarina). Dichos cuerpos se encuentran conectados por un conjunto de tuberías al interior de los terraplenes de las vialidades descritas, en la Figura 1 se observa su ubicación dentro del Lago. Para fines prácticos serán llamados en el presente informe, como sigue:

Zona 1 (1)
Zona 2 (2)
Zona 3 (3)
Zona 4 Sur (4S)

Zona 4 Norte (4N)
Zona 5 (5)

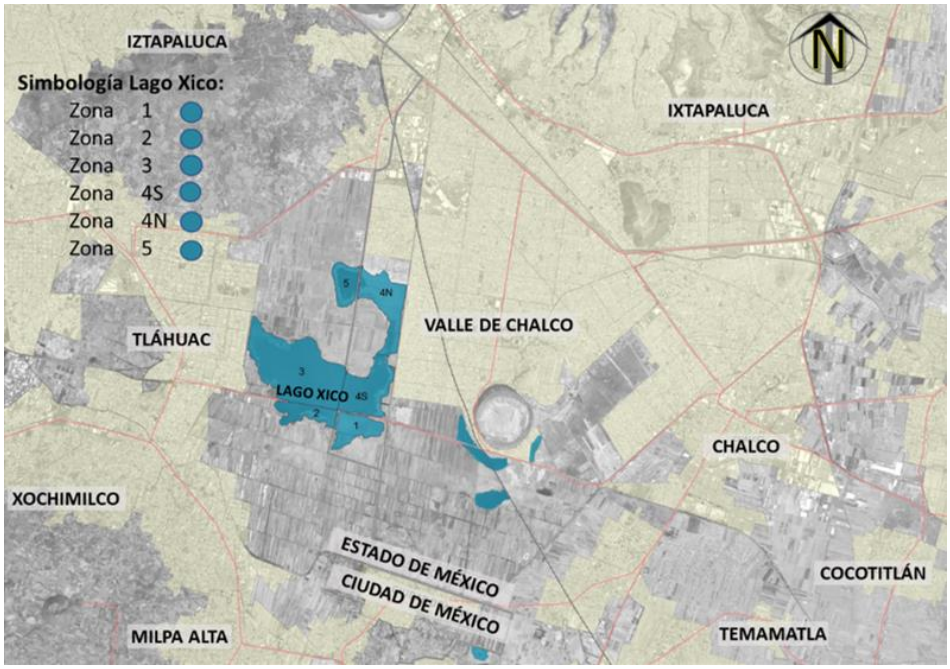


Figura 1. Ubicación y zonas del Lago Tláhuac–Xico y Zonas

Este Lago se localiza en la subcuenca de Chalco, así mismo, fue parte de un gran sistema lacustre modificado desde tiempos prehispánicos. Paulatinamente fue desecado en los siglos XIX y XX, quedando sólo canales y un cuerpo de agua muy reducido cerca del volcán Xico.

Fisiográficamente la subcuenca de Chalco se encuentra limitada por los siguientes rasgos fisiográficos: al este por la Sierra Nevada; al poniente por los cerros La Caldera, Xico y Dos Cerros; al norte por las estribaciones de la Sierra Nevada, cerro Pino y cerro La Caldera; al sur por los cerros Dos Cerros, Xoyocán y Volcán Popocatépetl. En la Figura 2 se muestra la delimitación subcuenca de Chalco en donde se localiza la zona de interés.

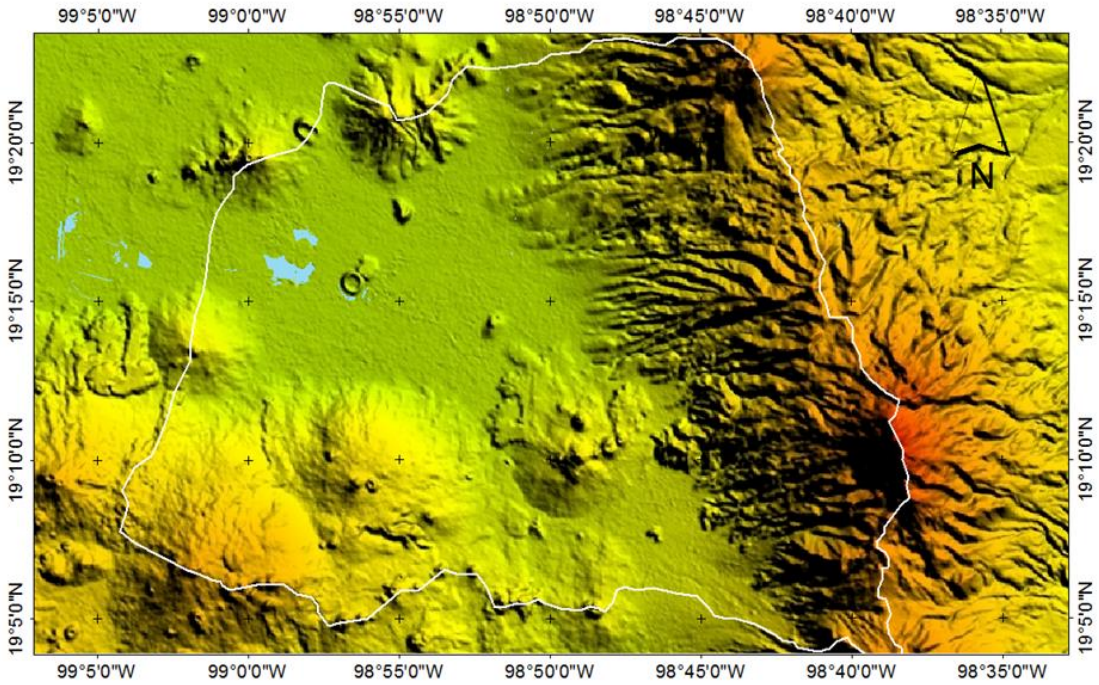


Figura 2. Delimitación morfológica de la subcuenca Chalco. Fuente: Elaboración propia con información de INEGI, 2013.

1.2 Fisiografía

Propiamente, la zona del Lago Tláhuac-Xico, forma parte del denominado Eje Neovolcánico, un espacio donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos tectónicos desde principios del Terciario, se caracteriza por el predominio de derrames basálticos Cuaternarios, derivados de los numerosos aparatos volcánicos existentes, así como de la presencia de importantes lagos, cuya morfología, orientación y distribución superficial sugieren estar situados en fosas tectónicas, esta es una de las características por la que algunos autores le asigna este último nombre a esta provincia fisiográfica.

Derivado de los procesos geológicos que dieron origen a esta provincia fisiográfica se puede determinar que los materiales que constituyen el subsuelo de esta zona son esencialmente intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares transportados por ríos y arroyos provenientes de las partes topográficamente altas que circularon hacia los valles, cubriendo a dichos materiales, en espesores variables se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto del sedimento de los antiguos lagos (CONAGUA, 2020).

El régimen endorreico de la subcuenca de Chalco y en general del Valle de México, con la consecuente sedimentación lacustre del Pleistoceno-Holoceno se originó como resultado del intenso volcanismo que edificó la Sierra Chichinautzin, erupción que ocurrió hace aproximadamente 600,000 años, bloqueando lo que antes fue un drenaje hacia el sur y cerrando definitivamente la cuenca, dejando el área del Valle de México sin drenaje al exterior incluyendo la subcuenca de Chalco, generando la acumulación de agua en la parte central del valle, condiciones que favorecieron y dieron origen a la formación de los lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco, Tláhuac y Chalco, delimitados por las montañas que

circundan la Cuenca de México, de origen volcánico destacándose la Sierra Nevada que se encuentra hacia el este y la Sierra Chichinautzin, en el sur.

En términos generales se puede establecer que la actividad volcánica dentro de esta provincia ha dado lugar a un gran número de cuencas endorreicas y el consecuente desarrollo de lagos, lo que le da al paisaje geomorfológico una apariencia muy característica.

1.3 Geomorfología

Los procesos geomorfológicos ocurridos dentro de la subcuenca de Chalco han modificado considerablemente el relieve superficial original del mismo; de esta forma, la morfología de esta subcuenca es variada. En ella, se presentan diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, además de extensos derrames basálticos, sobre los que se han originado algunos lagos, debido, en términos generales al cierre de la cuenca del Valle de México.

La presencia de las sierras perimetrales es uno de los aspectos físicos que caracterizan y limitan a la cuenca de Chalco; sin embargo, en su interior el relieve es básicamente suave, dominando las llanuras lacustres con altitudes promedio de 2,230 msnm, ubicadas en la porción noroccidental de la subcuenca, que solo se ve interrumpida por la presencia de algunas elevaciones topográficas, de relativa altura, entre las que destacan en su porción central el cerro de Xico.

Históricamente, se ha señalado, que las aguas formaron un enorme lago, del que se separaban otros menores: Zumpango, Xaltocan, San Cristóbal, Chalco y Xochimilco, hasta alcanzar los 10 m de profundidad, pero cuyo volumen mermaba por la evaporación, la infiltración y la transpiración de las plantas.

Por su parte, se señala que el lago de Chalco recibía agua constante, procedente de los deshielos de los volcanes nevados y el de Xochimilco se nutría de manantiales de la misma cuenca; mientras que el lago de Texcoco captaba corrientes de carácter torrencial provenientes del Cerro Tláloc, ubicado al norte de la Sierra Nevada.

2.1.1 Características Morfológicas de la cuenca

Las características morfológicas de la subcuenca, a través del modelo digital de elevación (Figura 30). Muestran que la zona de estudio se presenta básicamente en la zona de planicies; con valores de pendientes de 0° a 4°, y altitudes medias entre 2,260 a 2,300 msnm. Un 39% del área es de piedemontes. Estos se distinguen principalmente por presentar un origen exógeno acumulativo (denudatorio y tectonizado) del Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno), y estar compuestos de lavas, tobas, cenizas y depósitos epiclásticos y piroclásticos de flujo; algunos de ellos presentan forma de abanico con una composición de basalto y basalto-andesítica. Estos piedemontes se localizan al noreste, centro noroeste y sur de la subcuenca de Chalco.

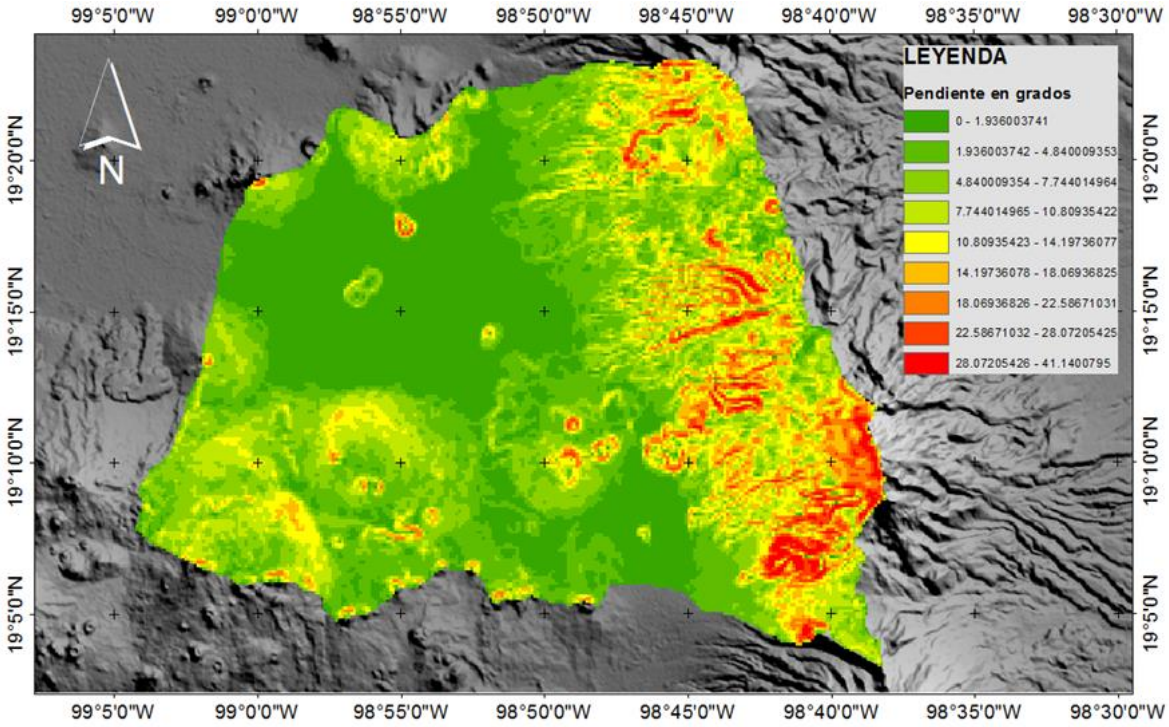


Figura 3. Características morfológicas de la zona, elaboración propia con base en MDE, INEGI (2013)

La zona de estudio está rodeada al sur por el Eje Neovolcánico, donde se encuentran los volcanes Teuhtli, Tláloc y Chichinautzin (entre otros), al este por los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl y al norte por la sierra de Santa Catarina. En la Figura 4 se muestra el Modelo Digital de Superficie de alta resolución (INEGI, 2013) con las elevaciones de la zona de estudio. En la zona se registran lluvias medias anuales del orden de los 500 mm a los 1200 mm. Alrededor del lago se reconoce un clima templado, hacia la sierra de Santa Catarina y al norte un clima semiárido; hacia los volcanes del sur y del este un clima semifrío. En la Figura 5 se muestra la clasificación de climas en la zona de estudio según el sistema Köppen-García adaptado para México (García-CONABIO, 1998) y las isoyetas de precipitación media anual estimadas a partir de la información disponible en las estaciones climatológicas de la región.

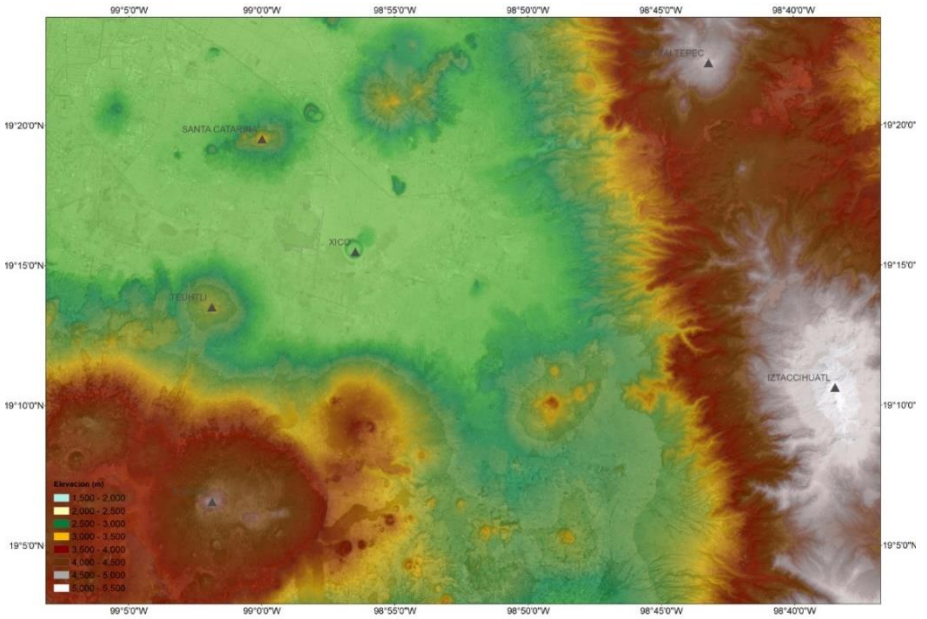


Figura 4. Topografía de la zona de estudio

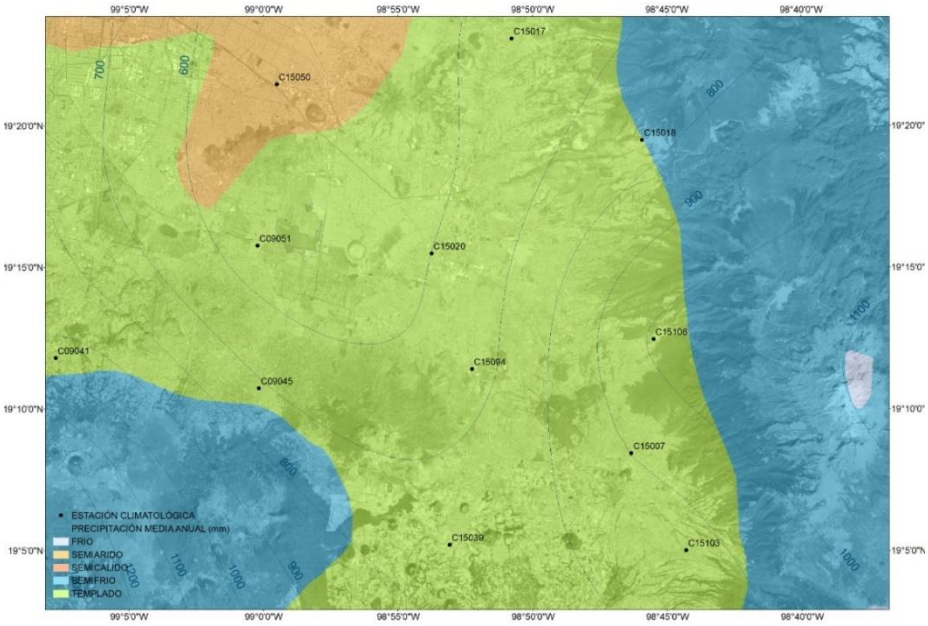


Figura 5. Clasificación de climas de la zona de estudio e isoyetas

La superficie de la zona de estudio está conformada por suelos de textura fina y media alrededor del lago y de textura gruesa hacia la sierra de Santa Catarina y hacia el municipio de Amecameca. La mayoría de la superficie está ocupada por asentamientos humanos y suelos agrícolas.

En la Figura 6 se muestra la clasificación de texturas asignadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía a los suelos de la zona y su clasificación por la Base Referencial Mundial (WRB) para el uso del recurso (INIFAP-CONABIO, 1995; INEGI, 2004).

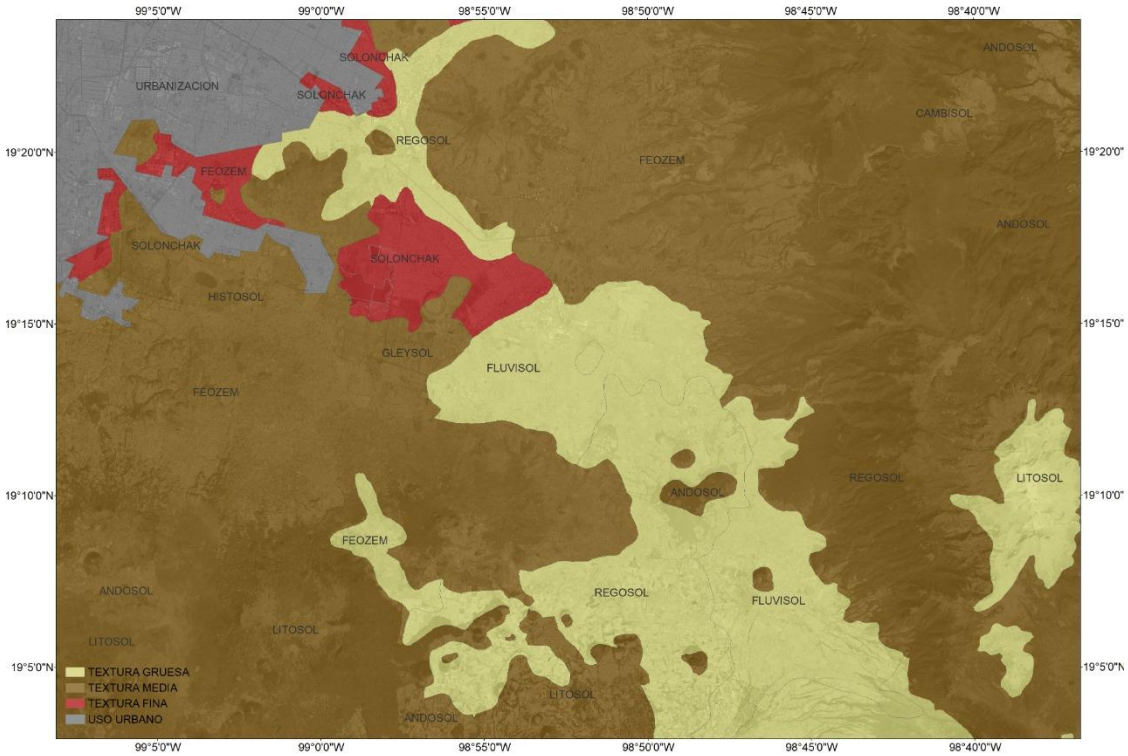


Figura 6. Texturas asignadas a los suelos de la zona de estudio

En la Figura 7 se muestra una clasificación simplificada del mapa de cobertura del suelo elaborado por la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CEC, 2015).

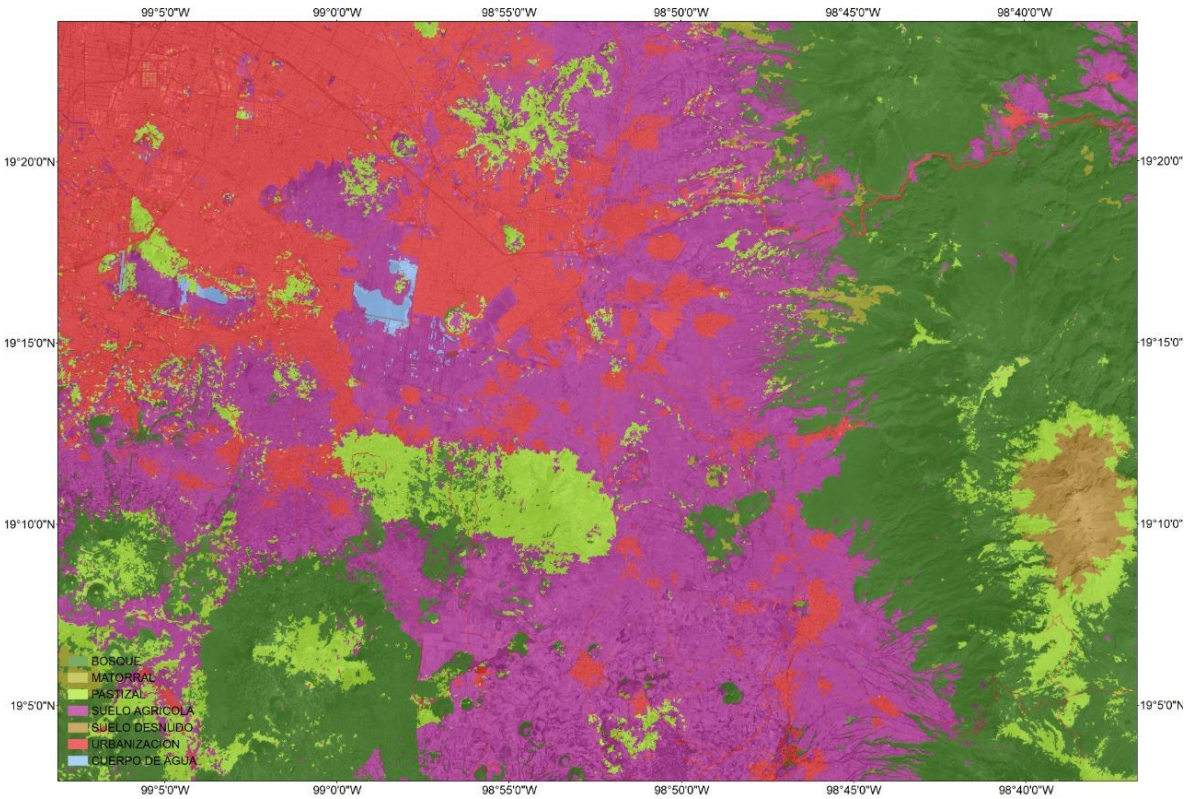


Figura 7. Cobertura vegetal en la zona de estudio

Capítulo 2
Componente: Colectores/Fuentes y Profundización

Colectores/Fuentes y Profundización

El objetivo del primer componente Colectores/Fuentes fue el establecer las posibles fuentes de las cuales podría utilizarse agua considerando la disponibilidad administrativa y física, así como la viabilidad de ser llevada a alguna zona del Lago. Sobre el componente Profundización, su propósito fue el de evaluar las alternativas para incrementar la capacidad y almacenamiento del Lago Tláhuac-Xico para brindar las condiciones para que el agua que contenga sea aprovechada en cantidad y calidad como fuente de suministro.

2.1 Sistema Hidrogeológico Tláhuac-Xico

Para los fines del presente documento se determinó como sistema hidrogeológico Tláhuac Xico al conjunto de corrientes de agua superficial, sistemas de drenaje e infraestructura hidráulica que pueden descargar en el cuerpo del lago denominado Tláhuac Xico o exportar las aguas hacia la cuenca de Xochimilco y de la Ciudad de México. También, al acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México; en el que, de acuerdo con la delimitación administrativa, se localiza el sistema de pozos Mixquic-Santa Catarina.

Se consideraron los aspectos fisiográficos, de uso de suelo, hidrológicos, geológicos, morfológicos, de drenaje e infraestructura, poblacionales, entre otros, para la realización de análisis para estimar el balance hídrico en la zona.

2.2 Cuenca Hidrográfica

El Lago denominado Tláhuac Xico surge en las últimas dos décadas, en la planicie lacustre de Chalco, debido a los hundimientos diferenciales del terreno provocados por la sobreexplotación del acuífero subyacente, a través del bombeo en el sistema de pozos Mixquic – Santa Catarina (Ortiz y Ortega, 2007).

La cuenca hidrográfica de este lago es parte de lo que antiguamente fue la cuenca endorreica del lago de Chalco. Sin embargo, actualmente por el crecimiento urbano y el desarrollo de sistemas de drenaje pluvial y sanitario, gran parte de los escurrimientos que se generan son exportados hacia otras cuencas. En la Figura 8 se muestra la red hidrográfica de la zona de estudio resaltando las principales corrientes de agua superficial.

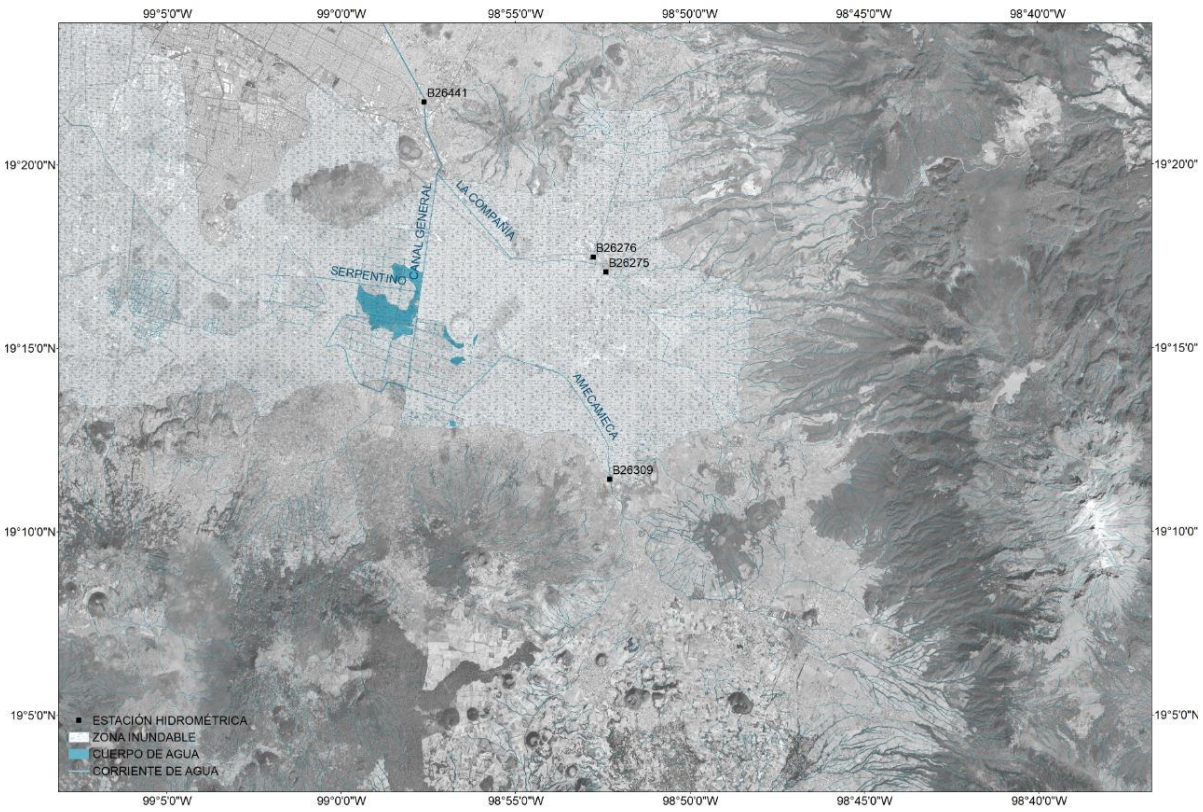


Figura 8. Hidrografía de la zona de estudio

Debido al gran número de plantas de bombeo y plantas de tratamiento del sistema de drenaje de las localidades cercanas al lago, que regulan y direccionan los escurrimientos, y al gran número de parcelas agrícolas alrededor del lago, se identificaron 21 cuencas hidrográficas como se muestran en la Figura 9.

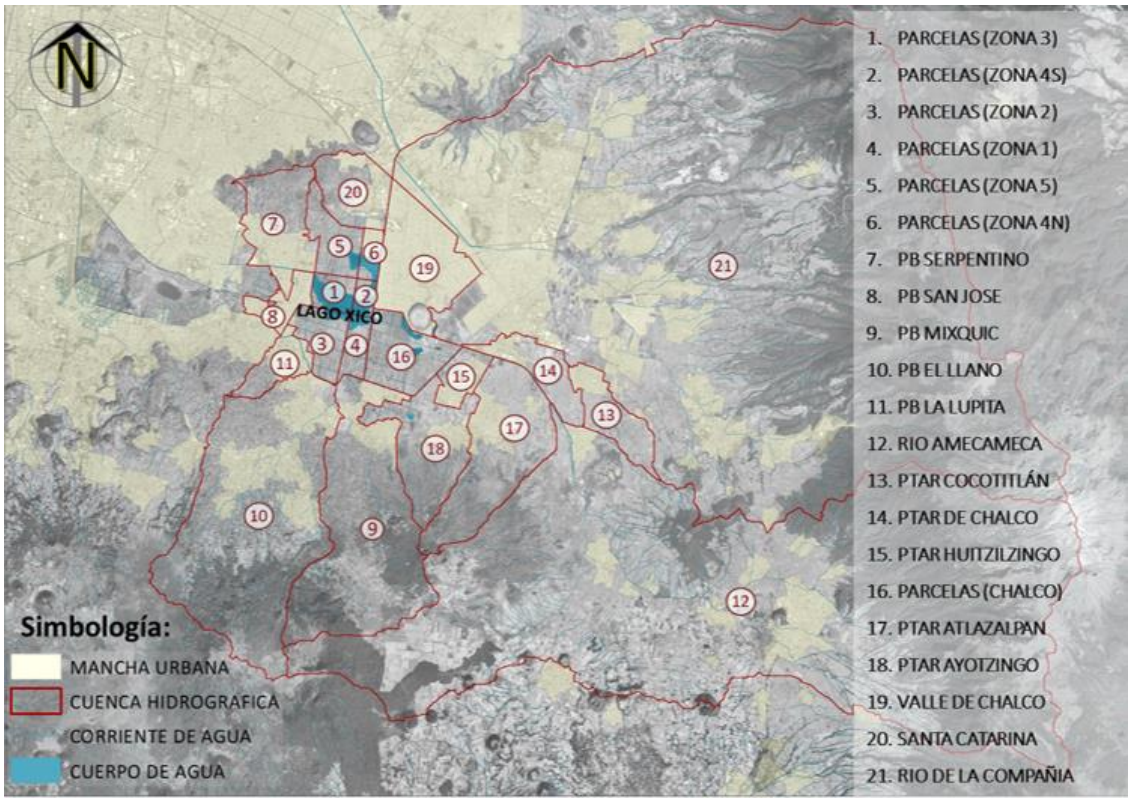


Figura 9. Cuencas hidrográficas del sistema Tláhuac-Xico

2.3 Zona Hidrogeológica

El Lago Tláhuac–Xico se asienta sobre sedimentos lacustres (acuitardo), de hasta 300 m de espesor (Ortiz y Ortega, 2007), que forman parte de la Zona Hidrogeológica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (INEGI, 2010). Sobre estos sedimentos subyace un acuífero aluvial semiconfinado de material granular de más de 800 m de profundidad (Durazo, 1996). En la Figura 10 se muestran los límites de la Zona Hidrogeológica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México que abarcan la zona de estudio. Dentro de estos límites se identifican las zonas de recarga potencial y se aproxima la extensión del acuitardo (INEGI, 2010).

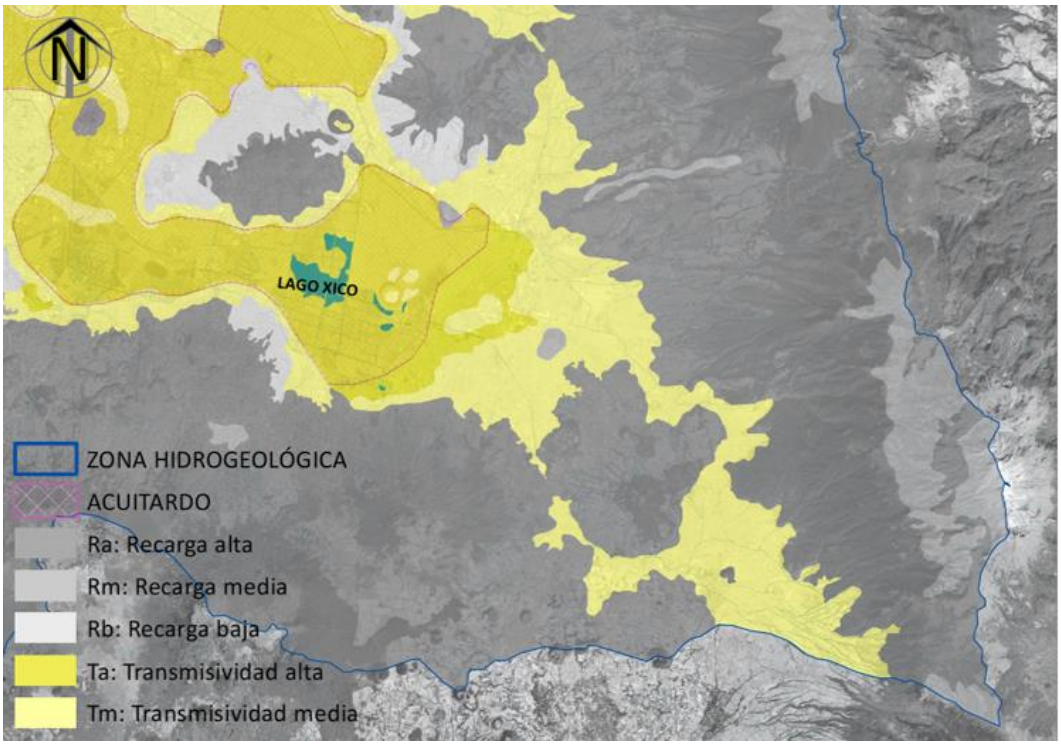


Figura 10. Zona hidrogeológica del sistema Tláhuac–Xico.

2.4 Infraestructura hidráulica

Alrededor del Lago se ubican una serie de plantas de bombeo y plantas de tratamiento que regulan el flujo y la distribución de aguas pluviales, residuales y tratadas para el uso agrícola y la prevención de inundaciones. En conjunto con los gobiernos municipales, éstas son administradas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y la Comisión de Aguas del Estado de México (CAEM), en la Figura 11 se observa dicha infraestructura. Esta infraestructura fue considerada para el planteamiento de las alternativas relativas al componente Colectores/Fuentes.

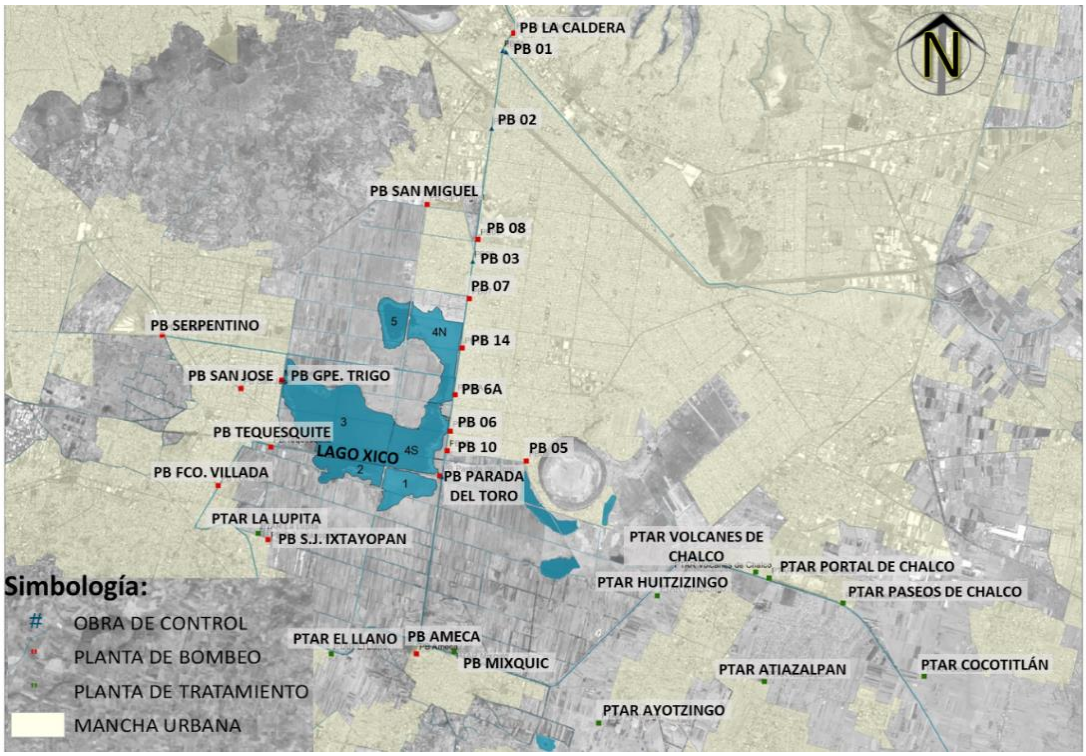


Figura 11. Esquema Infraestructura hidráulica alrededor del Lago Tláhuac-Xico

Es importante destacar que existen proyectos en la región por parte del Sistema de Aguas SACMEX que aun pueden desarrollarse en la región. Estos proyectos deberán ser considerados en el proyecto ejecutivo. Los proyectos se muestran en la figura 14. En la siguiente tabla se muestra la relación de sitios y problemática presentada para el saneamiento del área circundante a las lagunas de Tláhuac Xico.

Tabla 1. Relación de sitios y problemática presentada para el saneamiento del área circundante a las lagunas de Tláhuac Xico

No	SITIO	PROBLEMÁTICA	OBRAS NECESARIAS
1	Riachuelo Serpentino y Estanislao Ramírez Ruiz, col Selene.	Inundaciones en temporada de lluvias en la zona urbana de las colonias San José y Ampliación Selene. Las aguas residuales se bombean hacia la laguna 3.	Reequipamiento de la P.B. Riachuelo Serpentino
			Proyecto de Colector perimetral 1.83 m, Av. Reforma Agraria-Rafael Castillo–Riachuelo Serpentino y descarga a la Lumbrera 2 del Semiprofundo Canal General, 5.2 km
			Captar Colector Estanislao Ramírez de 1.52 m
			Captar Colector Agustín Lara de 1.22 m
2	Canal General y Ejidos de Tulyehualco, Mixquic, San Juan Ixtayopan y Tláhuac.	Desborde del Canal General hacia la carretera Tláhuac Chalco y zonas de producción agrícola de la Alcaldía	Desazolvar 7 Km del Canal General, desde el Canal Ameca hasta la P.B. 3.

No	SITIO	PROBLEMÁTICA	OBRAS NECESARIAS
		Tláhuac. Circulación de aguas residuales en los canales de los ejidos.	Retiro de estructura de control obsoleta del Canal General, a la altura de la Carretera Tláhuac Chalco
			Reforzamiento de bordo lado poniente del Canal General, 3 km, entre el Canal Ameca y la Carretera Tláhuac Chalco.
			Rehabilitar vertedores (estructuras de Control) de los canales secundarios, perpendiculares al Canal General, que sirvieron para riego, 5 estructuras.
3	Río Amecameca		Rehabilitar y operar las 11 PTAR construidas para tratar las aguas residuales de las comunidades ubicadas alrededor del Río Ameca, para saneamiento
4	Canal La Lupita a la altura de la Calle Miguel Negrete, col. La Lupita	Afectaciones por inundación con aguas residuales de los asentamientos humanos es San Juan Ixtayopan Falta de agua para tratar en la PTAR "El Llano"	Construcción de la P.B. La Lupita
5	Río Amecameca a la altura de la calle Gladiola, col. Jardines del Llano, Ejido de San Juan Ixtayopan	Falta de agua para tratar en la PTAR "El Llano". Riego y circulación de agua residuales en San Juan Ixtayopan	Rehabilitar colector Vicente Guerrero y compuertas de control
6	Colector Ameca	Desborde del colector Ameca y afectaciones con aguas residuales en el Llano de Tecómitl	Instalación de compuertas faltantes en caja de control a la altura de la tabla El Llano de Tecómitl
7	Canal General a la altura de la Colonia Américas II, Valle de Chalco	Desborde del Canal General hacia la Laguna 4N y ejidos de la Alcaldía Tláhuac.	Desazolvar Canal General, rehabilitar vertedores de los canales secundarios, reforzar bordos márgenes derecha e izquierda, 4 km. Obra de toma del Canal General hacia el túnel Semiprofundo Canal General.
8	Calle Laurel, col. Ampliación Santa Catarina.	Desalojo de las aguas residuales de Santa Catarina Yecahuizotl hacia el Canal General	Mantenimiento a la P.B. Santa Catarina
9	Ejido de San Juan Ixtayopan	Agua para riego de las tablas de San Juan Ixtayopan	Rehabilitar colector de alimentación a la PTAR La Lupita, rehabilitación de la planta.
10	Camino de los Pozos	Sobreelevación del nivel de agua en las lagunas 3, 4S, 4N con afectación a los pozos del Ramal Mixquic-Santa Catarina.	Rehabilitar y mejorar las condiciones del Rebombeo de las Bombas Tornillo ubicadas atrás del Paso del Toro.
	Zona Chinampera de San Nicolás Tetelco	Falta de agua para riego en la zona chinampera	Rehabilitar la PTAR Tetelco
	Paraje Axolocalco	Afectaciones por aguas residuales del Canal Amecameca	Desazolvar canal Amecameca 4.0 km desde el Reclusorio hasta el Canal General.

2.5 Balance Hídrico

2.5.1 Esquema Hidrológico

Con el fin de conocer la disponibilidad de agua superficial se estimó el balance hídrico del sistema hidrogeológico Tláhuac – Xico en condiciones actuales. Por lo que, con la información disponible, se estimaron los posibles ingresos al Lago, extracciones, pérdidas en el mismo por evapotranspiración y las variaciones en el almacenamiento del Lago a largo plazo.

Considerando las 21 cuencas identificadas en secciones previas, se desarrolló un esquema hidrológico y su interacción con la infraestructura hidráulica de la zona descrita (Figura 12), a través de corrientes de agua superficial y colectores representados por diagramas unifilares, hasta su descarga en el Lago o su exportación hacia otras cuencas.

El esquema se discretizó en 6 subsistemas: (1) Tláhuac, que comprende las cuencas de las plantas de bombeo San José y Serpentino; (2) Cerro de la Estrella, que comprende la distribución por parte las plantas de bombeo Tequesquite y Parada del Toro de las aguas tratadas provenientes de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella; (3) Milpa Alta, que comprende las cuencas de las plantas de Tratamiento La Lupita, El Llano y Mixquic; (4) Amecameca, que comprende la cuenca del Río Amecameca y su conexión con el Canal General; (5) Canal General, que comprende las cuencas de Valle de Chalco, de la sierra de Santa Catarina y del Río de la Compañía y (6) Lago, que comprende las cuencas de las parcelas agrícolas alrededor del lago.

Para el desarrollo del balance fue necesario estimar los escurrimientos superficiales (pluvial, residual y tratada) y la recarga potencial al acuífero de las 21 cuencas hidrográficas del sistema. También los escurrimientos en las corrientes y colectores de los 6 subsistemas. En las siguientes secciones, se describen los métodos utilizados para estimar con la información de precipitación disponible y de caudal, dichos escurrimientos.

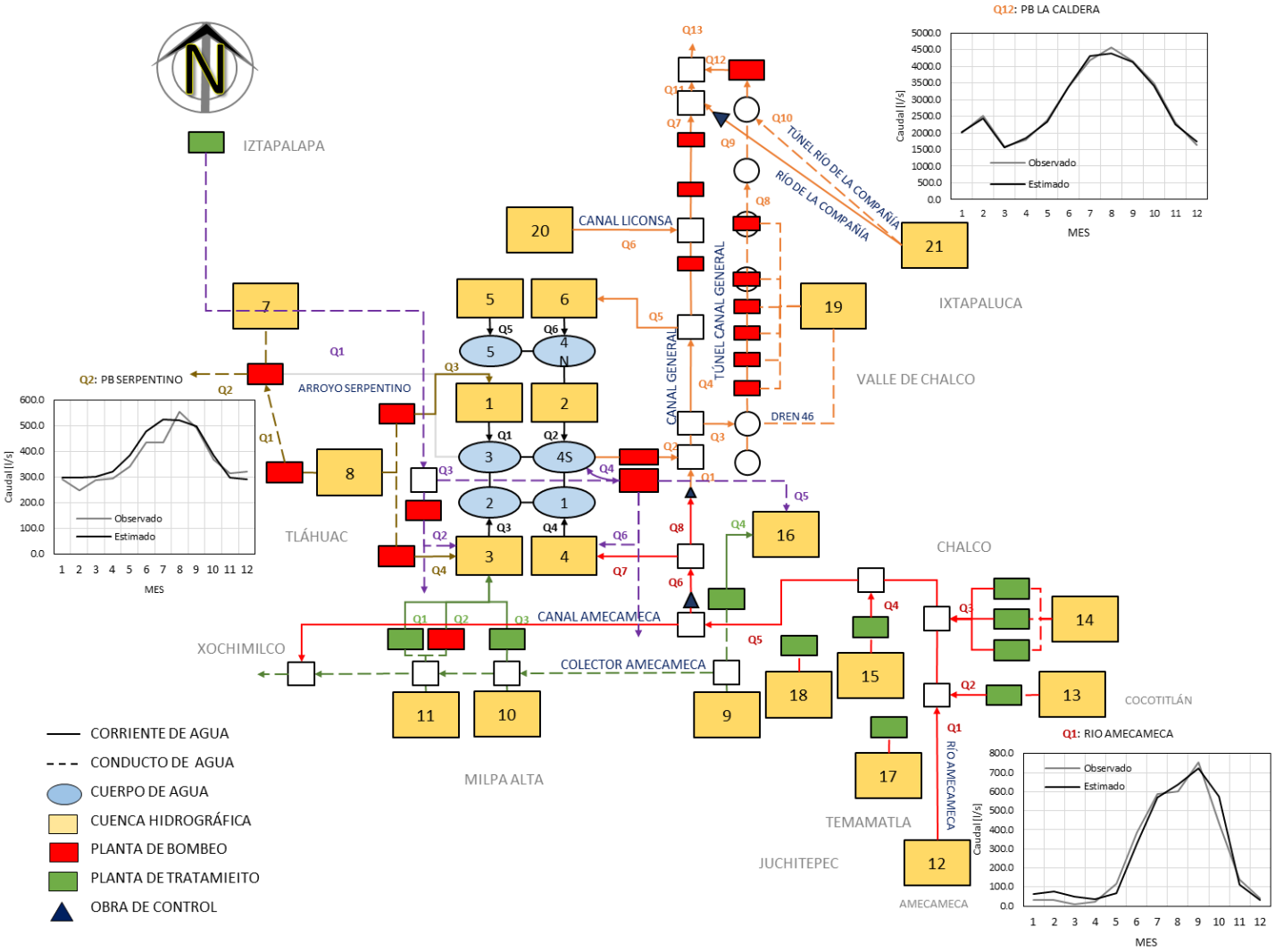
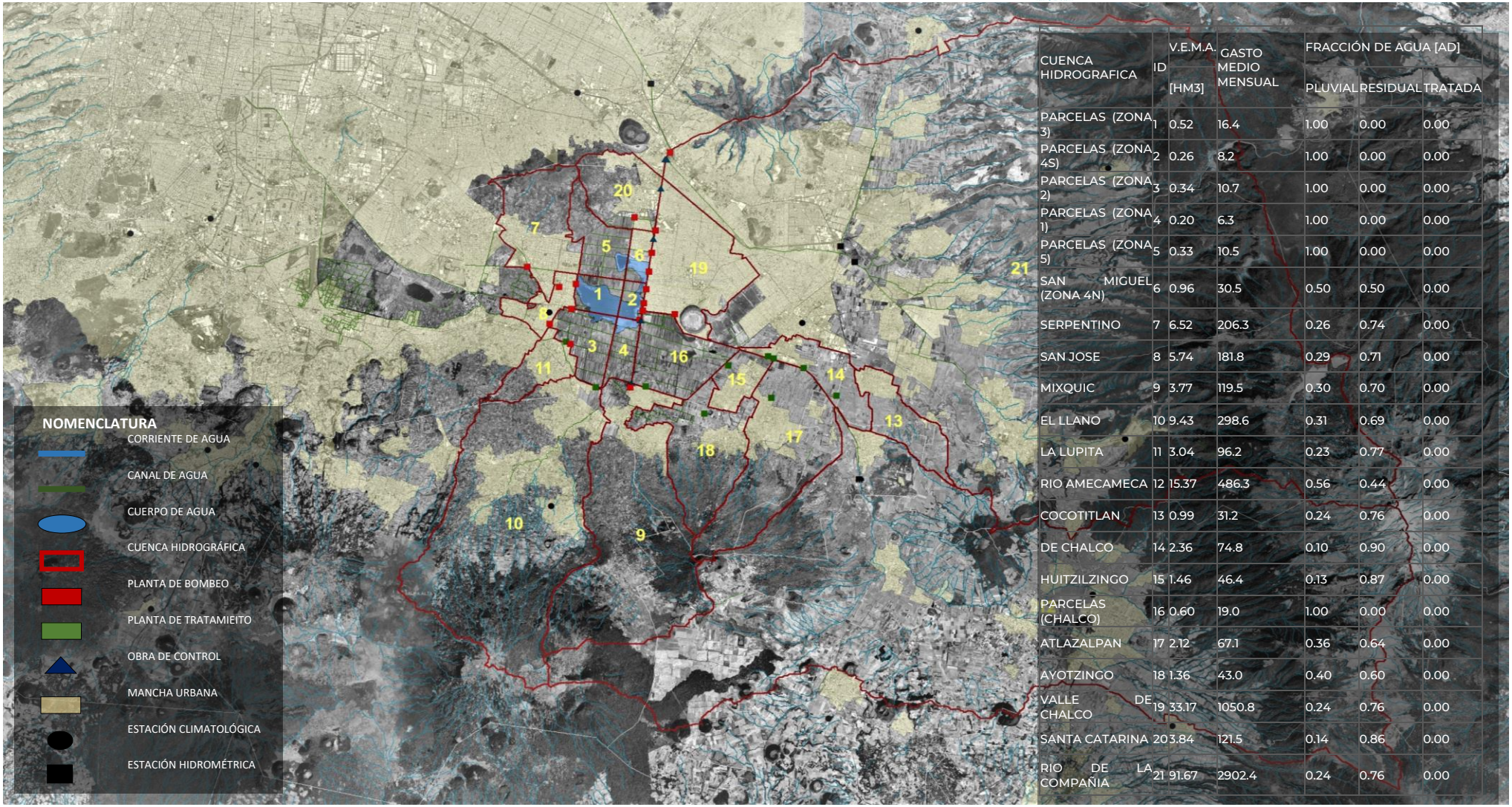


Figura 12. Esquema hidrológico del sistema Tláhuac Xico.



CUENCA HIDROGRAFICA	ID	V.E.M.A. [HM3]	GASTO MEDIO MENSUAL	FRACCIÓN DE AGUA [AD]		
				PLUVIAL	RESIDUAL	TRATADA
PARCELAS (ZONA 3)	1	0.52	16.4	1.00	0.00	0.00
PARCELAS (ZONA 4S)	2	0.26	8.2	1.00	0.00	0.00
PARCELAS (ZONA 2)	3	0.34	10.7	1.00	0.00	0.00
PARCELAS (ZONA 1)	4	0.20	6.3	1.00	0.00	0.00
PARCELAS (ZONA 5)	5	0.33	10.5	1.00	0.00	0.00
SAN MIGUEL (ZONA 4N)	6	0.96	30.5	0.50	0.50	0.00
SERPENTINO	7	6.52	206.3	0.26	0.74	0.00
SAN JOSE	8	5.74	181.8	0.29	0.71	0.00
MIXQUIC	9	3.77	119.5	0.30	0.70	0.00
EL LLANO	10	9.43	298.6	0.31	0.69	0.00
LA LUPITA	11	3.04	96.2	0.23	0.77	0.00
RIO AMECAMECA	12	15.37	486.3	0.56	0.44	0.00
COCOTITLAN	13	0.99	31.2	0.24	0.76	0.00
DE CHALCO	14	2.36	74.8	0.10	0.90	0.00
HUITZILZINGO	15	1.46	46.4	0.13	0.87	0.00
PARCELAS (CHALCO)	16	0.60	19.0	1.00	0.00	0.00
ATLAZALPAN	17	2.12	67.1	0.36	0.64	0.00
AYOTZINGO	18	1.36	43.0	0.40	0.60	0.00
VALLE DE CHALCO	19	33.17	1050.8	0.24	0.76	0.00
SANTA CATARINA	20	3.84	121.5	0.14	0.86	0.00
RIO DE LA COMPAÑIA	21	91.67	2902.4	0.24	0.76	0.00

Figura 13. Esquema hidrológico del sistema Tláhuac Xico.

OBRAS PROPUESTAS

	OBRA
a)	Proyecto de Colector perimetral 1.83 m, Av. Reforma Agraria-Rafael Castillo–Riachuelo Serpentino y descarga a la Lumbrera 2 del Semiprofundo Canal General, 5.2 km
b)	Captación del Canal General a L-2
	Captar Colector Estanislao Ramírez de 1.52 m
	Captar Colector Agustín Lara de 1.22 m
d)	Retiro de Estructuras de control a la altura de la carretera Tláhuac Chalco
e)	Construcción de PB La Lupita
f)	Reforzamiento de Bordo del Canal General 3 km
g)	Desazolve del Canal General, 3 km
h)	Saneamiento del Canal Ameca
i)	Rehabilitación Colector Ameca y Compuerta
j)	Rehabilitación Colector Vicente Guerrero y Compuerta
	Reequipamiento de la P.B. Riachuelo Serpentino
	Mantenimiento a la P.B. Santa Catarina
	Instalación de compuertas faltantes en caja de control a la altura de la tabla El Llano de Tecómitl

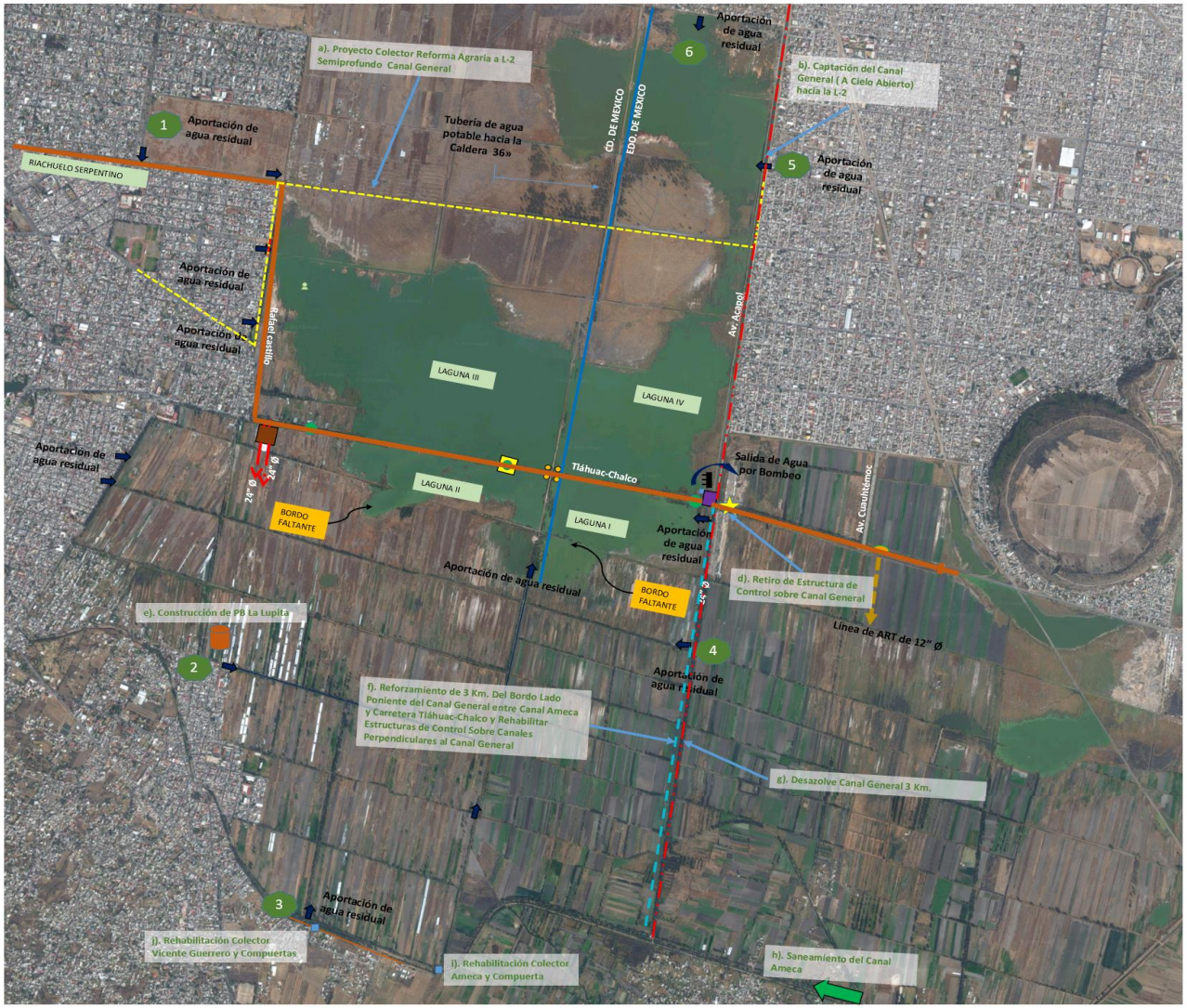


Figura 14. Esquema de proyectos en la alcaldía Tláhuac.

2.5.1.1 Precipitación

Con la información disponible en el Sistema de Información Hidrológica (SIH), de la Subdirección General Técnica (SGT) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019), se reconstruyeron las series de precipitaciones diarias, de 11 estaciones climatológicas en la zona de estudio, para el período del 1961 al 2017. Con estas series se estimaron las precipitaciones medias diarias en las 21 cuencas hidrográficas del sistema. En las Tabla 2 y Tabla 3 se muestra la precipitación estimada por cada cuenca y zona del lago.

Tabla 2. Precipitación por cuenca hidrográfica

Cuenca	V.M.A	Caudal Medio Mensual L/s											
	hm³	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.85	4.7	5.5	6.0	11.9	29.5	54.9	62.5	61.5	54.2	23.9	4.3	3.0
2	0.57	3.1	3.7	4.0	8.0	19.8	36.7	41.8	41.1	36.3	16.0	2.9	2.0
3	3.60	19.8	23.3	25.6	50.4	125.2	232.7	264.9	260.6	229.9	101.2	18.4	12.7
4	1.75	9.6	11.3	12.4	24.5	60.8	113.0	128.6	126.5	111.6	49.1	8.9	6.2
5	3.90	21.5	24.8	28.4	55.6	134.0	252.1	287.8	281.6	248.0	109.7	20.3	13.4
6	0.93	5.1	6.0	6.6	13.0	32.2	59.9	68.2	67.0	59.1	26.0	4.7	3.3
7	8.83	49.2	54.6	67.4	131.0	295.7	571.4	656.7	635.7	557.1	249.0	47.6	28.8
8	2.54	13.9	16.4	18.0	35.5	88.2	163.9	186.6	183.5	161.9	71.3	12.9	9.0
9	38.32	228.5	204.8	316.1	630.6	1163.4	2522.7	2684.1	2803.8	2463.6	1068.8	294.4	143.5
10	55.72	329.7	295.5	459.7	917.7	1691.6	3668.6	3902.4	4079.8	3585.5	1555.5	428.4	206.6
11	3.51	19.2	22.7	25.0	49.2	122.0	226.8	258.2	253.9	224.0	98.6	17.9	12.4
12	282.67	2019.5	1635.7	2204.5	4485.2	9342.5	19105.1	19079.9	19731.3	18090.7	8013.8	2199.5	1262.4
13	6.15	38.1	33.3	49.9	104.4	199.0	413.5	444.8	450.4	386.8	159.8	32.6	20.0
14	5.57	31.5	27.1	43.4	86.8	172.8	373.0	427.4	413.8	340.2	147.2	27.3	18.6
15	2.98	16.2	13.8	22.8	44.7	90.8	199.4	234.4	222.9	179.9	79.4	14.1	10.1
16	6.86	37.4	38.1	50.7	99.6	224.0	451.4	522.3	505.0	426.3	187.9	33.8	23.7
17	18.87	115.1	100.4	152.2	316.0	604.6	1265.8	1373.6	1383.9	1182.1	492.7	101.1	62.0
18	12.99	76.8	67.2	105.2	212.6	402.0	864.5	942.6	956.0	818.9	351.0	82.4	45.4
19	12.60	68.9	65.4	95.7	187.5	398.9	833.9	972.2	931.4	773.6	342.3	62.2	42.4
20	6.07	34.7	35.0	51.4	98.2	191.3	394.2	459.9	434.3	376.4	172.3	35.6	17.2
21	386.31	2288.7	2050.8	3260.0	6296.1	12854.6	26611.1	27108.6	27434.0	23584.4	10972.5	2451.7	1498.9

Tabla 3. Precipitación por cuenca hidrográfica

Zona	V.M.A	Caudal Medio Mensual L/s											
	hm³	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
3	0.65	3.7	4.0	4.5	8.6	22.5	42.6	48.3	48.1	42.2	18.7	2.9	2.2
4S	0.26	1.5	1.6	1.8	3.4	9.0	17.0	19.3	19.2	16.8	7.4	1.2	0.9
2	0.11	0.7	0.7	0.8	1.5	3.9	7.4	8.4	8.4	7.4	3.3	0.5	0.4
1	0.11	0.7	0.7	0.8	1.5	3.9	7.4	8.4	8.4	7.4	3.3	0.5	0.4
5	0.11	0.7	0.7	0.8	1.5	3.9	7.4	8.4	8.4	7.4	3.3	0.5	0.4
4N	0.26	1.5	1.6	1.8	3.4	9.0	17.0	19.3	19.2	16.8	7.4	1.2	0.9
TOTAL	1.52	8.7	9.2	10.4	20.0	52.2	98.9	112.1	111.6	97.9	43.3	6.7	5.1

2.5.1.2 Escurrimiento superficial

A partir de las series de precipitaciones medias diarias y aplicando el "Método del número de curva" del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-NRCS, 2004) se estimaron los escurrimientos directos en las 21 cuencas del sistema (Tabla 4). Los números de curva se determinaron a partir de la información de textura del suelo y la cobertura vegetal en la zona de estudio descrita en secciones previas. Los valores de Abstracción inicial se calibraron para las cuencas rurales o mayormente rurales, con los registros de caudales en la estación hidrométrica B26309 sobre el río Amecameca.

Tabla 4. Escurrimiento directo por cuenca hidrográfica

Cuenca	V.M.A.	Caudal Medio Mensual L/s											
	hm³	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.12	0.6	0.4	0.5	1.0	2.9	5.7	9.5	9.8	9.7	5.5	0.7	0.4
2	0.08	0.4	0.3	0.3	0.7	2.0	3.9	6.4	6.6	6.5	3.7	0.5	0.3
3	0.26	1.4	0.6	0.7	1.7	5.0	9.9	20.0	20.7	21.8	13.8	1.8	0.8
4	0.13	0.7	0.3	0.3	0.8	2.5	4.8	9.8	10.1	10.7	6.7	0.9	0.4
5	0.30	1.5	0.8	0.9	2.1	6.2	12.1	23.7	24.2	25.3	15.6	2.0	0.9
6	0.28	1.6	1.3	1.6	3.0	8.5	16.3	20.7	21.0	19.0	9.1	1.2	0.9
7	1.72	9.2	7.5	9.6	17.8	49.7	99.7	131.9	130.8	121.1	59.3	8.1	5.2
8	1.65	9.4	10.0	11.2	21.6	56.5	107.0	121.4	120.8	106.0	46.9	7.3	5.5
9	1.14	5.7	3.9	5.2	6.5	10.6	46.2	71.1	81.4	100.0	85.1	15.8	1.8
10	2.92	15.8	10.2	15.3	22.0	37.6	129.0	192.1	219.4	243.5	179.8	35.8	5.4

11	0.69	4.0	3.0	3.6	7.0	20.3	39.1	52.1	53.2	49.0	24.1	3.2	2.3
12	8.63	61.5	77.5	51.4	36.3	66.4	327.4	568.4	639.0	724.4	574.0	113.4	32.0
13	0.24	1.4	1.7	1.5	0.9	3.1	9.2	16.8	19.7	19.3	14.1	1.0	0.4
14	0.23	1.0	0.5	1.0	0.6	3.3	8.2	18.5	20.6	19.0	12.9	0.7	0.3
15	0.19	0.7	0.1	0.8	0.7	3.0	7.8	16.3	17.0	15.0	9.1	0.5	0.2
16	0.60	2.7	1.1	2.3	3.7	11.6	26.1	49.1	50.5	47.8	28.3	2.9	1.4
17	0.76	4.6	5.7	4.6	3.0	10.1	29.1	52.9	63.7	63.1	45.5	3.4	1.3
18	0.54	2.8	2.4	2.8	2.7	6.7	21.4	37.5	43.4	45.2	33.4	4.3	0.8
19	7.91	43.3	37.6	58.0	108.2	240.0	533.9	621.7	596.5	487.6	215.5	31.5	23.9
20	0.52	1.9	1.5	3.2	4.5	11.4	28.6	43.5	38.5	39.1	20.7	2.9	1.0
21	21.59	78.8	29.3	82.6	119.8	364.6	1119.9	1736.1	1828.9	1601.8	1049.4	108.5	46.0

Adicional a la escorrentía directa producida por la precipitación en las zonas urbanas se generan volúmenes de agua residual; los cuales se estimaron según se recomienda en el "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento" (MAPAS) (CONAGUA, 2015), como un porcentaje de la dotación de agua. Este porcentaje se estimó del 80% con base en los registros de caudales de las plantas de bombeo San José y Serpentino en la Alcaldía de Tláhuac. En la Tabla 5 se muestran los volúmenes de agua residual estimados por cuenca.

Tabla 5. Agua residual por cuenca hidrográfica

Cuenca	Población	Dotación	Retorno	V.M.A.	Caudal
	habte	L/hab.d	ad	hm^3	L/s
1	0	0	0	0.00	0.0
2	0	0	0	0.00	0.0
3	0	0	0	0.00	0.0
4	0	0	0	0.00	0.0
5	0	0	0	0.00	0.0
6	6574	250	0.8	0.48	15.2
7	65741	250	0.8	4.80	152.2
8	56087	250	0.8	4.09	129.8
9	36034	250	0.8	2.63	83.4
10	89176	250	0.8	6.51	206.4
11	32170	250	0.8	2.35	74.5
12	92291	250	0.8	6.74	213.6
13	10290	250	0.8	0.75	23.8
14	29181	250	0.8	2.13	67.5

15	17470	250	0.8	1.28	40.4
16	0	0	0	0.00	0.0
17	18656	250	0.8	1.36	43.2
18	11267	250	0.8	0.82	26.1
19	346021	250	0.8	25.26	801.0
20	45415	250	0.8	3.32	105.1
21	959880	250	0.8	70.07	2221.9

2.5.1.3 Recarga potencial

Con la aplicación del "Método del número de curva" (USDA-NRCS, 2004) se estimó la infiltración diaria en cada cuenca. De esta infiltración, se asume que el 50% es retenido para satisfacer la evapotranspiración potencial y el otro 50% es recarga potencial al acuífero. En la Tabla 6 se muestra la recarga potencial en las 21 cuencas del sistema.

Tabla 6. Recarga potencial al acuífero por cuenca hidrográfica

Cuenca	V.M.A. hm³	Caudal Medio Mensual L/s											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.01	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0
4	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.61	3.4	4.1	4.6	9.1	21.6	40.6	44.8	43.7	37.8	16.0	3.1	2.1
6	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	2.13	12.0	14.1	17.3	33.9	73.6	141.2	157.1	151.2	130.5	56.8	11.8	7.0
8	0.02	0.1	0.2	0.2	0.3	0.8	1.4	1.6	1.5	1.3	0.6	0.1	0.1
9	16.46	98.7	88.9	137.7	276.4	510.5	1096.8	1157.3	1205.7	1046.8	435.7	123.4	62.7
10	24.85	147.7	134.3	209.2	421.6	778.4	1665.9	1746.3	1816.9	1572.9	647.5	184.8	94.7
11	1.30	7.0	9.0	9.8	19.4	46.8	86.5	94.9	92.4	80.6	34.3	6.8	4.7
12	105.93	756.9	602.3	832.3	1719.7	3585.7	7258.5	7155.6	7380.1	6712.9	2875.9	806.4	475.6
13	1.54	9.6	8.2	12.6	27.0	51.1	105.5	111.7	112.4	95.9	38.0	8.3	5.1
14	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	4.77	29.1	24.9	38.9	82.4	156.6	325.7	347.8	347.7	294.7	117.8	25.7	16.0
18	3.62	21.5	18.8	29.7	61.0	114.8	244.9	262.9	265.0	224.7	92.2	22.7	13.0
19	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	1.87	11.1	11.3	16.2	31.6	60.6	123.1	140.2	133.3	113.6	51.0	11.0	5.4
21	134.85	817.1	747.4	1174.8	2283.7	4618.2	9425.4	9381.5	9467.5	8128.1	3669.1	866.4	537.2

2.5.1.4 Evapotranspiración

Con la información disponible en el Sistema de Información Hidrológica (SIH), se reconstruyó la serie de evaporaciones diarias en la estación C09051, la más cercana al lago; para el mismo período de 1961 al 2017. A partir de esta serie se estimó el uso consuntivo en las parcelas agrícolas cercanas al lago y la evapotranspiración en el mismo.

Asumiendo que el 50% de la infiltración queda disponible en el suelo para evapotranspiración, en la Tabla 7se estima la demanda de riego de las parcelas agrícolas. Considerando que el lago presenta cierta vegetación, en la Tabla 8 se estima la evapotranspiración en los diferentes cuerpos del lago.

Tabla 7. Demanda de riego en las parcelas agrícolas

Zona	V.M.A. hm³	Caudal Medio Mensual L/s											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
3	1.26	40.0	48.9	55.1	52.4	47.9	33.8	29.2	31.2	27.8	40.8	37.6	36.2
4S	0.81	25.5	31.2	35.3	33.5	30.9	22.0	19.2	20.4	18.1	26.2	24.1	23.1
2	4.93	151.7	185.7	210.6	201.1	189.2	138.3	121.8	127.8	112.6	158.3	143.4	137.2
1	2.40	74.1	90.7	102.8	98.1	92.1	67.1	59.1	62.1	54.7	77.2	70.0	67.0
5	5.26	163.7	200.5	227.0	216.1	202.6	145.7	126.3	132.8	117.9	168.9	154.6	148.3
4N	1.30	40.5	49.6	56.1	53.4	49.6	35.6	31.3	33.0	29.3	41.9	38.2	36.7
TOTAL	15.97	495.5	606.6	686.9	654.7	612.4	442.6	386.9	407.2	360.5	513.2	467.9	448.4

Tabla 8. Evapotranspiración en el Lago Tláhuac-Xico

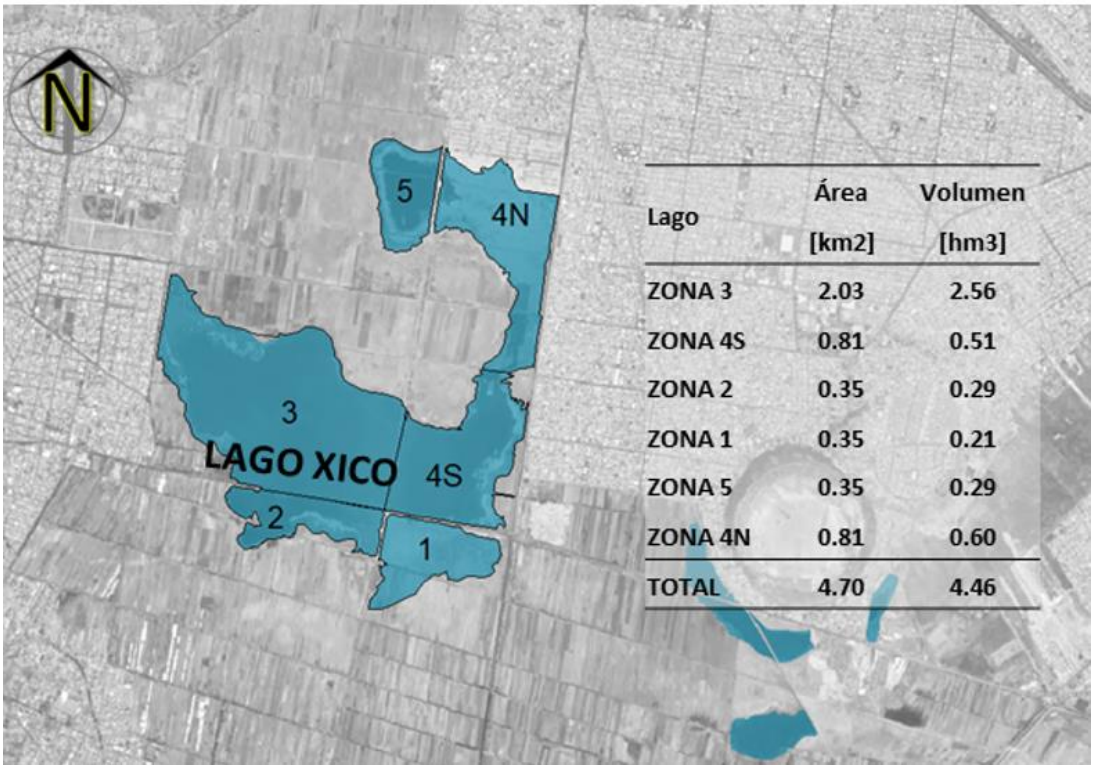
Zona	V.M.A. hm³	Caudal Medio Mensual L/s											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
3	1.96	52.7	64.8	73.7	72.7	75.6	66.0	62.3	63.7	54.2	61.1	50.3	47.3
4S	0.78	21.0	25.8	29.4	29.0	30.1	26.3	24.9	25.4	21.6	24.4	20.1	18.9
2	0.34	9.2	11.3	12.9	12.7	13.2	11.5	10.9	11.1	9.5	10.7	8.8	8.3
1	0.34	9.2	11.3	12.9	12.7	13.2	11.5	10.9	11.1	9.5	10.7	8.8	8.3
5	0.34	9.2	11.3	12.9	12.7	13.2	11.5	10.9	11.1	9.5	10.7	8.8	8.3
4N	0.78	21.0	25.8	29.4	29.0	30.1	26.3	24.9	25.4	21.6	24.4	20.1	18.9
TOTAL	4.54	122.4	150.4	171.2	168.8	175.5	153.3	144.8	147.9	125.8	141.8	116.9	109.9

2.5.1.5Almacenamiento del Lago

Con el “Modelo Digital de Superficie” de alta resolución de la zona (INEGI, 2013) y dos batimetrías proporcionadas por SACMEX (Anexo I) se reconstruyó un “Modelo Digital de Elevaciones” (DEM) del fondo del lago y su llanura de inundación. Con el DEM se estimaron los volúmenes de almacenamiento de los diferentes cuerpos del lago, ver Figura 15.

En la Figura 15 se observa que el área total del Lago considerando las 6 zonas definidas es de 4.7 km^2, así mismo, el volumen total es de 4.46 hm^3. No obstante, para los objetivos planteados fue requerido identificar las zonas con mayor profundidad, debido a que las alternativas para incrementar la capacidad del lago y su manejo dependen en gran medida de esta característica.

De esta forma, se obtuvo que las zonas con mayor profundidad son la 3 y 4S, que en conjunto cuentan con una capacidad de 3.0 hm^3. El área de las zonas 1, 2, 3, 4S es de 3.5 km^2.



Lago	Área [km2]	Volumen [hm3]
ZONA 3	2.03	2.56
ZONA 4S	0.81	0.51
ZONA 2	0.35	0.29
ZONA 1	0.35	0.21
ZONA 5	0.35	0.29
ZONA 4N	0.81	0.60
TOTAL	4.70	4.46

Figura 15. Volúmenes de almacenamiento del Lago Tláhuac–Xico según zona.

2.5.1.6 Esquema Hidrológico

Una vez estimados los volúmenes potenciales diarios de agua superficial en las 21 cuencas del sistema que ingresan al sistema de alcantarillado mixto (pluvial – sanitario) de las localidades cercanas al lago, se transitaron a través de las diferentes corrientes y colectores del esquema hidrológico descrito. Para ello, se utilizó la información disponible sobre la operación de las plantas de bombeo y de tratamiento. En la Tabla 9 se muestran los volúmenes de escurrimientos en las corrientes y colectores de los 6 subsistemas.

Como el lago y su planicie lacustre descansan sobre un acuitardo de bastante espesor, se asume que las aguas que percolan al acuífero (en las zonas de recarga potencial) no alimentan al cuerpo del lago pues se encuentra semiconfinado (CONAGUA, 2020).

Tabla 9. Escurrimientos en el esquema hidrológico Tláhuac – Xico

Subsistema	Ítem	V.M.A. hm^3	Caudal Medio Mensual L/s											
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tláhuac	Q1	5.57	137.1	138.7	140.0	149.6	181.0	226.7	238.2	237.7	223.8	171.5	136.4	134.5
	Q2	12.08	298.5	298.4	301.8	319.6	382.9	478.5	522.2	520.6	497.1	383.0	296.8	291.9
	Q3	0.07	0.8	0.4	0.4	0.7	2.1	4.1	5.2	5.2	4.8	2.1	0.3	0.3
	Q4	0.11	1.3	0.7	0.6	1.1	3.2	6.1	7.8	7.8	7.2	3.1	0.4	0.5
Cerro de La Estrella	Q1	29.01	920.0	920.0	920.0	920.0	920.0	920.0	920.0	920.0	920.0	920.0	920.0	920.0
	Q2	3.15	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Q3	21.13	670.0	670.0	670.0	670.0	670.0	670.0	670.0	670.0	670.0	670.0	670.0	670.0
	Q4	0.79	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0

	Q5	6.31	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
	Q6	0.63	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Milpa Alta	Q1	0.38	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
	Q2	2.66	66.5	65.5	66.1	69.5	82.8	101.5	114.6	115.7	111.5	86.6	65.7	64.7
	Q3	0.63	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	Q4	1.58	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Amecameca	Q1	8.63	61.5	77.5	51.4	36.3	66.4	327.4	568.4	639.0	724.4	574.0	113.4	32.0
	Q2	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Q3	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Q4	0.79	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
	Q5	9.42	86.5	102.5	76.4	61.3	91.4	352.4	593.4	664.0	749.4	599.0	138.4	57.0
	Q6	5.11	55.7	63.7	50.7	43.2	58.2	188.7	309.2	344.5	387.2	312.0	81.7	41.0
	Q7	1.53	16.7	19.1	15.2	12.9	17.5	56.6	92.8	103.3	116.2	93.6	24.5	12.3
	Q8	3.57	39.0	44.6	35.5	30.2	40.7	132.1	216.4	241.1	271.0	218.4	57.2	28.7
Canal General	Q1	3.57	39.0	44.6	35.5	30.2	40.7	132.1	216.4	241.1	271.0	218.4	57.2	28.7
	Q2	2.66	21.6	21.1	2.6	0.0	1.8	26.0	169.8	263.7	304.3	167.7	18.5	9.3
	Q3	1.87	18.2	19.7	11.4	9.1	12.8	47.4	115.9	151.4	172.6	115.8	22.7	11.4
	Q4	4.36	42.4	46.0	26.7	21.1	29.8	110.7	270.4	353.4	402.7	270.3	52.9	26.6
	Q5	0.04	1.5	3.9	1.6	0.0	0.0	1.5	2.0	0.4	0.7	2.8	0.1	0.5
	Q6	3.84	107.0	106.6	108.3	109.6	116.5	133.8	148.7	143.6	144.3	125.8	108.0	106.1
	Q7	8.16	148.0	148.8	133.4	130.8	146.3	243.0	417.1	496.6	546.3	393.3	160.8	132.2
	Q8	35.07	863.7	858.5	871.1	918.3	1054.2	1383.7	1542.0	1548.2	1458.4	1134.7	856.4	837.5
	Q9	37.69	1150.4	675.4	1613.2	1405.0	1293.3	1336.7	1187.4	1215.3	1147.1	981.4	932.2	1360.8
	Q10	53.97	1150.4	1575.9	691.4	936.7	1293.3	2005.1	2770.6	2835.6	2676.6	2289.9	1398.3	907.2
	Q11	45.85	1298.3	824.1	1746.5	1535.8	1439.5	1579.7	1604.5	1711.8	1693.4	1374.7	1093.0	1493.0
	Q12	89.04	2014.1	2434.4	1562.5	1855.0	2347.4	3388.8	4312.6	4383.8	4135.0	3424.6	2254.6	1744.6
	Q13	134.89	3312.4	3258.5	3309.0	3390.8	3787.0	4968.5	5917.1	6095.6	5828.4	4799.3	3347.6	3237.6
Lago	Q1	0.19	1.5	0.8	0.9	1.7	5.1	9.7	14.7	15.0	14.4	7.6	1.0	0.7
	Q2	0.30	5.8	3.5	3.2	4.9	8.1	13.7	17.9	17.4	17.6	9.4	5.3	5.1
	Q3	3.05	64.9	41.2	37.5	51.3	79.9	135.2	173.0	169.7	173.4	98.7	64.2	66.8
	Q4	1.45	11.4	13.3	9.1	7.7	15.0	57.5	96.1	105.9	119.5	88.8	17.4	6.2
	Q5	0.30	1.5	0.8	0.9	2.1	6.1	12.1	23.2	23.9	25.0	15.0	1.9	0.9
	Q6	0.39	4.0	6.0	3.9	4.3	10.8	22.1	27.8	26.4	24.6	13.8	2.2	2.1

2.5.2 Balance en el Lago

Hasta este punto se ha descrito la estimación de las series diarias de escurrimientos superficiales que ingresan al lago y las series diarias de precipitación y evapotranspiración. Sin embargo, la capacidad de operación de las bombas de tornillo que extraen las aguas del lago en época de lluvias es conocida y así como la capacidad de almacenamiento del mismo. Con todas estas variables se estimó el balance en el lago en condiciones actuales.

En la Tabla 10 se muestran los ingresos al lago estimados por zona, los cuales incluyen los escurrimientos superficiales de agua pluvial, residual y tratada y la precipitación propia en el lago. Finalmente, en la Anexo II se muestra el balance a nivel diario y en la Figura 17 un balance general.

Tabla 10. Ingresos al Lago Tláhuac–Xico

Zona	**V.M.A**	**Caudal Medio Mensual (L/s)**											
	hm^3	**Ene**	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
3	0.85	5.2	4.8	5.3	10.3	27.6	52.3	63	63.1	56.6	26.2	3.9	2.9
4S	0.56	7.3	5.1	5	8.3	17.1	330.7	37.2	36.6	34.4	16.8	6.5	6
2	3.16	65.6	41.9	38.3	52.8	83.8	142.6	181.5	178.1	180.7	101.9	64.7	67.2
1	1.56	12.1	14	9.8	9.2	18.9	65	104.5	114.3	126.9	92.1	17.9	6.5
5	0.41	2.2	1.5	1.7	3.6	10	19.5	31.6	32.3	32.4	18.3	2.4	1.3
4N	0.65	5.5	7.6	5.6	7.7	19.8	39.1	47.1	45.6	41.4	21.2	3.3	3
Total	7.19	97.8	74.8	65.8	92	177.3	349.2	349.2	470	472.5	276.5	98.7	87

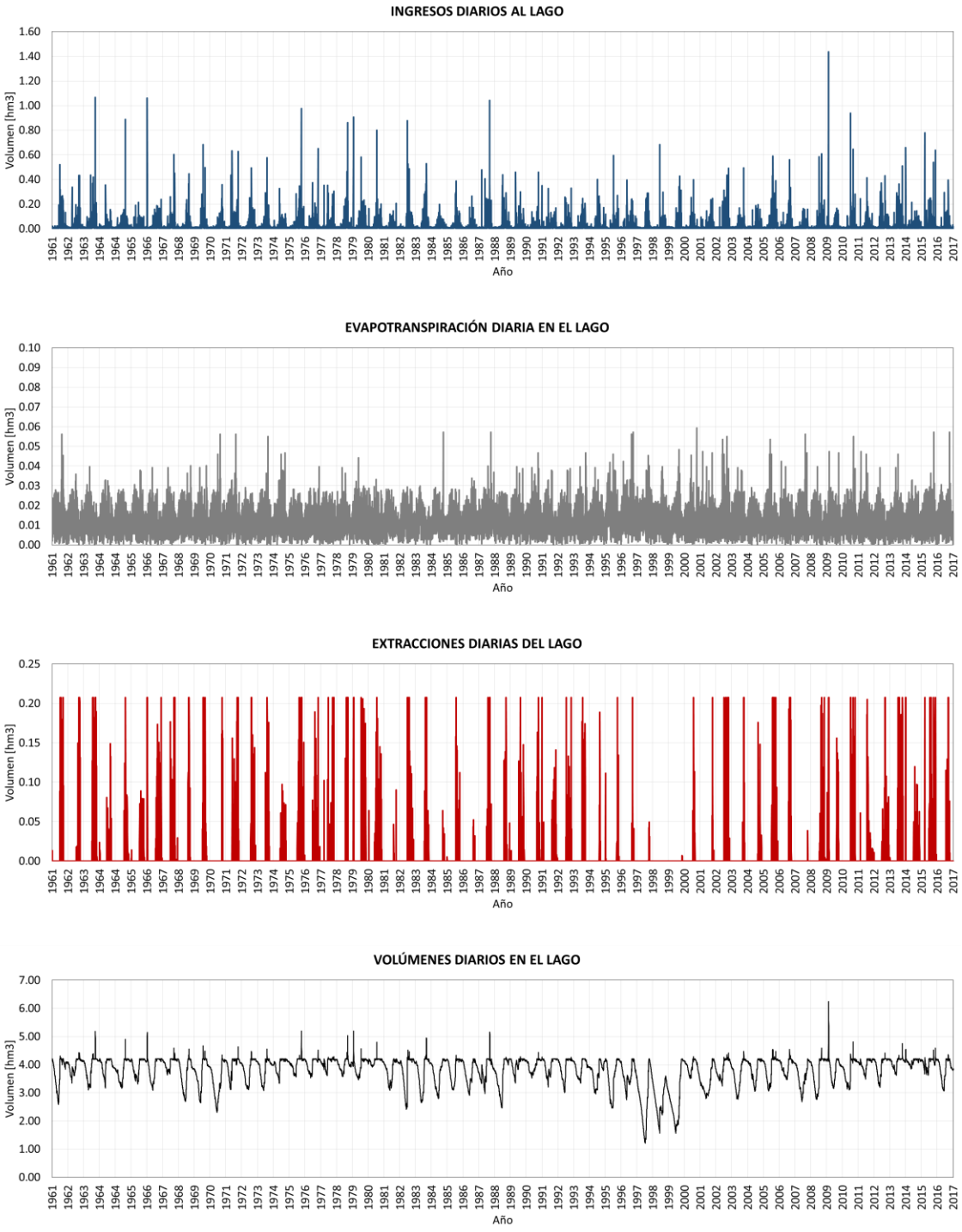


Figura 16. Balance de volúmenes en el lago Tláhuac–Xico

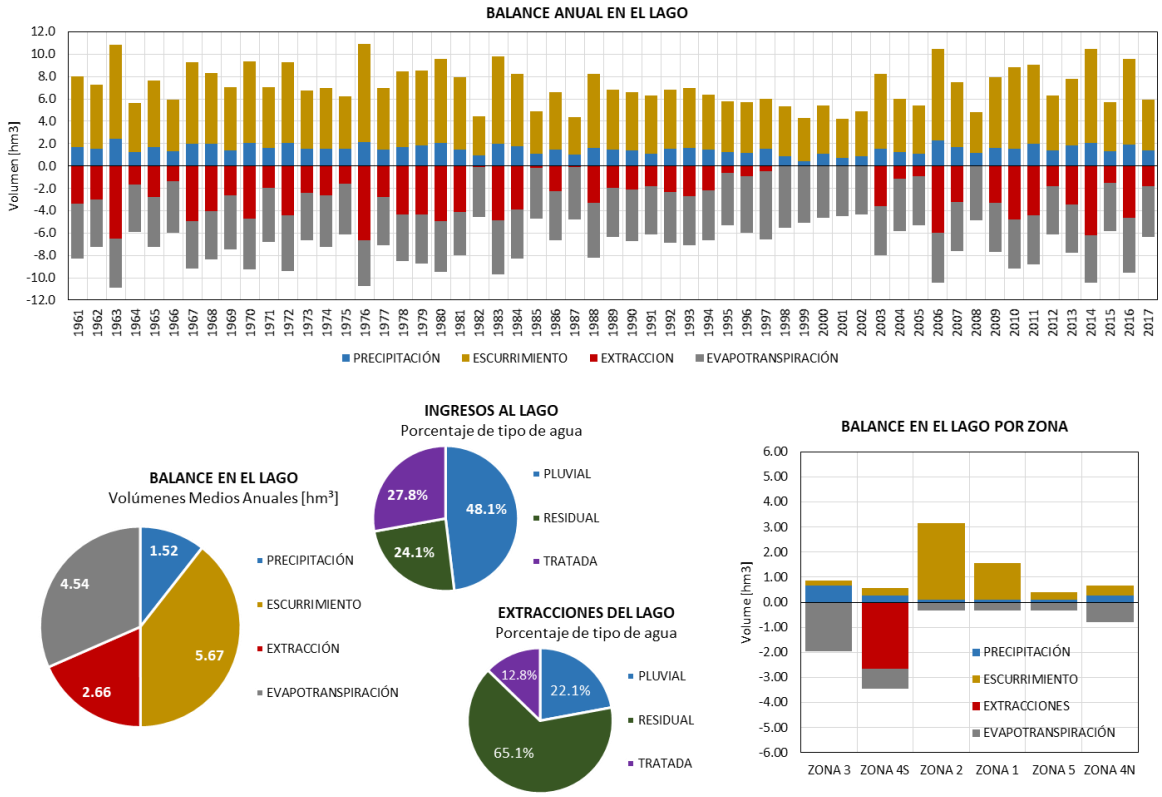


Figura 17. Balance general diario en el lago Tláhuac–Xico

2.6 Fuentes de agua

2.6.1 Contexto Hídrico

En el contexto de disponibilidad media anual de agua, el sistema hidrogeológico Tláhuac Xico se ubica dentro de la cuenca hidrológica del Río de la Compañía (2666) y de los acuíferos Chalco – Amecameca (1506) y Zona Metropolitana de la Ciudad de México (0901).

Según la última actualización de la disponibilidad media anual de agua superficial (SEMARNAT, 2020a), la cuenca hidrológica del Río de la Compañía entrega a la cuenca hidrológica de la Ciudad de México un volumen medio anual de 160.7 hm^3 al año, de los cuales están comprometidos 160.22 hm^3. Según la actualización de disponibilidad de agua subterránea, los acuíferos de Chalco-Amecameca y de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México tienen un déficit anual promedio de 25.4 hm^3 y 507.2 hm^3 respectivamente (CONAGUA 2020 y 2020a).

2.6.1.1 Uso del Agua

Dentro de la zona de estudio existen diversos títulos de concesión y asignación, los cuales se encuentran registrados en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la CONAGUA (2021). En la Tabla 11 se muestran los volúmenes concesionados para diferentes usos del agua en la zona de estudio.

Tabla 11. Volúmenes concesionados en la zona de estudio

Uso del Agua	Volumen (m^3)	
	Superficial	Subterránea
Público urbano	1,463,316	861,178,873
Agrícola	4,549,920	9,829,138
Industrial	0	3,109,722
Diferentes usos	441,504	6,712,247
Total	6,454,740	880,829,980

2.6.1.1.1 Programación Hídrica

Con el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2020-2024 (SEMARNAT, 2020b) se reservan por cuenca un volumen de agua superficial destinado principalmente a garantizar el derecho humano al agua. Para la cuenca hidrológica del Río de la Compañía este volumen reservado es de 27.97 hm^3 al año. Con esta programación se descargaría hacia la cuenca hidrológica de la Ciudad de México solo un volumen medio anual de 132.7 hm^3, considerando el volumen de escurrimiento descrito en párrafos previos. El cual, no satisface la demanda programada de 134.8 hm^3 al año.

2.6.1.1.2 Variación del Uso de Suelo

Los usos de suelo predominantes en la zona de estudio son urbano y agrícola (Figura 18). Sin embargo, en las últimas décadas ha habido un incremento importante en las manchas urbanas de los municipios de Tláhuac y Valle de Chalco, como se muestra en la Figura 18. En la que se observa el crecimiento de los cuerpos del Lago y la presencia de agua en las zonas agrícolas cercanas al mismo.

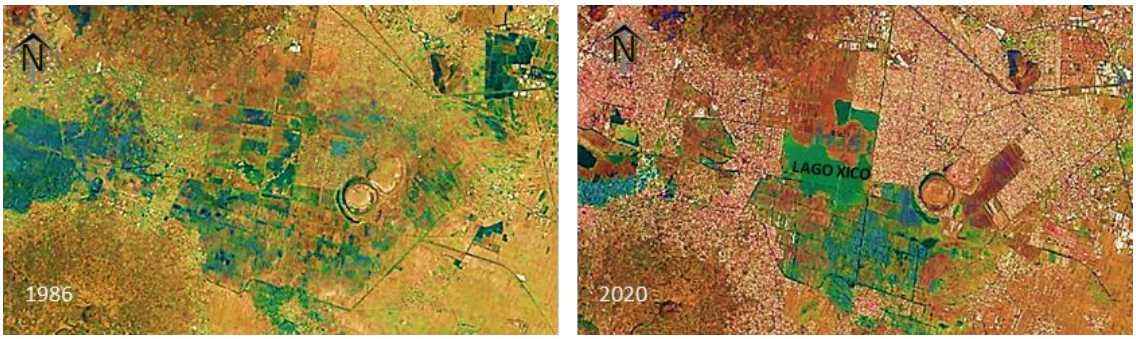


Figura 18. Variación del uso del suelo alrededor del Lago Tláhuac-Xico.

2.6.1.1.3 Crecimiento Poblacional

Los datos de población permiten estimar los volúmenes de agua residual que se generan en cada localidad o municipio. Como fuente principal de información se tienen las proyecciones que realiza el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2019), a partir de datos censales y de conteos que lleva a cabo el INEGI. También el INEGI ofrece información de población actualizada por las denominadas “Área Geo estadística Básica” (AGEB) (INEGI, 2021). En la

Tabla 12 se muestra la proyección poblacional de CONAPO en los municipios de la zona de estudio.

Tabla 12. Crecimiento poblacional en la zona de estudio

		Población (habitantes)			
Municipio	**Clave**	**2015**	**2020**	**2025**	**2030**
Amecameca	15009	52,581	54,548	56,833	59,775
Ayapango	15017	9,871	11,081	11,801	11,822
Juchitepec	15050	25,468	27,241	28,513	29,151
Temamatla	15083	12,698	13,690	14,300	14,442
Tenango del Aire	15089	12,169	13,344	14,142	14,421
Chalco	15025	348,034	397,344	428,875	430,059
Cocotitlán	15022	14,242	15,387	16,248	16,734
Iztapaluca	15039	507,825	551,034	572,008	568,527
Tlalmenalco	15103	49,340	51,370	53,741	56,804
Valle de Chalco	15122	394,527	419,700	437,313	445,135
Milpa Alta	9009	135,272	139,371	136,879	126,337
Tláhuac	9011	366,674	366,586	356,884	338,328
Xochimilco	9013	421,693	418,060	407,348	391,615

2.6.2 Disponibilidad hídrica

De esta forma, con el balance hídrico, y la información descrita previamente se estimó el potencial de agua pluvial, residual, tratada y subterránea en la zona de estudio para condiciones actuales o a corto plazo. Para ello, se buscó que sea factible desde un punto de vista técnico acceder al recurso y llevarlo hasta alguno de las zonas del Lago.

2.6.2.1Potencial de agua pluvial

Se considera como potencial de agua pluvial a los volúmenes de precipitación que pudieran ser captados en las localidades cercanas y ser llevados, a través de un drenaje exclusivamente pluvial, hasta alguno de los cuerpos del lago.

Actualmente no existe en ninguna de las localidades cercanas drenaje exclusivamente pluvial; todo el drenaje es mixto (Pluvial-Sanitario). Entonces, se considerará como potencial de agua pluvial a los escurrimientos directos de la precipitación que pudieran ser llevados al lago pensando en construir a corto plazo redes de drenaje pluvial.

En la Figura 19 se identifican 8 zonas urbanas de donde sería factible captar el agua de lluvia y llevarla hasta alguno de los cuerpos del lago. En cada una se muestra el caudal medio anual estimado y su hidrograma de caudales medios mensuales.

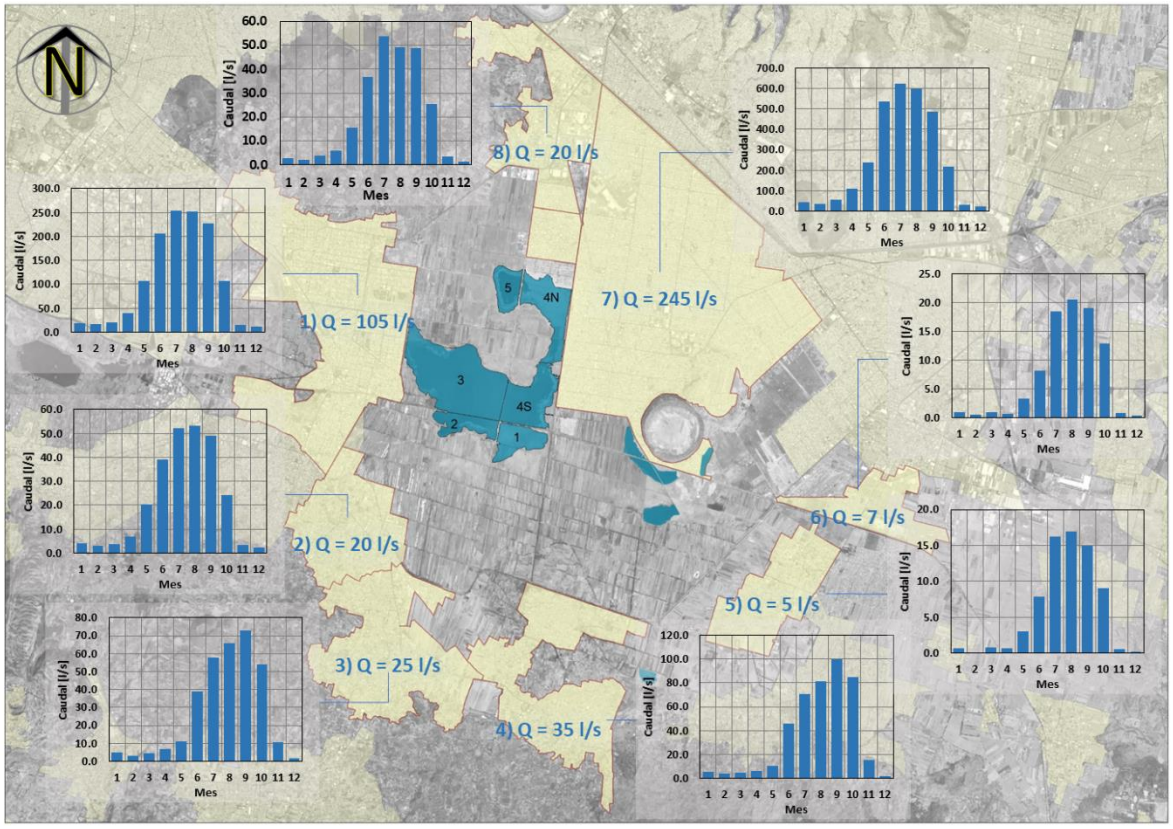


Figura 19. Potencial de agua pluvial en la zona de estudio

2.6.2.2 Potencial de Agua Residual

Los volúmenes de agua residual generados por localidad o municipio, como se indicó en el apartado “Escurrimiento superficial”, se estimaron como el 80% de la dotación de agua. Así mismo, la dotación considerada fue de 250 L/hab/día para las poblaciones registradas al año 2020.

Así pues, para el desarrollo del presente informe se consideró como potencial de agua residual, a los volúmenes de aguas crudas generados por las localidades cercanas al lago y que pudieran ser llevados a alguno de los cuerpos del mismo.
En la Figura 20 se muestran 8 zonas urbanas identificadas de donde se podría captar agua residual y llevarla hasta el Lago. En cada una se muestra el caudal medio anual de aguas residuales.

Figura 20. Potencial de agua residual en la zona de estudio

2.6.2.3 Potencial de Agua Tratada

Para los fines del presente informe, se consideró como potencial de agua tratada a los volúmenes de agua residual que se tratan actualmente en las plantas de tratamiento y podrían llevarse hasta alguna de las zonas del lago. El potencial de agua tratada está

claramente acotado a la capacidad de las plantas de tratamiento en las localidades cercanas al lago.

En la Figura 21 se identifican 5 plantas donde actualmente escurre agua tratada. En cada una se muestra su caudal medio anual de operación.

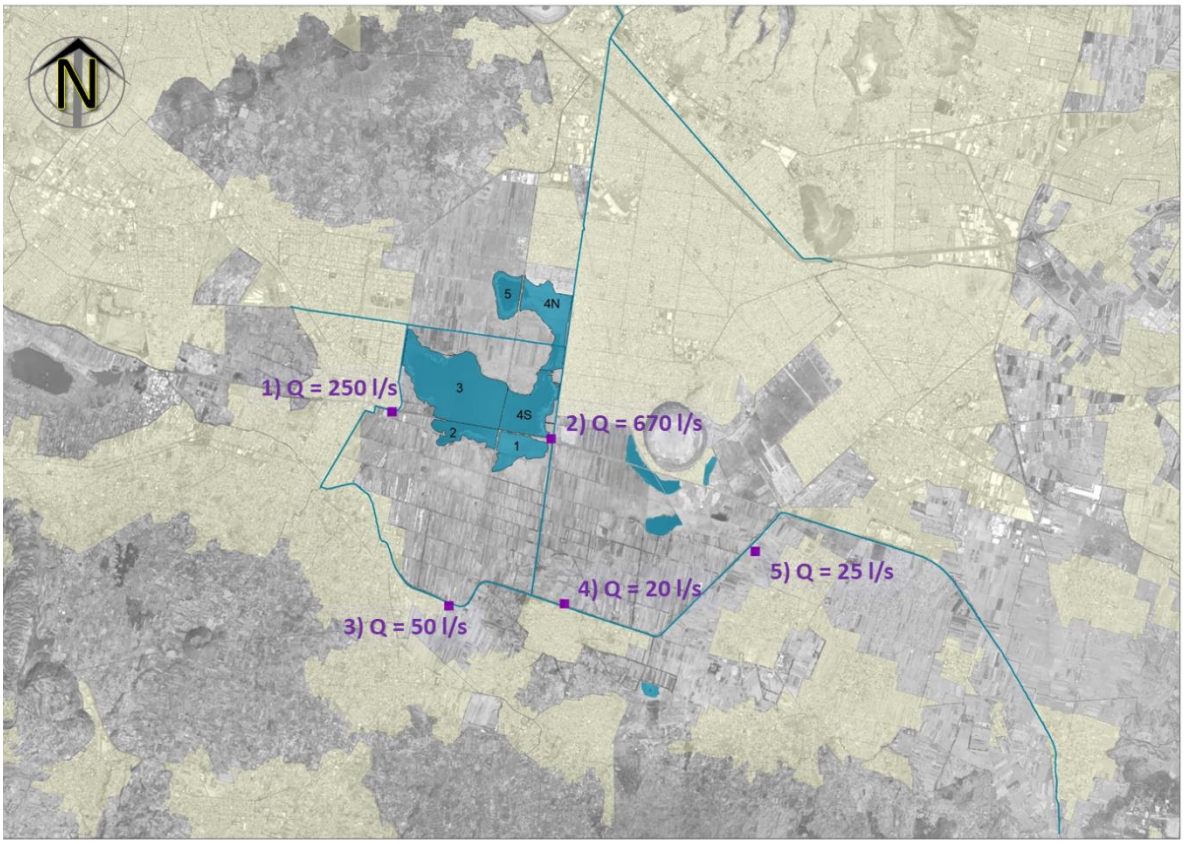


Figura 21. Potencial de agua tratada en la zona de estudio

2.6.2.4 Potencial de Agua Superficial

Actualmente, los diferentes tipos de agua superficial (pluvial, residual y tratada) se mezclan y escurren a través del sistema de drenaje y de las corrientes superficiales alrededor del lago. De esta forma, se consideró como potencial de agua superficial a la suma de los diferentes tipos de agua que podrían captarse y llevar al lago.

En la Figura 22 se identifican 6 puntos desde donde sería factible captar el agua superficial y llevarla hasta el lago. En cada uno se muestra el caudal base estimado (caudal medio en época de estiaje) y su hidrograma de caudales medios mensuales.

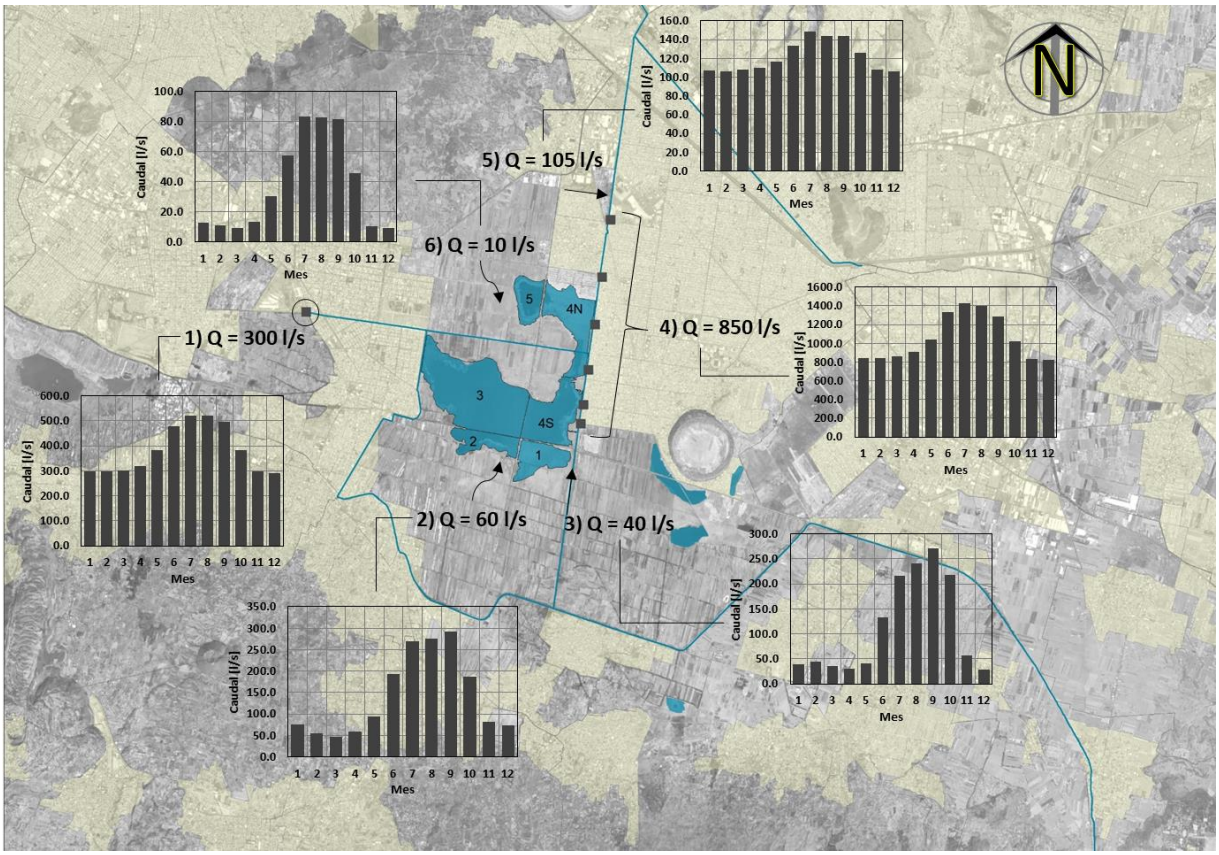


Figura 22. Potencial de agua superficial en la zona de estudio

A continuación, se describen brevemente los puntos de disponibilidad de agua superficial:

- A la Planta de Bombeo Arroyo Serpentino actualmente llega un caudal base de 300 L/s. El cual, se bombea hacia la cuenca de la *Ciudad de México*.
- De las parcelas agrícolas actualmente escurren hacia los cuerpos 1 y 2 del lago un caudal base de 60 L/s.
- En Canal General, antes de la Planta de Bombeo Parada del Toro, actualmente escurre un caudal base de 40 L/s.
- A las Plantas de Bombeo de Valle de Chalco (PB10, PB06, PB06A, PB14, PB07 y PB08) actualmente llega un caudal base de 850 L/s. Éste se descarga al Túnel Canal General.
- En el Canal Liconsa escurre un caudal base de 105 L/s.
- De las parcelas agrícolas escurren hacia los cuerpos 3, 4S, 4N y 5 del lago un caudal base de 10 L/s.
- En un balance con todos los cuerpos de agua superficial se tiene como resultado que en estiaje se pueden aprovechar más de 1200 lps.

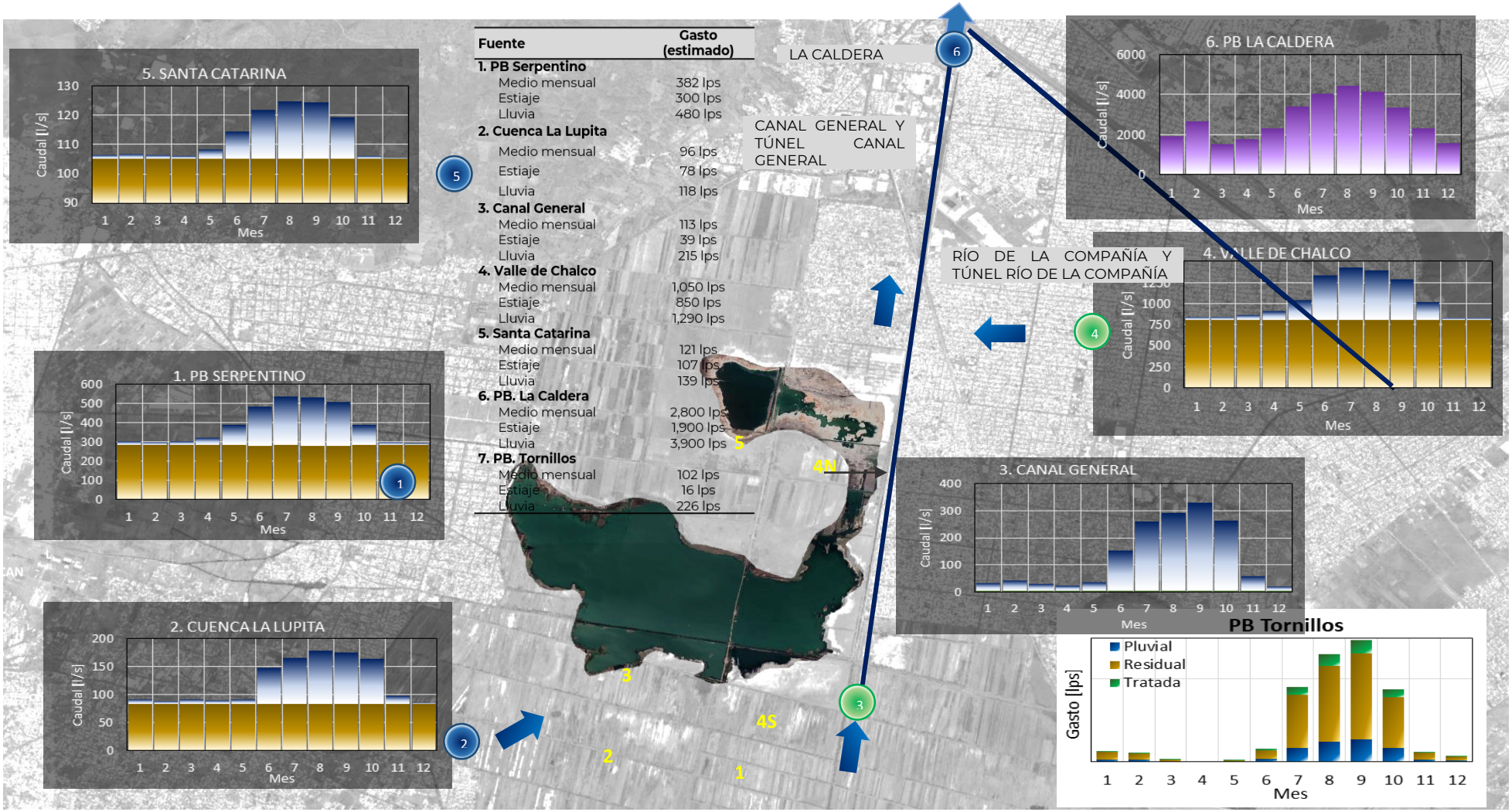


Figura 23. Potencial de agua superficial en estiaje y época de lluvias en la zona de estudio.

2.6.2.5 Potencial de Agua Subterránea

De acuerdo con la última actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea (DOF, 2020), los acuíferos de Chalco-Amecameca y Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentran en déficit, por lo cual se consideró que el potencial de agua subterránea en la zona de estudio es nulo.

2.7 Características del Lago

2.7.1 Introducción

Las características del Lago representan variables determinantes para alcanzar los objetivos planteados para el presente informe. En particular con el componente de Profundización, para el cual, el incremento en la capacidad del Lago depende de variables como su superficie, niveles, geotecnia, entre otras.

De esta forma, para establecer el método más apropiado para incrementar la capacidad de almacenamiento del Lago, se consideró inicialmente la información de las batimetrías proporcionadas por SACMEX (2019). De las cuales, se obtuvo que las zonas con mayor profundidad zonas 3 y 4S, sin embargo, para brindar una alternativa conceptual fue requerido validar y vincular dicha información con la generada, para lo cual, se realizaron actividades de topografía, fotogrametría y batimetría.

Debido a que los métodos identificados para brindar mayor capacidad volumétrica pueden ser superficiales considerando bordos, o profundizando el fondo de ciertas zonas del Lago, fue necesario conocer la capacidad del terreno para soportar cargas, deformarse. Así mismo, conocer la conformación del subsuelo para definir los estratos y sus características, con lo cual fue posible establecer aspectos restrictivos u opciones de manejo según el material, para seleccionar la alternativa viable de profundización. Para ello, se estableció la geología de la zona, y se realizaron estudios de geotecnia y geofísica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de dichos estudios y la información generada de los trabajos de campo realizados en la zona de estudio.

2.7.2 Levantamiento Topográfico y Fotogramétrico del Lago Tláhuac-Xico

2.7.2.1Referencias topográficas

La Red Geodésica Nacional es un sistema que está constituido por puntos físicamente establecidos mediante marcas o señales sobre terreno, los cuales se encuentran enlazados y ajustados a los marcos geodésicos nacionales del INEGI. Estos se han obtenido por medio de diversos levantamientos integrados que relacionan todas las porciones del territorio nacional en una sola estructura unificada con el objetivo de ser el marco fundamental de referencia para elaborar la cartografía de México para los diversos proyectos y obras de infraestructura (INEGI, 2022). Con la Red Geodésica Nacional (RGN) se pretende que los levantamientos geodésicos estén ligados a sistemas y marcos de referencia unificados para la determinación

de coordenadas de puntos sobre la superficie terrestre. De esta forma, la RGN contiene las estaciones geodésicas, horizontales, verticales y gravimétricas distribuidas en todo el territorio nacional.

Así pues, para la identificación de las referencias topográficas del INEGI presentes en las cercanías del Lago Tláhuac-Xico se realizó una consulta en la plataforma digital de la Red Geodésica Nacional Pasiva. En la plataforma se consultaron las referencias topográficas relacionadas con la Red Geodésica Horizontal (RGH), la Red Geodésica Vertical (RGV) y la Red Geodésica Gravimétrica (RGG).

Estas referencias topográficas están representadas mediante una placa metálica empotrada sobre el terreno. Sin embargo, algunos de estos monumentos pueden estar inactivos por lo que se realizó la consulta en el Acervo de Estaciones Geodésicas del INEGI.

En primera instancia se realizó la consulta de las estaciones geodésicas cercanas al Lago Tláhuac-Xico distribuidas dentro del polígono administrativo de la alcaldía Tláhuac; estas se clasifican en la RGH, RGV y RGG como se muestran en el Anexo III. En el cual, se describen de acuerdo con la red de clasificación y condiciones las referencias encontradas en los municipios de Tláhuac y Valle de Chalco Solidaridad, considerando la ubicación de la zona de interés.

2.7.2.2 Especificaciones seguidas para el levantamiento topográfico y fotogramétrico

Considerando la información presentada anteriormente se concluyó que las referencias circundantes al ejido de Tláhuac no son factibles para realizar el levantamiento topográfico y fotogramétrico porque los monumentos del INEGI se encuentran destruidos y los que se encuentran en buenas condiciones según INEGI se localizan a más de 5 kilómetros del ejido de San Pedro Tláhuac, en zonas urbanas y de condiciones de seguridad inciertas.

Durante los recorridos de reconocimiento al sitio de los trabajos se detectó una referencia topográfica monumentada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), localizada sobre la base de la barda perimetral del pozo N. 12 ubicado a un lado del camino de operación (Figura 24). La referencia topográfica está materializada por una placa metálica con la leyenda C(S14E11)01. La ubicación de esta placa metálica permite utilizar esta zona como sitio de campamento, de reunión y de sombra, por la facilidad de acceso y porque se encuentra en la división de las zonas III y IV del lago. Sin embargo, la placa mencionada fue reubicada y al momento de la ejecución de los trabajos las coordenadas no habían sido actualizadas.

Dadas las circunstancias expresadas previamente se decidió referenciar el levantamiento topográfico y fotogramétrico bajo las consideraciones siguientes:

1. Se tomó como Control Horizontal y Vertical Principal la placa metálica del SACMEX ubicada en el pozo N. 12.
2. Dado que a la fecha del levantamiento la placa metálica no tiene coordenadas actualizadas, se obtuvieron mediante la liga a la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI con un periodo de observación de cuando menos 5 horas.

3. Los datos de elevación y posicionamiento horizontal serán los resultantes del postproceso de las observaciones satelitales a las estaciones ICMX y TOL2 de la RGNA de INEGI.



Figura 24. Referencia topográfica a través de placa metálica C(S14E11)01 del SACMEX

2.7.2.3 Propuesta de ubicación de referencias topográficas

Las referencias topográficas son puntos de referencia sobre un objeto fijo cuya elevación es conocida y desde la cual se pueden determinar otras elevaciones. La propuesta de sitios de ubicación de referencias topográficas se determinó bajo los siguientes criterios:

- Evitar la interferencia con las actividades de los ejidatarios (agrícolas y ganaderas).
- Garantizar la operación continua de los equipos de transmisión y medición, así como, la disponibilidad durante los trabajos de los puntos de control terrestre para el levantamiento fotogramétrico determinados.
- Distribución de las referencias topográficas de acuerdo con el área de trabajo determinada para los estudios.

La Figura 25 muestra la ubicación referencias topográficas establecidas en el sitio de los trabajos, considerando los criterios expuestos anteriormente.

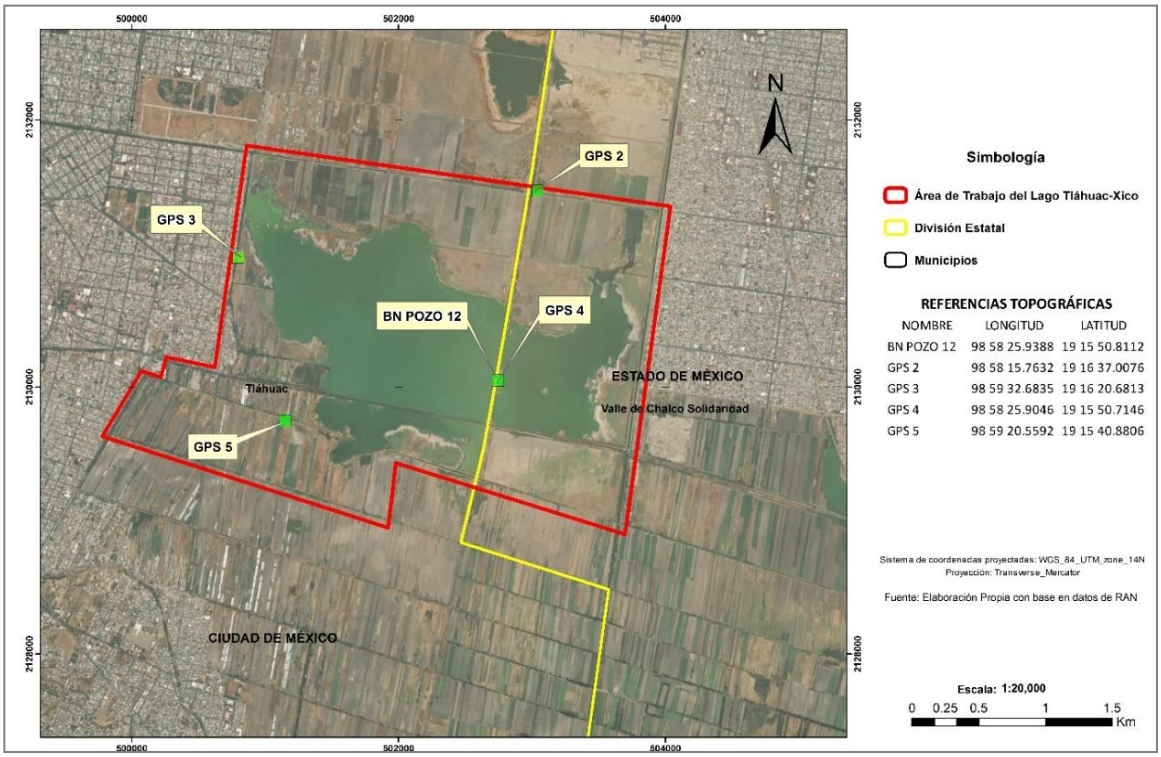


Figura 25. Ubicación de referencias topográficas evitando interferir con la dinámica social del sitio de los trabajos

2.7.2.4 Establecimiento de bancos y referencias topográficas

Para ejecutar el levantamiento fotogramétrico, en primera instancia se ubicaron 5 referencias topográficas que permitieron colocar la estación móvil D-RTK2 del Dron y partir de coordenadas conocidas. Estas referencias topográficas se ubicaron en los sitios recomendados por el personal de trabajo social que formó parte de la brigada, de tal manera que se tuviera nula o poca interferencia con las actividades agrícolas de los ejidatarios, en el Anexo IV se describen las actividades realizadas al respecto.

En la Tabla 13 se muestran las coordenadas finales de las referencias topográficas resultantes del postproceso, una vez que el BN Pozo 12 fue ligado a la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI. La Figura 26 muestra una imagen con la ubicación geográfica de cada referencia descrita en la Tabla 13.

Tabla 13. Coordenadas de las referencias topográficas para el levantamiento fotogramétrico y topográfico del Lago Tláhuac-Xico.

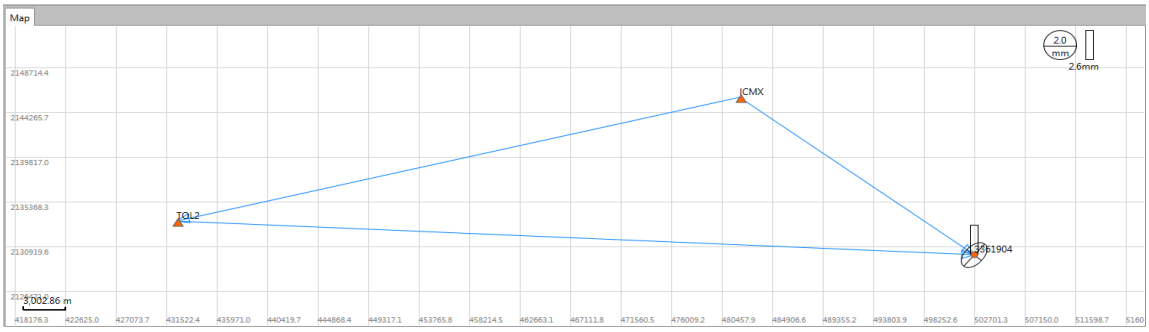
Referencia	Datos RGNA ITRF08			
	Latitud	Longitud	Altura elipsoidal m	Altura ortométrica m
BN POZO 12	19°15'50.81088"N	098°58'25.93881"W	2221.6032	2226.72
GPS 2	19°16'37.00730"N	098°58'15.76328"W	2223.3995	2228.53
GPS 3	19°16'20.68095"N	098°59'32.68357"W	2220.9566	2226.13
GPS 4	19°15'50.71427"N	098°58'25.90465"W	2224.0099	2229.13
GPS 5	19°15'40.88027"N	098°59'20.55921"W	2221.3124	2226.46

Referencia	Latitud	DATOS RGNA WGS84 Longitud	Altura elipsoidal m	Altura ortométrica m
BN POZO 12	19°15'50.81122"N	098°58'25.93876"W	2221.5962	2226.713
GPS 2	19°16'37.00764"N	098°58'15.76322"W	2223.3925	2228.523
GPS 3	19°16'20.68129"N	098°59'32.68352"W	2220.9496	2226.123
GPS 4	19°15'50.71462"N	098°58'25.90460"W	2224.0029	2229.123
GPS 5	19°15'40.88061"N	098°59'20.55916"W	2221.3055	2226.4531

Para ejecutar el postproceso para ligar el BN Pozo 12 a la RGNA de INEGI se formaron tres líneas base, que se encuentran representadas en la Figura 27. Para lograr lo anterior, se utilizaron los datos de las estaciones ICMX (Anexo V) y TOL2 (Anexo V) de INEGI, descargándose los datos RINEX para el intervalo de tiempo en el que se efectuaron las observaciones satelitales en el BN Pozo 12 por cerca de 6 horas continuas. En el Anexo V se muestra el posicionamiento del receptor GNSS en cada una de las referencias topográficas.



Figura 26. Ubicación de las referencias topográficas utilizadas para el levantamiento del Lago Tláhuac-



Xico.

Figura 27. Líneas base formadas para la liga del BN Pozo 12 a la RGNA de INEGI.

2.7.3 Ejecución de los vuelos fotogramétricos y levantamiento de los puntos de control y verificación terrestre

Para el levantamiento fotogramétrico del Lago Tláhuac-Xico se utilizó un Dron DJI Phantom 4 RTK que incluye un módulo RTK integrado que proporciona información de posición a nivel centimétrico en tiempo real, para obtener una precisión absoluta en la metainformación de la imagen. Además, cuenta con un sensor CMOS de 1 pulgada y 20 megapíxeles y debido a su obturador mecánico, puede moverse y capturar imágenes sin que aparezca distorsión del obturador, por lo que tanto las misiones de cartografía como la captura corriente de datos pueden realizarse de forma fluida. En todo momento, el Dron estuvo conectado a una estación móvil D-RTK 2 compatible con las constelaciones GPS, GLONASS, BeiDou y Galileo. La estación móvil D-RTK 2 proporcionó los datos diferenciales en tiempo real para poder obtener un posicionamiento con una precisión centimétrica.

En el Anexo VI, se muestra evidencia fotográfica del proceso de instalación del equipo y despegue del Dron, así como, detalles sobre el plan de vuelo para efectuar el levantamiento fotogramétrico. Para el que se ejecutaron 15 vuelos, con la cobertura que se presenta en la Figura 28. El reporte de procesamiento de cada vuelo se muestra en el Anexo VII, en el que se describen las características del levantamiento fotogramétrico, así como, las características, calibración y posiciones de la cámara, entre otros aspectos.

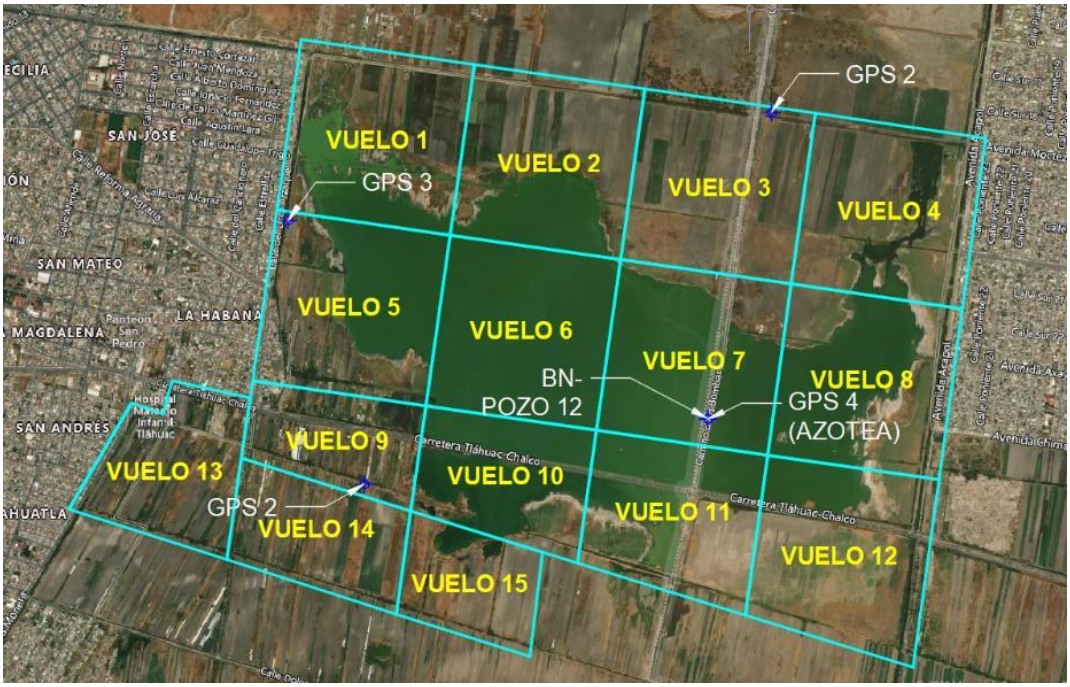


Figura 28. Cobertura de cada vuelo efectuado para el levantamiento fotogramétrico del Lago Tláhuac-Xico.

2.7.3.1Levantamiento de puntos de control para los vuelos fotogramétricos

Para el procesamiento de los vuelos fotogramétricos se levantaron 29 puntos de control distribuidos en los 15 vuelos ejecutados, a través de posicionamientos cinemáticos con corrección en tiempo real mediante equipos GNSS de precisión centimétrica. La ubicación de los 29 puntos de control se muestra en la Figura 29 siguiente.



Figura 29. Ubicación de los 29 puntos de control del levantamiento fotogramétrico.

Las coordenadas y elevaciones de los 29 puntos de control se muestran en la Tabla 14

Tabla 14. Coordenadas y elevaciones de los puntos de control para los 15 vuelos fotogramétricos.

Punto de control	X	Y	Altura elipsoidal	Elevación ortométrica
V1B1	500890.427	2131717.379	2221.033	2226.207
V1B2	500826.755	2131136.681	2220.552	2225.723
V1B3	501422.539	2131667.121	2224.17	2229.336
V2B1	501877.772	2131602.641	2223.667	2228.827
V2B2	502138.612	2131315.144	2221.24	2226.394
V3B1	502972.909	2131399.18	2223.415	2228.547
V3B2	502903.272	2130954.729	2223.276	2228.407
V4B1	503898.383	2130743.604	2220.633	2225.735

Punto de control	X	Y	Altura elipsoidal	Elevación ortométrica
V4R1	503889.838	2131335.429	2220.59	2225.696
V5B1	500850.119	2130966.189	2220.468	2225.637
V5B2	501110.244	2130321.525	2220.691	2225.848
V7B1	502755.48	2130137.576	2221.347	2226.468
V7B2	502839.183	2130621.053	2221.417	2226.546
V8B1	503775.732	2129918.573	2220.804	2225.893
V8B2	503850.008	2130426.847	2220.719	2225.816
V9B1	501309.347	2129705.195	2221.15	2226.292
V9B2	500634.474	2129911.141	2222.89	2228.048
V10B1	501502.612	2129643.696	2221.059	2226.197
V10B2	502064.169	2129490.547	2221.894	2227.018
V11B1	502703.041	2129832.145	2221.131	2226.247
V11B2	502573.375	2129336.467	2221.259	2226.367
V12B1	503632.119	2129068.508	2221.04	2226.115
V12B2	503684.697	2129571.797	2220.442	2225.526
V13B1	500448.707	2129977.8	2222.298	2227.46
V13B2	500464.439	2129469.062	2224.848	2230.002
V14B1	501199.847	2129240.245	2225.626	2230.762
V14B2	500572.208	2129576.088	2223.608	2228.762
V15B1	501655.157	2129434.952	2221.606	2226.737
V15B2	501472.768	2129149.545	2224.469	2229.598

Los puntos de control fueron representados en el suelo mediante banderas de tela con colores visibles a través de las fotografías. Estas banderas de tela fueron ancladas al terreno mediante anclas metálicas y piedras ubicadas en el sitio de los trabajos (Figura 30).



Figura 30. Levantamiento de puntos de control en la cobertura del vuelo 2.

2.7.3.2 Levantamiento de puntos de verificación del levantamiento fotogramétrico

Con el fin de verificar la precisión de los modelos digitales de elevación generados mediante los vuelos fotogramétricos se levantaron 103 puntos de verificación medidos directamente sobre la superficie del terreno natural, distribuidos en los 15 vuelos fotogramétricos. La ubicación de los puntos de verificación se muestra en la Figura 31.

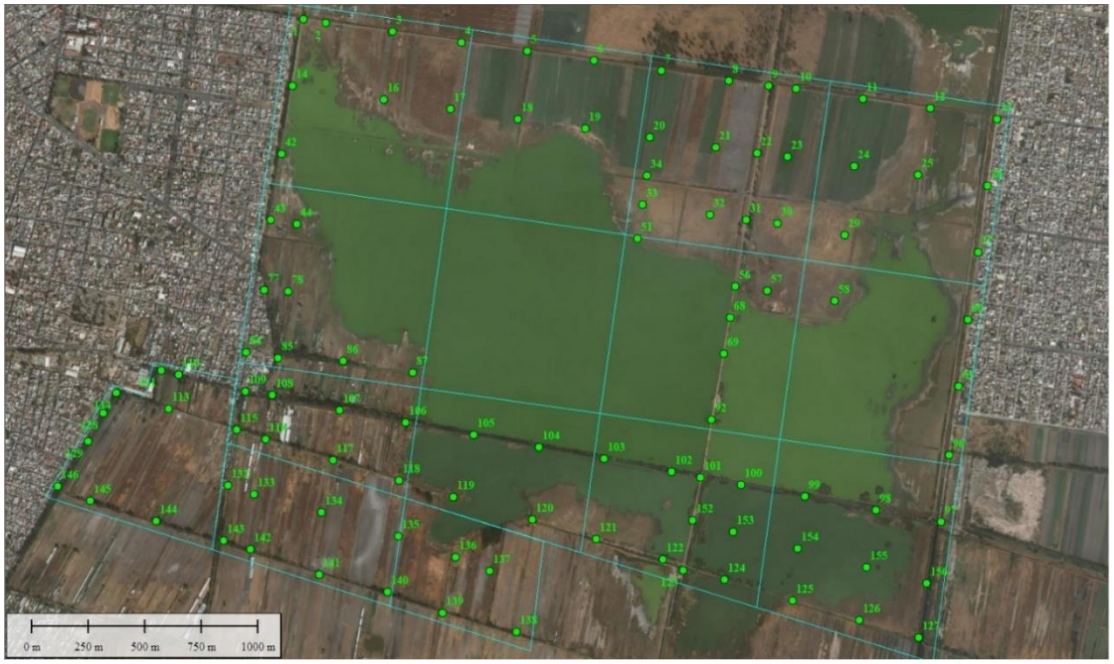


Figura 31. Puntos de verificación de los vuelos fotogramétricos.

Las coordenadas y elevaciones de los puntos de verificación mostrados en la Figura 31, se detallan en el Anexo VIII. Así como, evidencia fotográfica del levantamiento de los puntos. De los puntos de verificación del levantamiento fotogramétrico, el 60% tuvo un error de entre 0.4 cm y 11.92 cm, como se muestra en la gráfica de distribución de frecuencias de la Figura 32.

Al hacer una revisión de los puntos que tuvieron errores mayores a 10 centímetros, se observó que todos ellos se encontraron en zonas del terreno con pastizales medios y altos. La dificultad de limpiar la vegetación en zonas con presencia abundante de ella es una de las limitaciones reconocidas de la fotogrametría.

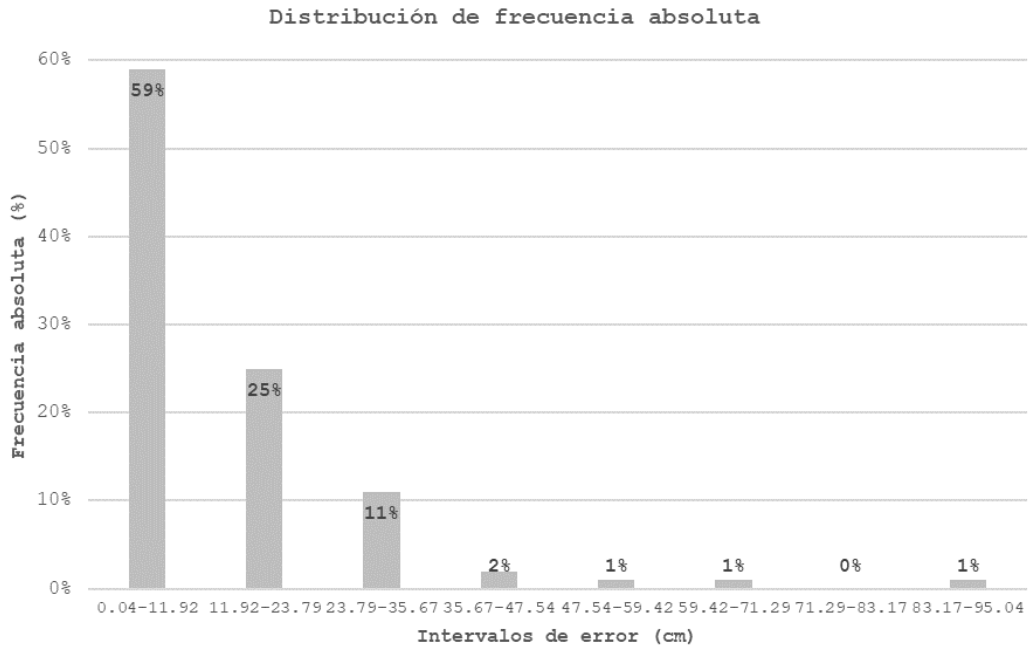


Figura 32. Gráfica de distribución de frecuencias de los errores obtenidos en vuelo fotogramétrico y comparados con la medición directa de la superficie del terreno mediante equipos GNSS en modo RTK.

2.7.4 Levantamiento de puntos de compatibilidad batimétrica

Con el fin de verificar la información batimétrica del año 2019 proporcionada por el SACMEX, se efectuaron mediciones directas de la profundidad del lago con ayuda de una lancha inflable de fondo rígido y un motor fuera de borda de 6.5 hp. En total, se efectuaron 37 mediciones de profundidad mismas que se encuentran ubicadas conforme se muestra en la Figura 33.



Figura 33. Puntos de medición de profundidades.

Para la obtención de las elevaciones del fondo del lago se efectuaron mediciones directas de la profundidad con un estadal y, con la elevación de la superficie libre del agua, se obtuvo la elevación del fondo de la laguna. La comparación de los datos obtenidos con los proporcionados por el SACMEX que corresponden al año 2019 se resumen en la tabla siguiente.

Tabla 15. Comparación de las elevaciones del fondo del Lago Tláhuac-Xico.

Punto ID	X	Y	Elevación del fondo año 2022	Elevación del fondo (SACMEX, 2019)
37	501826.768	2131006.622	2224.74	2224.62
38	502116.47	2130964.274	2223.49	2223.94
47	501500.301	2130901.916	2224.59	2224.80
48	501487.599	2130752.647	2224.50	2224.57
49	501798.832	2130856.908	2223.54	2224.40
50	502098.31	2130811.02	2222.99	2223.48
52	501777.095	2130713.945	2223.75	2224.01
53	502092.863	2130662.526	2222.78	2223.20
54	502368.386	2130618.078	2222.44	2222.98
55	502664.4	2130585.144	2224.19	2223.95
59	503557.286	2130458.269	2224.54	2224.80
62	503513.844	2130144.344	2225.14	2225.00
63	503545.755	2130317.962	2224.53	2224.61
64	503251.307	2130374.781	2225.00	2225.21
65	503216.767	2130198.84	2224.44	2224.69

Punto ID	X	Y	Elevación del fondo año 2022	Elevación del fondo (SACMEX, 2019)
66	502928.941	2130237.188	2223.94	2224.40
67	502948.25	2130401.065	2224.76	2224.87
70	502629.662	2130281.181	2223.05	2223.32
71	502655.068	2130442.957	2222.31	2222.88
72	502353.167	2130479.209	2222.14	2222.82
73	502054.628	2130534.83	2222.99	2223.20
74	501752.835	2130566.334	2224.04	2223.77
75	501460.5	2130614.774	2224.54	2224.58
80	501456.73	2130451.12	2224.49	2224.69
81	501743.815	2130390.619	2224.36	2224.60
82	502030.164	2130355.462	2223.49	2223.64
83	502328.598	2130325.401	2222.94	2223.33
88	501708.114	2130110.78	2224.11	2223.64
89	502001.93	2130062.012	2223.79	2223.92
90	502298.057	2130028.963	2224.09	2224.18
91	502577.584	2129983.633	2224.19	2224.31
93	502879.705	2129940.192	2224.49	2224.60
94	503196.333	2129871.31	2224.74	2224.80
148	501641.313	2129767.424	2224.07	2224.44
149	501935.872	2129694.202	2225.09	2225.09
150	502231.905	2129621.98	2225.25	2225.41
151	502522.37	2129547.55	2225.09	2225.20

La Figura 34 muestra una comparación entre las elevaciones del fondo del lago para la información obtenida en campo y la información proporcionada por el SACMEX correspondiente al año 2019. En promedio, el fondo del lago se encuentra alrededor de 20 centímetros más abajo que las elevaciones obtenidas el presente año. No obstante, es útil recordar que estos datos no partieron del mismo banco de nivel, aunque si de un postproceso de liga hacia la RGNA de INEGI.

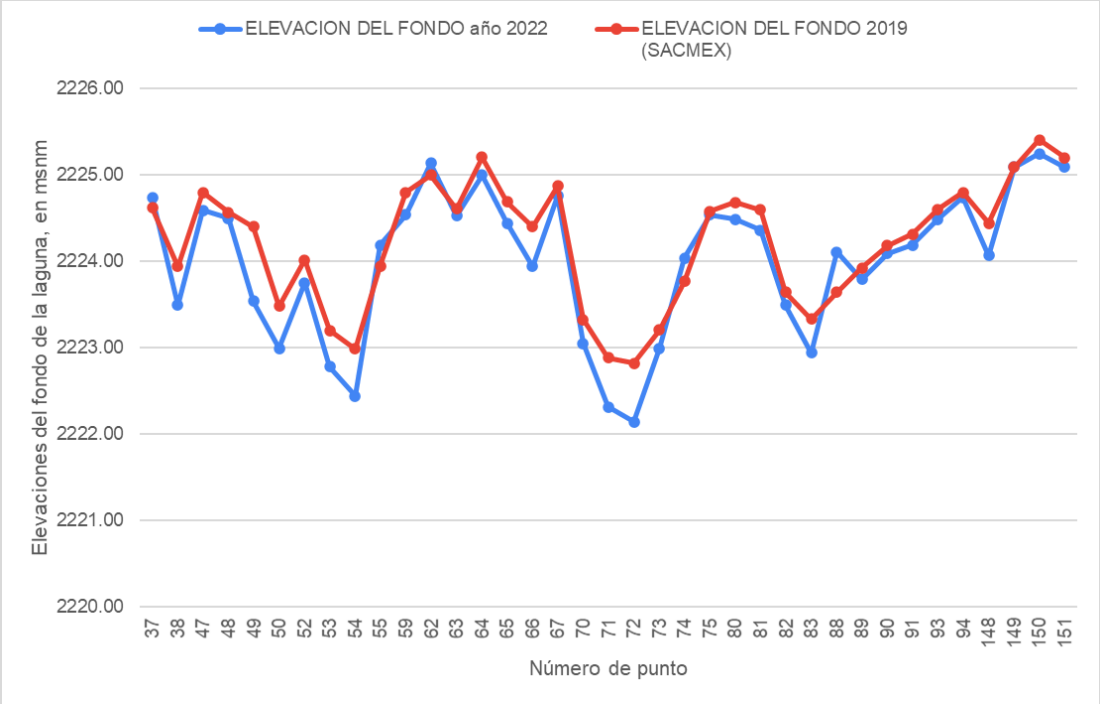


Figura 34. Comparación de las elevaciones del fondo de la laguna según el levantamiento efectuado como parte de los alcances de este diseño conceptual y la información proporcionada por el SACMEX del año 2019.

Además de la comparación de las profundidades del Lago, se efectuó una comparación de las elevaciones de la carretera Tláhuac-Chalco, que sirve de división de las zonas 1 y 2 de las zonas 3 y 4.

Los resultados de la comparación se muestran en la Figura 35. En esta figura es posible observar que, en este año, se obtuvo que la carretera se encuentra alrededor de 20 centímetros más arriba que en el año 2019, pero no es posible aseverar si lo anterior se debe a trabajos de encarpetamiento de la carretera.

A la luz de los resultados descritos anteriormente, los datos son congruentes y una diferencia de 20 centímetros resulta una precisión suficiente para desarrollar el diseño conceptual objeto de este informe. Sin embargo, durante la elaboración del proyecto ejecutivo el personal encargado debe asegurarse de que exista compatibilidad y se tenga un ensamble de información suficiente para desarrollar el proyecto mencionado.

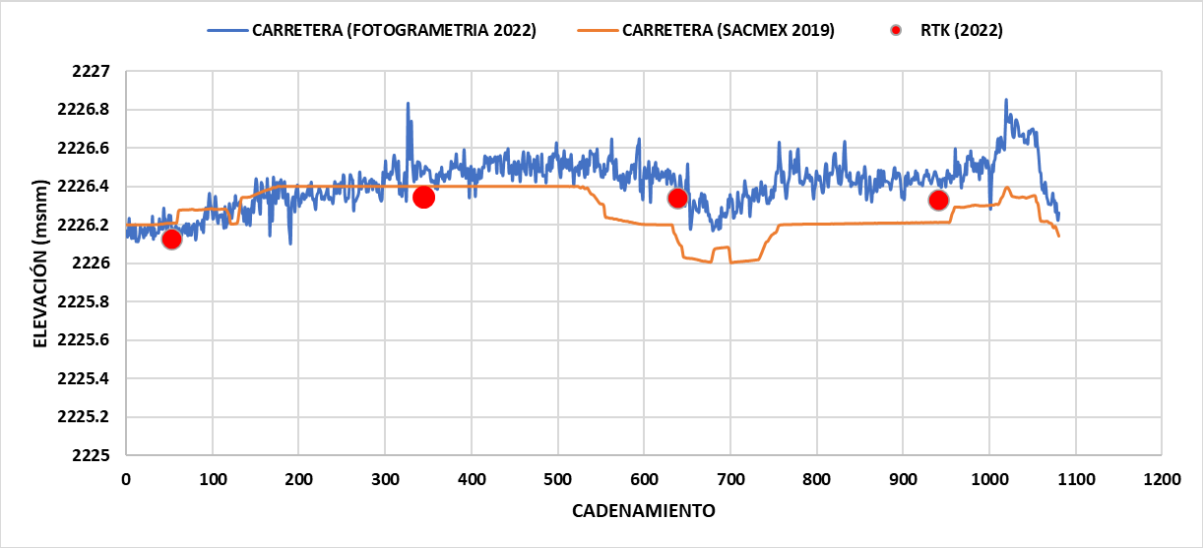


Figura 35. Comparación del perfil de la carretera Tláhuac-Chalco.

2.7.5 Aforo de caudales

En los recorridos previos a los trabajos se identificaron los puntos convenientes para realizar el aforo. Solo en dos puntos se consideró factible la realización del aforo, lo anterior debido a que la velocidad observada en los canales afluentes al Lago era muy baja. De esta forma, el primer punto de aforo es en la compuerta del Canal General, el segundo punto de aforo es en un canal que deriva agua hacia la Zona 2 del Lago.

2.7.5.1 Aforo en el Canal General y canal de ingreso a la Zona 2 del Lago

Se identificaron dos secciones de aforo dentro del área de estudio, una fue a un costado de la planta Paso de Toro en las coordenadas X=503,715.15 m E, Y=2,129,530.66 m N. Ahí se encuentra una estructura de control tipo compuerta rectangular como se muestra en la Figura 36.

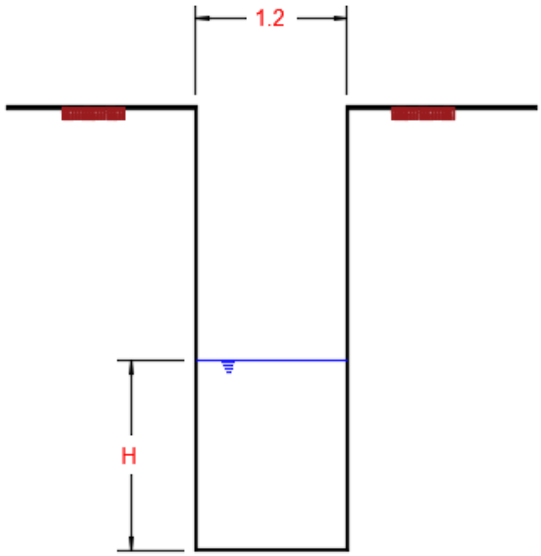


Figura 36. Sección de aforo en el Canal General.

El segundo punto fue en uno de los canales de entrada a la Zona 2 del Lago en las coordenadas X= 502,137.86 m E, Y= 2,129,460.38 m N. La sección que se encontró en sitio se muestra en la Figura 37.

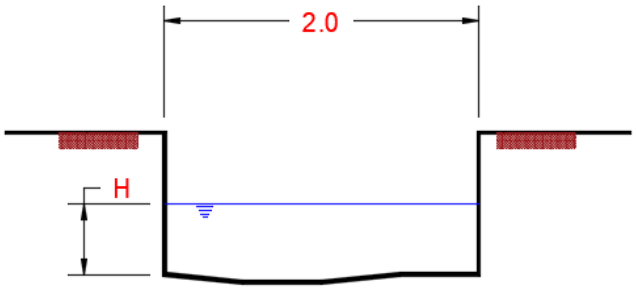


Figura 37. Sección de aforo canal de entrada a la Zona 2 del Lago

El aforo se realizó mediante la técnica de aforo área-velocidad, para lo cual previamente fue medida la sección con flexómetro y estadal. La medición de la velocidad se realizó con un molinete marca JDC modelo Flowatch con las características siguientes: presión máxima de 1 bar, caudal mínimo y máximo de 0 L/min – 30 L/m, diámetro de rosca de 60 mm y con medidor de temperatura mínima y máxima de 0 °C a 100 °C, hélice de 20 mm de diámetro para flujo de aire y 60 mm de diámetro para flujo de agua.

Posteriormente con ayuda del estadal se determinó el tirante del agua en cada una de las secciones medidas. Esto se realizó cuando menos tres veces tal que se pudiera tener certeza que las mediciones no fueran erróneas obteniendo los siguientes valores para las visitas realizadas.

En la Tabla 16 se muestran los gastos de entrada medidos en el punto descrito en Canal General, desde el primer de febrero de 2022. En esta, se observa que el gasto máximo aforado es de 136.32 litros por segundo.

Tabla 16. Gastos de entrada, Canal General

Fecha	Tirante m	Velocidad m/s	Gasto L/s
01/02/2022	1.50	0.041	73.15
11/02/2022	1.55	0.046	85.04
15/02/2022	1.55	0.041	75.59
17/02/2022	1.55	0.046	85.04
21/02/2022	1.40	0.030	51.21
24/02/2022	1.40	0.035	58.80
01/03/2022	1.45	0.040	69.60
04/03/2022	1.45	0.035	60.90
08/03/2022	1.40	0.030	50.40
11/03/2022	1.40	0.040	67.20
15/03/2022	1.42	0.080	136.32
18/03/2022	1.38	0.080	132.48
22/03/2022	1.37	0.080	131.52

Así mismo, en la Tabla 17 se presentan las mediciones de las entradas registradas, en uno de los canales de la Zona 2 del Lago desde el día 11 de febrero de 2022. En donde se observa que el gasto máximo aforado es de 55 litros por segundo.

Tabla 17. Gastos de entrada en Canal a la zona 2 del Lago Tláhuac-Xico

Fecha	Tirante m	Velocidad m/s	Gasto L/s
01/02/2022			
11/02/2022	0.50	0.0305	30.48
15/02/2022	0.55	0.0305	33.53
17/02/2022	0.55	0.0457	50.29
21/02/2022	0.50	0.0500	50.00
24/02/2022	0.48	0.0300	28.80
01/03/2022	0.55	0.0500	55.00
04/03/2022	0.55	0.0500	55.00
08/03/2022	0.47	0.0500	47.00
11/03/2022	0.40	0.0400	32.00
15/03/2022	0.52	0.0500	52.00
18/03/2022	0.54	0.0350	37.80

22/03/2022	0.55	0.0350	38.50

En el Anexo IX, se muestra evidencia fotográfica de los puntos de aforo y mediciones.

2.7.6 Elevaciones de la superficie libre del agua

A partir de enero del año en curso y hasta el mes de abril se efectuaron dos mediciones semanales de la superficie libre del agua (S.L.A.) mediante un GNSS RTK en las ubicaciones que se muestran en la Figura 38.



Figura 38. Ubicación de sitios de medición de las elevaciones de la superficie libre del agua

Cada medición de la S.L.A. se realizó considerando las mismas referencias topográficas que se utilizaron para el levantamiento fotogramétrico con Dron. De esta forma, esas elevaciones son compatibles con el ensamble de información batimétrica. Lo anterior permite que, mediante el uso de un software de dibujo asistido por computadora, en proyectos posteriores sea posible obtener la evolución de las profundidades en cada zona del lago, para estimar así la cantidad de material que será removido con los métodos de profundización que se planteen en el futuro.

Los resultados de las mediciones de la S.L.A se muestran en la Figura 39. En donde se visualizan las diferencias en la elevación del agua encontradas en estos meses de estiaje, siendo relevante observar que la zona 1 presenta la menor elevación de las 4 zonas del lago. Los niveles bajos de la zona 1 pudieron verificarse a través de las fotografías del Dron, pero también durante los recorridos efectuados en esa zona del lago.

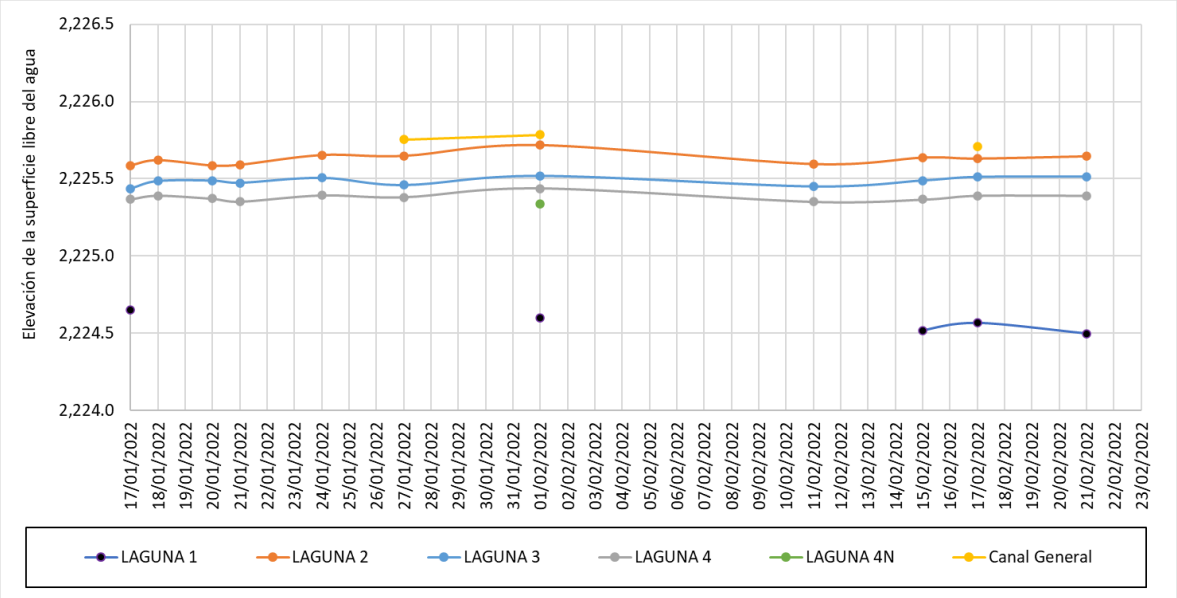


Figura 39. Elevaciones de la superficie libre del agua en el Lago Tláhuac-Xico.

Así mismo, en la Figura 39 se muestra que los gradientes hidráulicos se presentan de sur a norte, desde la zona 2 del lago hacia la zona 4, con diferencias en el nivel del agua de alrededor de 20 centímetros. Además, en términos generales se observa que la elevación del agua que se transita a través del canal general se encuentra más arriba que el nivel del agua en cualquiera de las zonas del lago. Lo anterior permitió comprobar que, hacia la zona oriente del lago, la única forma de trasladar aguas hacia el Canal General es mediante bombeo, precisamente mediante las bombas tipo tornillos que actualmente se operan en el sitio denominado Paso del Toro.

2.7.7 Evaluación Geológico y Geofísica

2.7.7.1 Introducción

La zona Metropolitana del Valle de México se encuentra sobre una cuenca, que originalmente formaba un sistema lacustre integrado por cinco grandes lagos: Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco. En época de lluvias estos lagos se convertían en uno solo de aproximadamente dos mil kilómetros cuadrados de superficie. Condición que favorecía las periódicas inundaciones que desde la fundación de Tenochtitlán ha enfrentado la ciudad de México y sus habitantes, así como la necesidad de construir importantes obras de drenaje para el control y desalojo de las aguas pluviales y residuales del valle (SEMARNAT, 2008).

De acuerdo con la literatura existente, los materiales del lecho lacustre correspondiente al Lago Tláhuac-Xico se presentan en una serie de suelos extremadamente blandos y arcillosos, producto de la hidratación y degradación de los derrames volcánicos, materiales piroclásticos transportados desde las partes altas de la cuenca por las corrientes de agua o directamente de los glaciares de los volcanes y/o por la acción eólica.

Estos suelos son geológicamente muy jóvenes y son conocidos por su extremadamente alto contenido de agua y compresibilidad. Capas de materiales tales como cenizas y vidrio micro-vesicular piroclástico, también están presentes. Estos últimos producto de las erupciones volcánicas que tuvieron lugar durante el Pleistoceno superior; otros materiales, reportados, que se encuentran en la zona del Lago, son diversificaciones de materia orgánica y microfósiles.

El propósito de los trabajos de los trabajos descritos en esta sección es la evaluación Geológica y Geohidrológica de la zona donde se localiza el Lago Tláhuac-Xico y sus inmediaciones, para realizar una caracterización regional de la zona. Considerado los siguientes objetivos específicos:

- Establecer el marco geológico de la zona de estudio
- Determinar las características hidrogeológicas de las unidades litológicas existentes
- Conocer mediante la realización de 4 Sondeos geofísicos (SEV's) la distribución espacial de los materiales en el subsuelo
- Realizar una caracterización litológica a detalle a través de 15 Líneas de Calicateo Geoeléctrico (LCG) de 140 metros
- Identificar los niveles piezométricos en los pozos existentes, la profundidad piezométrica y direcciones de flujo
- Caracterizar la calidad geotécnica de la zona mediante perforaciones exploratorias a 15 metros de profundidad.

2.7.8 Estudio geofísico

Se realizó un estudio geofísico de la zona con el interés de conocer a profundidad la distribución vertical y lateral de los materiales existentes en el subsuelo, así como determinar sus dimensiones e identificar las posibles estructuras geológicas existentes.

Los materiales aluviales y de posible transición que conforman el predio en estudio, debieran presentar valores intermedios y bajos de resistividad dependiendo de su composición granulométrica y grado de permeabilidad; mientras que las zonas de debilidad como lo son

los posibles agrietamientos y/o posibles asentamientos debieran de manifestarse a través de altos de resistividad. Por tales motivos, se llevó a cabo el estudio de exploración geofísica, consistente en una caracterización del terreno a través de las siguientes actividades:

- Una caracterización integral del terreno a través de 4 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en arreglo Schlumberger y con aberturas electródicas AB/2 de 1 a 300 m, con el propósito de alcanzar profundidades de exploración del orden de 100 m, para determinar la estratigrafía presente en el subsuelo, lo que permitió, ubicar posibles cierres estructurales y determinar las zonas susceptibles de agrietarse.
- La segunda actividad, consistió en correlacionar el modelo geoeléctrico determinado a partir de los SEV, con la información geológica, geohidrológica y geofísica disponible, a fin de establecer un adecuado marco de referencia y determinar las posibles zonas que pudiera incidir en potenciales planos de agrietamiento por subsidencia.
- La tercera de las actividades de campo consistió en realizar una caracterización a detalle a través de 15 Líneas de Calicateo Geoeléctrico (LCG) de 140 metros. Las 15 LCG se levantaron con el dispositivo asimétrico Polo-Dipolo, debido a que es el más adecuado para la detección indirecta de dichas posibles discontinuidades. Los dipolos o estaciones de medición se realizaron con una separación de 4 m y en cada uno de ellos se tomaron lecturas al menos 15 niveles con el fin de alcanzar profundidades de investigación del orden de 25 m, suficiente para caracterizar la estratigrafía somera y profundidad de las posibles discontinuidades y/o grietas.

Para el desarrollo de este estudio, además de la recolección de los datos geofísicos de campo, se realizó una investigación que consistió en un reconocimiento geológico del área y alrededores, con caminamientos y recopilación de información, lo que estableció el marco geológico de referencia para correlacionar los datos del levantamiento geofísico, con lo cual se determinó la estratigrafía presente en el sitio y propiedades físicas de los diferentes estratos o paquetes litológicos que conforman el subsuelo.

2.7.8.1 Reconocimiento estructural

Las actividades de reconocimiento de campo se concretaron básicamente a recorridos de verificación en las inmediaciones de la zona de trabajo, tratando de identificar rasgos geológico-estructural visibles, tanto en la zona del Lago Tláhuac-Xico, así como los alrededores del lago. Sin embargo, toda vez que esta última zona se encuentra totalmente urbanizada y enmascarada por la carpeta asfáltica se buscaron fracturamientos en guarniciones, banquetas e inmuebles en la zona, que pudieran asociarse a planos de debilidad.

2.7.8.2 Reconocimientos hidrogeológicos

De forma contemporánea a las actividades de campo, se realizaron recorridos en la zona de estudio cubriendo de forma uniforme toda el área, por medio de reconocimientos hidrogeológicos durante los cuales se verificó la información de la infraestructura existente, como canales, ríos y cuerpos de agua que influyeran en el comportamiento en la zona.

2.7.8.3 Condiciones geológicas regionales y locales

Planicies proluviales lacustres, se caracterizan por presentar una pendiente que no supera los cinco grados de inclinación; están constituidas por materiales proluviales (transportado por ríos que aparecen en estación lluviosa), que son acarreados principalmente desde el piedemonte para ser depositados en las riberas lacustres, en cuerpos de agua poco profundos o en llanuras de inundación temporal. Las gravillas y las arenas (muy gruesas, gruesas medias, finas y muy finas) son las texturas que predominan en los amplios abanicos que se desarrollan en esta superficie de transición, entre el piedemonte y la planicie lacustre.

En la medida en que los depósitos proluviales son vertidos en los lagos o zonas inundables, comienzan a rellenarse, dando paso a porciones de tierra firme con humedad constante, lo que favorece la aparición de vegetación hidrófila y en algunos casos la formación de cieno; este ambiente se conoce como de ciénagas y marca, técnicamente, el inicio de la desaparición de los lagos.

La expresión morfológica de las planicies proluviales-lacustres en la subcuenca de Chalco, es muy sutil e incluye superficies sub-horizontales, inclinadas, onduladas, cóncavas y escalonadas. En la actualidad, estas características han sido modificadas, toda vez que la mayor parte de esta superficie ha sido trabajada como áreas de cultivo y urbanizadas.

Planicie lacustre, ocupa el nivel altitudinal más bajo de la cuenca, se trata de una superficie casi horizontal, cuya pendiente es inferior a los dos grados de inclinación y presenta una altitud promedio de 2,230 msnm. Su origen se explica a partir de un continuo relleno de todo este territorio, motivado por la aparición de la sierra volcánica Chichinautzin, que fungió como una represa natural. Dicho vaso se azolvó intercalando distintos tipos de materiales, entre los que destacan los proluviales (limos y arenas), los lacustres (arcillas y limos), así como arenas y cenizas volcánicas, que al intemperizar generan arcillas altamente compresibles.

Las planicies lacustres, tienen un origen exógeno acumulativo del Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno). Se componen de sedimentos lacustres que provienen de los depósitos piroclásticos de las explosiones recientes de los volcanes Cuaternarios que se localizan tanto dentro de la Cuenca de México como de las cuencas vecinas, y del acarreo que produce el agua de los cauces de montaña. Estas unidades presentan una concentración de sedimentos clásticos y productos piroclásticos de caída, relacionados con la actividad volcánica del estratovolcán Popocatépetl y de la Sierra de Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre.

En términos generales, la delimitación fisiográfica de la subcuenca de Chalco está dominada por edificios volcánicos que forman cadenas montañosas, y una llanura volcano-sedimentaria constituida mayormente por sedimentos fluvio-lacustres y depósitos volcánicos provenientes de los volcanes circundantes.

La sierra de Santa Catarina al norte de la subcuenca está constituida por una cadena de conos volcánicos cuaternarios dispuestos en dirección ENE. La sierra de Chichinautzin al sur, es un extenso campo monogenético que abarca un área de aproximadamente 2,400 km^2. Al E-SE de la cuenca se sitúa la sierra Nevada.

En la llanura sedimentaria resaltan edificios volcánicos más pequeños aparentemente aislados, como el Xico y Tlapacoya.

2.7.9 Geología Regional

Básicamente la geología del subsuelo de la subcuenca Chalco, está constituida por rocas que van desde el Cretácico hasta el Reciente, su formación se debe a procesos volcánicos y tectónicos que se han desarrollado desde el Eoceno. Durante este período se inició un conjunto de procesos eminentemente volcánicos, evidenciados por la presencia de importantes espesores de lava, toba y brecha. Mientras que durante el Mioceno temprano predominaron las erupciones volcánicas de andesita y dacita, con un espesor de 600 a 700 m, esta actividad magmática y tectónica generó un extenso fracturamiento en la cuenca, con una orientación preferencial W-E.

Para el Plioceno Tardío y Cuaternario se desarrollaron procesos estructurales, que dieron origen a amplias fosas tectónicas con un rumbo preferente NNE, estas depresiones fueron cubiertas por material clástico, al oriente, del lago donde se tienen depósitos aluviales que poseen una granulometría gruesa cerca de las serranías, mismas que disminuye a medida que se acerca hacia la zona limítrofe del vaso lacustre, estos materiales están constituidos por depósitos clásticos del Plioceno-Cuaternario de diversos tamaños e inferiormente consisten de material aluvial y lahárico, retrabajado.

Estas depresiones (fosas) fueron cubiertas tanto por materiales producto de la erosión como por rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea, así en la parte inferior de las sierras mayores se encuentran extensos abanicos volcánicos. Mientras que sierras de menor tamaño, como la Sierra de Santa Catarina se caracteriza por presentar abanicos aluviales menores. El origen de los depósitos lacustres está relacionado con la obstrucción definitiva del drenaje de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra de Chichinautzin. Cabe señalar que el vulcanismo durante el Pleistoceno y Holoceno es de tipo monogenético, generando conos cineríticos, domos volcánicos y derrames de lava, asociados con materiales piroclásticos. De tal forma la Sierra del Chichinautzin es el área en la que se tiene la mayor extensión de rocas volcánicas Cuaternarias.

Las planicies, además de estar compuestas principalmente de materiales aluviales, presentan en parte otros tipos de depósitos, como los de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales. También se presentan planicies con cobertura e intercalaciones de materiales coluviales, acumulados al pie de las laderas.

2.7.10 Geología Histórica

La Cuenca de México debe su formación a procesos volcánicos y tectónicos que han acaecido desde Eoceno, en ese período se inició un conjunto de procesos eminentemente volcánicos, que con el tiempo produjo espesores de 2 km de lava, toba y brecha.

Para el Mioceno temprano predominaron erupciones del tipo acido, con potentes espesores, la actividad magmática y tectónica generó rocas volcánicas y un fracturamiento de orientación W-E. Por otra parte, para el Plioceno Tardío y el Cuaternario se define la creación de fosas de rumbo preferentemente NNE como las Tláhuac-Apan y la fosa Cuautepec hacia la Sierra de Guadalupe, afectando a la Sierra Nevada y formando la fosa en el flanco poniente del Cerro Tláloc. Durante el Pleistoceno y Holoceno el vulcanismo es de tipo monogenético (conos cineríticos, domos volcánicos) y derrames de lava, asociados con materiales piroclásticos.

La Sierra del Chichinautzin es el área en la que se tiene la mayor extensión de rocas volcánicas cuaternarias al sur de la Cuenca de México. Las grandes depresiones formadas fueron rellenas por materiales clásticos, al oriente, se tienen depósitos aluviales que poseen una granulometría gruesa cerca de las serranías, que disminuye a medida que se acerca a la zona limítrofe del vaso lacustre y están constituidos por depósitos clásticos plioceno-cuaternarios de diversos tamaños.

El origen de los depósitos lacustres está relacionado con la obstrucción definitiva del drenaje de la Cuenca de México, causado por la intensa actividad volcánica que edificó la Sierra de Chichinautzin.

Estas depresiones (fosas) fueron cubiertas tanto por materiales producto de la erosión como por rocas provenientes de la actividad volcánica contemporánea, así en la parte inferior de las sierras mayores se encuentran extensos abanicos volcánicos. El estado caótico de los rellenos de las planicies es su característica principal, aparecen depositadas series clásticas intercaladas con materiales provenientes del vulcanismo del Pleistoceno.
Además de estar compuestas principalmente de materiales aluviales, las planicies aluviales presentan en parte otros tipos de depósitos, como los de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales. También se presentan planicies con cobertura e intercalaciones de materiales coluviales, detritos rocosos acumulados al pie de las laderas empinadas, etc. Además, se presenta un cierto dominio de coberturas de materiales de textura fina, pro-aluviales acumulativos, sobre todo en los abanicos formados en la desembocadura de los ríos montañosos.

En la Figura 40 se presenta la localización de los principales cuerpos volcánicos que aportaron sedimentos y afectaron las condiciones de sedimentación de la subcuenca de Chalco.

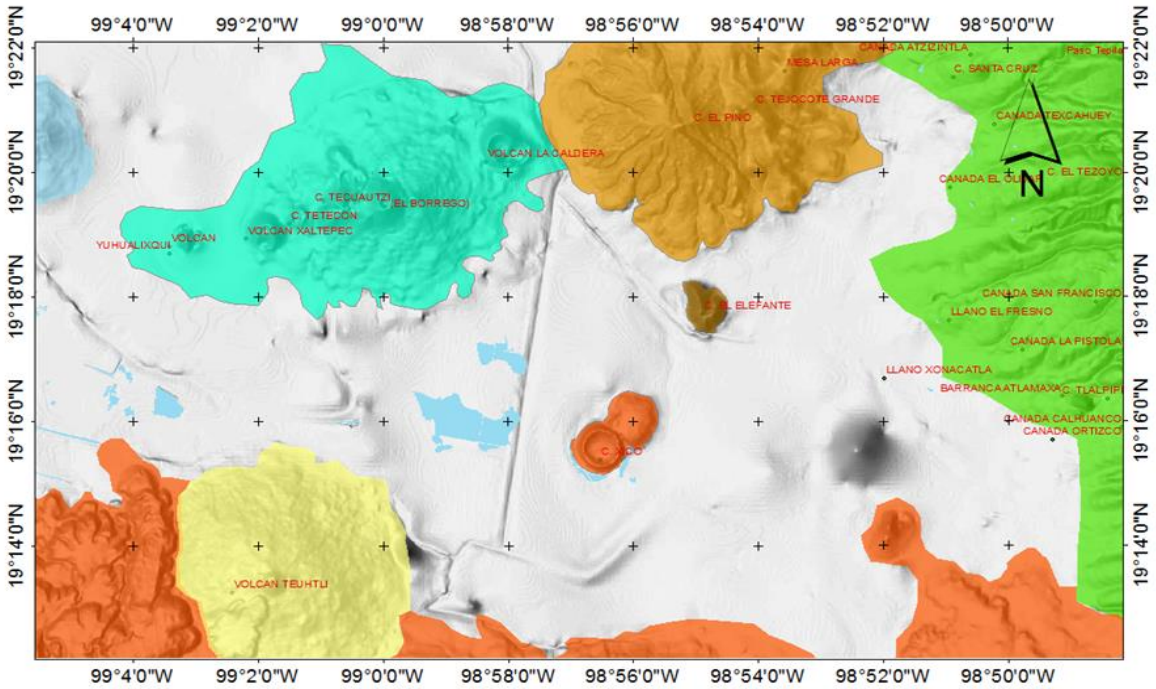


Figura 40. Localización de cuerpos volcánicos en las inmediaciones del Lago Tláhuac-Xico.

2.7.11 Estratigrafía Valle de México

Son varios los estudios que definen la estratigrafía de la Cuenca del Valle de México, y dada la compleja geología de la Cuenca del valle de México, donde se ubica la subcuenca de Chalco, se optó por describir de forma general la estratigrafía completa de la zona.

Dentro del Valle de México, las rocas más antiguas corresponden a una secuencia de rocas Mesozoicas correlacionable con las Formaciones Morelos, Cuautla y Mezcala, las cuales fueron identificadas durante las perforaciones realizadas por PEMEX en el año 1988, estas a su vez se encuentran parcialmente cubiertas por materiales clásticos continentales del Terciario Inferior pertenecientes al Grupo Balsas.

Hacia el poniente, en el área de Mixcoac se tienen dos pozos profundos perforados por la extinta DGCOH en la década de los sesenta: denominados “Castañeda 5” y “Castañeda 6”, ambos presentan, no obstante, su cercanía, litologías diferentes.

El pozo “Castañeda 6” presenta desde la superficie y hasta los 282 metros de profundidad materiales granulares de relleno (arcillas, arenas y gravas) intercalados con depósitos volcanoclásticos y conglomerados, asociados con la “Formación Tarango”. Bajo estos materiales y hasta la profundidad total del pozo (1,123 metros) se presentan rocas de composición andesítica con intercalaciones de lentes de piroclásticos.

En el pozo “Castañeda 5”, las rocas andesíticas se encontraron hasta los 1,167 m de profundidad cubiertas por 230 metros de tobas, sobre estas secuencias se tienen los materiales de relleno de la Formación Tarango, conformados por arcillas, arenas y gravas e intercalados con depósitos volcanoclásticos y conglomerados.

Hacia el oriente se tiene el pozo 2 “San Juan de Aragón”, con 1,354 metros de profundidad, presenta otra condición litológica donde los materiales generados en facies lacustres se encuentran entre 0 a 92 m, mismos que se encuentran sobreyaciendo a materiales granulares que se encuentran entre los 92 a 442 metros de profundidad, y estos a su vez descansan sobre tobas de los 442 a los 507 m; mientras que a una profundidad de 800 metros se cortaron rocas volcánicas de tipo “basáltico” tanto derrames como materiales piroclásticos, tobas y cenizas. Cabe destacar que, en este pozo, no se reportan las rocas andesitas, indicando la gran potencia del relleno de la cuenca, tanto sedimentario como volcánico.

Al sur se cuenta con el pozo Tláhuac 3, con 1,222 m de profundidad, cortando 300 m de depósitos lacustres con pequeñas intercalaciones de derrames basálticos, subyaciendo se tienen rocas volcanoclásticas predominando las intercalaciones de derrames basálticos entre los 300 y 700 m. Desde los 700 m y hasta la profundidad total del pozo se tienen 132 metros de boleos y gravas, 90 m de tobas finas y 300 m de tobas compactas.

En la porción norte se tiene el pozo 4 “San Joaquín”, presenta 200 m de materiales de relleno (Formación Tarango), descansando sobre 320 m de andesitas que descansan sobre materiales volcanoclásticos (tobas y arenas) intercalados con gravas las que sobreyacen a las andesitas basálticas.

2.7.11.1 Secuencia estratigráfica local Subcuenca de Chalco

Análisis e interpretación de Estudios previos

Durante los años 1987-1989 se realizaron perforaciones exploratorias en la zona de interés de las cuales se recuperaron y analizaron los 25 metros superiores de la secuencia litológica sedimentaria del Lago Tláhuac-Xico. De acuerdo con Lozano-García et al. (2017), de los resultados del análisis de las primeras perforaciones se identificaron cambios importantes en el sistema lacustre, en la cobertura vegetal de la cuenca, así como evidencias de la actividad volcánica pasada. En la Figura 41 se muestran las ubicaciones de las perforaciones realizadas en la zona.

Posteriormente, en 2008 de acuerdo con los mismos autores, fueron perforados 122 metros superiores de la secuencia lacustre en donde se recuperaron sedimentos lacustres en los que dominan facies clásticas (limos y arcillas) con abundantes restos orgánicos (diatomeas, polen, ostrácodos, etc.), intercalados con depósitos volcanoclásticos, se señala en el informe que los sedimentos lacustres se presentan mayormente masivos en los primeros 90 metros y laminados de los 90 a 122 metros de profundidad (Lozano-García et al., 2017).

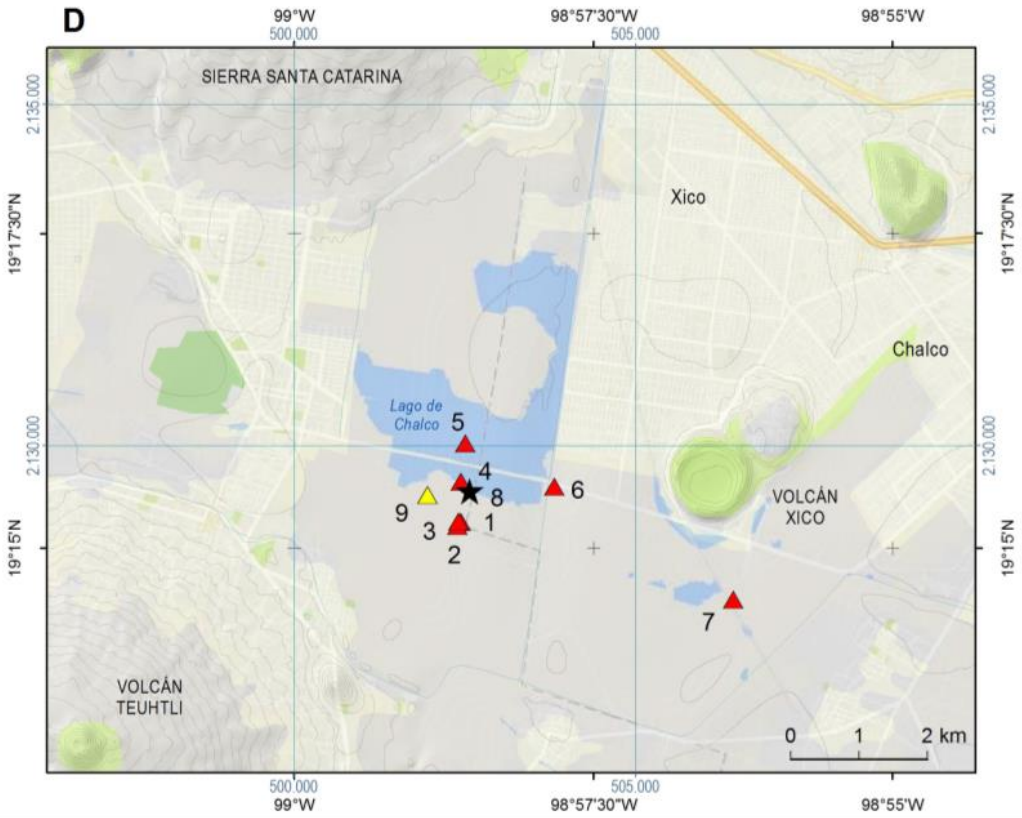


Figura 41. Localización de perforaciones realizadas en la zona del Lago Tláhuac-Xico en Lozano-García et al., 2017.

Se colectaron en el año 2008 cinco núcleos de sedimentos lacustres, en un sitio próximo al depocentro de la cuenca de Chalco, sobre las coordenadas (19° 15' 13" N, 98°58' 39" O), al SE de

la ciudad de México (Lozano-García et al, 2017; Herrera-Hernández, 2011). En ellos se recuperó un total de 209 metros de sedimentos, hasta una profundidad de 122 metros (Figura 42).

Herrera-Hernández (2011), identificó en la secuencia recuperada 12 facies sedimentarias, mismas que se agruparon en tres categorías de acuerdo con su composición y características genéticas, de esta forma el perfil geológico es:

a) facies detríticas y volcanoclásticas (limo, arcilla, ceniza y lapilli), ampliamente distribuidas en la secuencia e interestratificadas con las facies biogénicas y química, ~0 a 95 metros de profundidad.

b) facies biogénicas (representadas por ooze de diatomeas y de ostrácodos), repartidas principalmente entre ~95 y 122 m y de ~20 a ~40 m de profundidad, y

c) facies químicas (sedimentos compuestos principalmente por minerales autígenos, como calcita, aragonita, siderita, etc.), distribuida entre 115 y 122 m de profundidad.

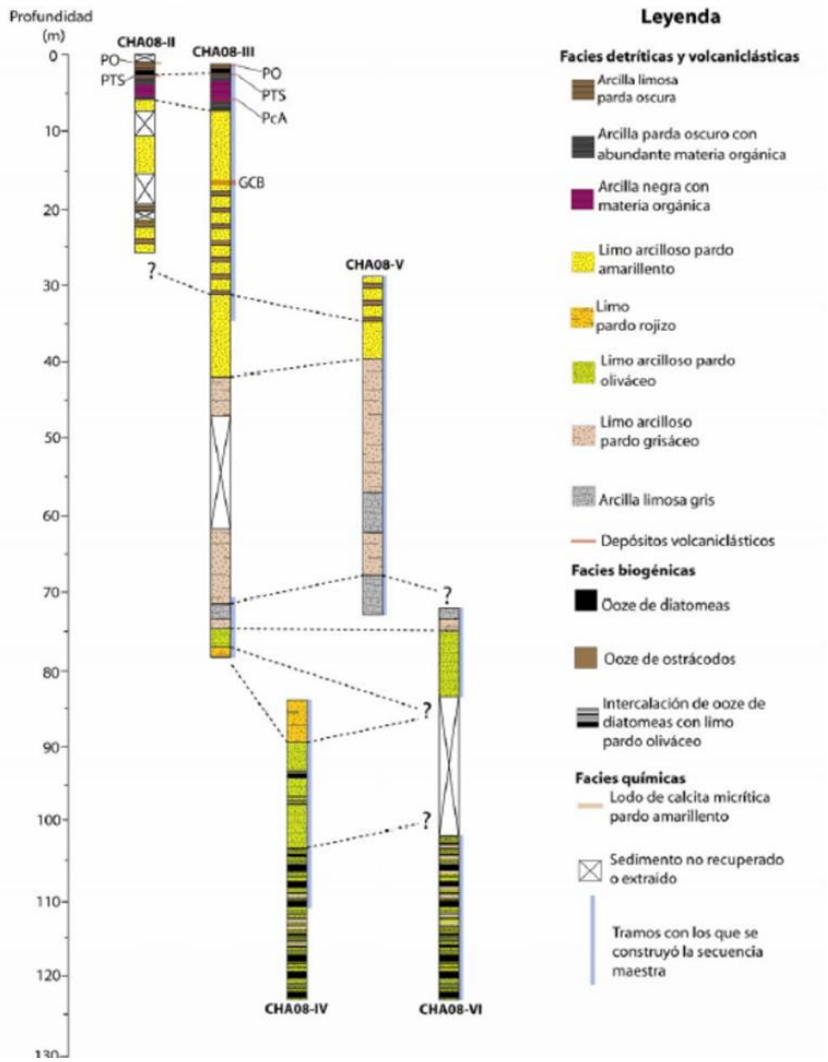


Figura 42. Facies identificadas en los núcleos de Chalco. Tomado de Herrera-Hernández, 2011.

Para el año 2014 y en 2015 se llevó a cabo la perforación de 521 m, que de acuerdo con ellos corresponde con la totalidad de la secuencia sedimentaria lacustre en Chalco, realizado durante los meses de febrero y marzo del 2016 (Lozano-García et al, 2017).

Dentro de las actividades realizadas durante ese trabajo destaca la realización de estudios de sísmica activa, con el fin de estimar los espesores y la arquitectura del paquete sedimentario lacustre en la subcuenca de Chalco y guiar una adecuada selección del sitio de perforación. El trabajo de campo cubrió un área de aproximadamente 8 km^2 y consistió en registrar 30 minutos de ruido sísmico ambiental en 68 sitios de la zona de estudio, divididos en dos mallas equiespaciadas a 250 m y 500 m (Lozano-García et al., 2017; Vergara-Huerta, 2015).

Los modelos resultantes de estos trabajos, mostraron un primer aumento de la resistividad eléctrica a una profundidad aproximada de 100 a 120 m, el cual es asociado a un cambio de composición del sedimento que puede estar relacionado al incremento de sedimentos volcanoclásticos. Un segundo aumento de la resistividad a profundidades entre 300 y 400 metros corresponde con otro cambio importante en la composición del sedimento, asociado con el límite inferior de los depósitos de sedimentos lacustres y la presencia de depósitos volcanoclásticos y coladas de basalto (Lozano-García et al., 2017; Vergara-Huerta, 2015).

De estos trabajos los autores, concluyen que, aproximadamente los 260 m superiores de la secuencia están dominados por materiales clásticos de grano fino, primordialmente de origen lacustre ricos en microfósiles, intercalados con horizontes de origen volcánico. Entre 260 y 300 m los sedimentos están constituidos por material clástico más grueso intercalados con horizontes finos, posiblemente intercalaciones de depósitos de origen fluvial y lacustre (Lozano-García et al., 2017).

Por debajo de los 300 m los depósitos están constituidos por unidades volcanoclásticas con intercalaciones de flujos de lava y conglomerados aluviales, localmente alterados por hidrotermalísmo entre 512 y 520 m de profundidad (Lozano-García et al., 2017).

2.7.11.2 Geología superficial y subterránea cuenca de Chalco

De acuerdo con Urrutia y Chávez (1991) la subcuenca de Chalco ocupa un semi-graben con orientación NNE-SSW, marcando una discontinuidad en profundidad con las estructuras volcánicas Xico y Tlapacoya. El relleno vulcano-sedimentario de la subcuenca de Chalco está compuesto por depósitos clásticos de origen aluvial y lacustre, localmente intercalados con productos volcánicos de origen piroclástico; en donde el espesor varía con la paleomorfología.

Los depósitos lacustres consisten en arenas, limos y arcillas derivadas de la alteración de brechas y ceniza volcánica (Campos-Enríquez et al., 1997) y la acumulación de sedimentos lacustres ortoquímicos.

Desde el punto de vista estratigráfico el relleno vulcano-sedimentario descansa sobre tres unidades litológicas, de la base hacia la cima estas unidades son: la Unidad de Calizas del Cretácico, la Unidad Volcánica Inferior (UVI) y la Unidad Volcánica Superior (UVS). Con base en la información obtenida de las perforaciones realizadas por PEMEX, específicamente de la obtenida del pozo Tulyehualco-1 ubicado dentro de la subcuenca de Xochimilco, las profundidades a las que se han localizado estas unidades litológicas son: 2650 m, 1700 m y 445, m, respectivamente (Pérez-Cruz, 1988; Campos-Enríquez et al., 1997).

De acuerdo con Campos-Enríquez et al., (1997) y Krivochieva y Chouteau (2004) el relleno vulcano-sedimentario de la subcuenca de Chalco que sobreyace a las unidades volcánicas estaría constituido por dos unidades litológicas, estas unidades corresponderían a la Unidad de Arcillas Lacustres (UAL), dichas unidades se describen a continuación:

- Unidad A: Consiste en cenizas y arena volcánica intercaladas con arcillas, esta unidad tiene un espesor promedio de 100 m, dentro de esta unidad se ha registrado la presencia de flujos volcánicos.
- Unidad B: Se trata de una secuencia de gravas de origen volcánico con intercalaciones de delgados horizontes arenosos y arcillosos, se estima que esta unidad tiene un espesor de entre 100 y 200 m.
- Unidad C: En la base se tienen rocas volcánicas fracturadas y sanas correspondientes con basaltos, esta última unidad litológica forma parte de la Unidad Volcánica Superior.

Al correlacionar los resultados de los trabajos señalados y del trabajo "Modelo de velocidad sísmica en la subcuenca de Chalco, Edo. de México, mediante análisis de cocientes H/V de vibraciones ambientales", de Vergara-Huerta (2015), se confirma dicha sección esquemática, conforme las secciones geológicas realizadas (Figura 43).

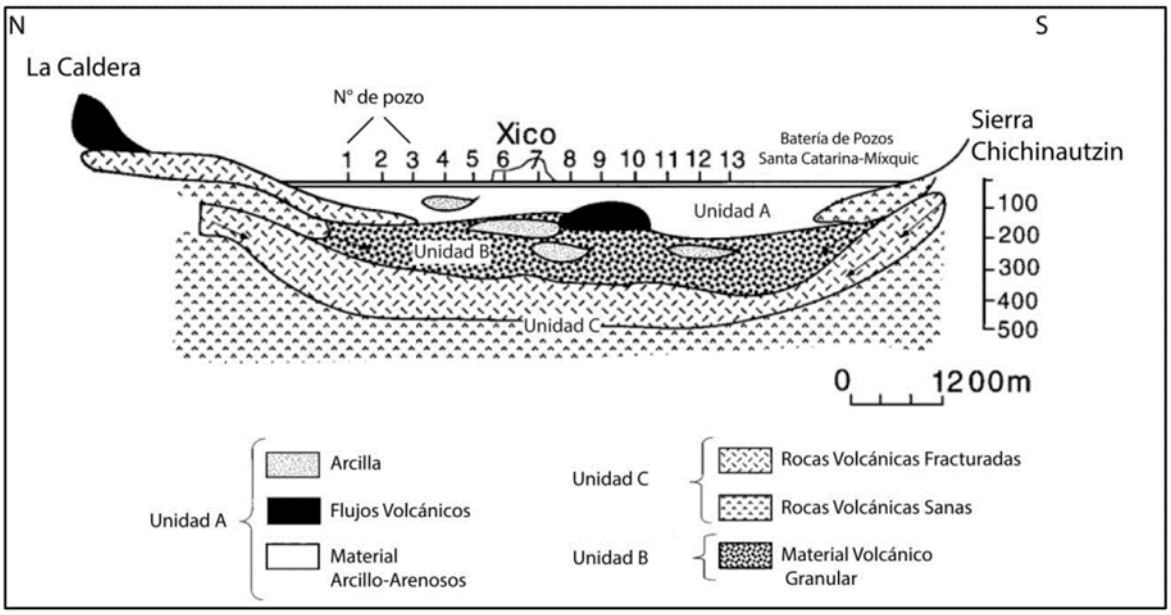


Figura 43. Sección geológica de la batería de pozos Santa Catarina-Mixquic tomado de Vergara Huerta F. (2015)

En el trabajo de Vergara-Huerta (2015) las secciones geológicas se trazaron considerando el arreglo de los puntos de registro de vibración ambiental. En total se elaboraron 9 secciones geológicas, de las cuales 5 se hicieron en dirección NE-SW y 4 en dirección NW-SE.

La Interpretación de la sección E1-E1'; muestra un panorama general del espesor y la distribución de las unidades litológicas, se puede apreciar que los depósitos disminuyen en dirección NW y se acuñan en dirección SE, mientras que en la parte central el depósito tiene espesores menores a 300 metros. Figura 44.

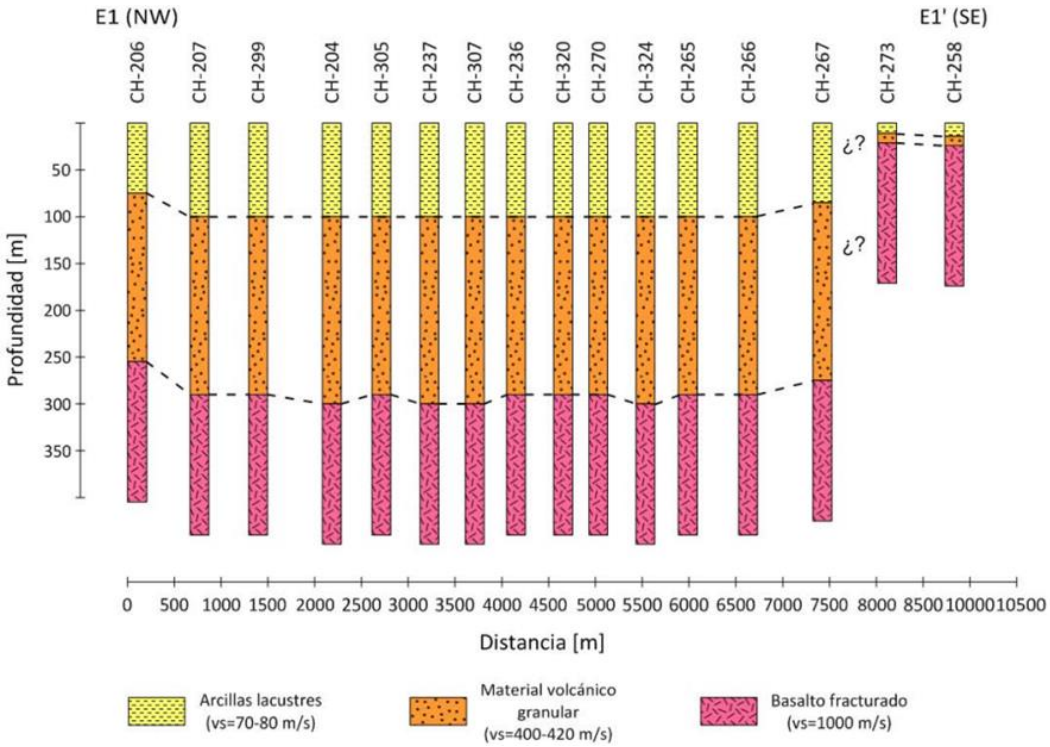


Figura 44. Interpretación litológica de la zona del Lago Tláhuac-Xico, Vergara-Huerta (2015).

2.7.12 Consideraciones geológicas

Para los propósitos planteados, el área de estudio fue dividida en 4 zonas o cuadrantes, utilizando como líneas de división el camino de operación de la batería de pozos de extracción Mixquic, que corre casi norte-sur y el trazo de la calzada Tláhuac-Chalco, en dirección este-oeste, la clasificación se distribuyó en sentido de las manecillas del reloj e inicia en la porción sureste del lago, Figura 45. Las cuales, coinciden con las zonas de estudio delimitadas previamente.

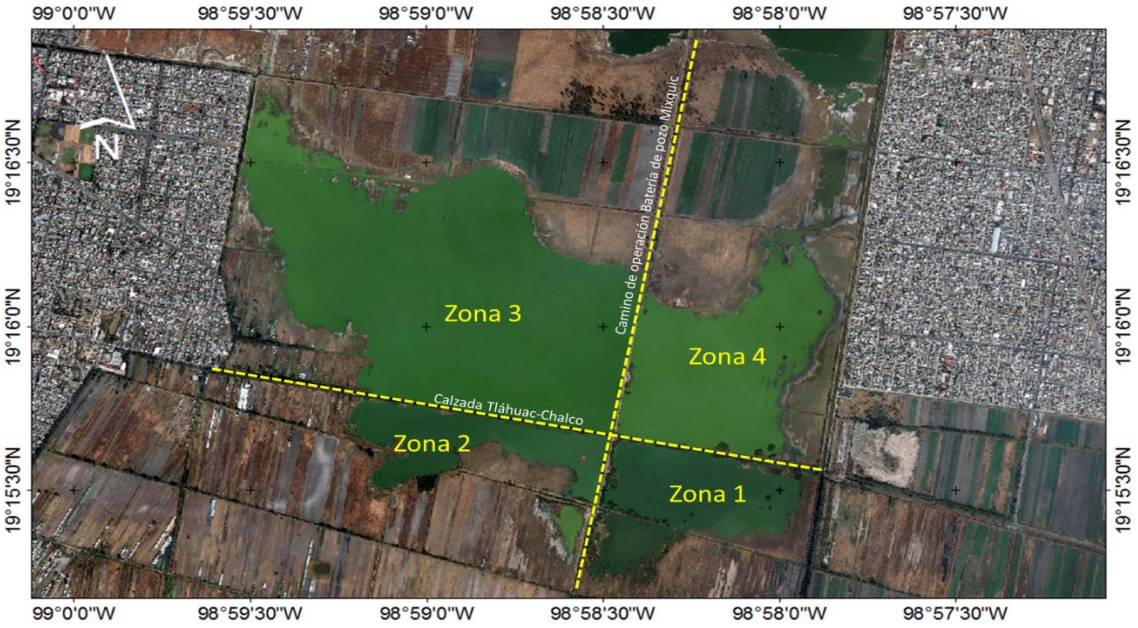


Figura 45. Delimitación del Lago Tláhuac-Xico, por zona, Elaboración propia, con base en Google Earth, (2020).

2.7.12.1 Reconocimientos geológicos de la zona

Se realizaron recorridos de carácter geológico y geohidrológico sobre la zona del Lago, cubriendo los cuatro cuadrantes, señalados, así como en las inmediaciones fuera de la zona del Lago Tláhuac-Xico. Identificando las características geológicas y sus relaciones de campo en la zona.



Figura 46. Zonas lacustres y áreas de cultivo

Se verificó a nivel superficial la existencia de suelo residual y amplias zonas preparadas para el cultivo, así como la presencia de sedimento de origen lacustres en las inmediaciones del Lago (Figura 46).

Se observó la presencia de material de relleno y escombros de construcción, principalmente hacia los extremos del lago en las inmediaciones de las zonas urbanizadas, principalmente hacia la zona 2 y 1, así como en la mayor parte de los caminos de la zona.



Figura 47. Secuencia lacustre superficial

En la Figura 47 se muestra, un corte del terreno en donde se logró identificar en una sección de aproximadamente 2 metros de espesor, la presencia de una secuencia estratigráfica de materiales lacustres, con capas delgadas de apenas algunos centímetros, conformadas por limos, arcillas y arenas limosas, dispuestas totalmente de forma horizontal.

Con base en las observaciones realizadas durante los recorridos de campo es claro, que la zona que conforma la planicie lacustre donde se localiza la zona del Lago Tláhuac-Xico y en sus inmediaciones se caracteriza por la presencia de secuencias sedimentarias concordantes granulares de limos arcillas y arenas finas, de origen lacustre.

2.7.12.2 Geología Estructural

Durante los recorridos geológicos de campo se trató de identificar la existencia de zonas o planos de debilidad, fallas o fracturas en el terreno, que pudieran estar afectando de forma directa la zona del Lago Tláhuac-Xico. Durante esta actividad no se identificaron estructuras geológicas que pudieran ser asociadas a planos de debilidad en la zona. No obstante, cabe señalar que toda la zona de estudios esta impactada por procesos antropogénicos, (urbanización y zonas de cultivo) que pudieran estar enmascarando estas estructuras.

El resultado de estas actividades durante el mes de febrero del año 2022, no se detectaron lineamientos ni grietas en la zona, no obstante, cabe señalar que en estudios anteriores se reporta la aparición de grietas en la porción oriental del lago en la denominada zona 2, prácticamente en las zonas aledañas al área urbanizada.

A nivel regional, la subcuenca de Chalco cuenta con una superficie de 1,100 km^2, se encuentra delimitada al este por la sierra Nevada, al norte por la sierra de Santa Catarina y al sur por la sierra Chichinautzin; está conformada por un graben con dirección ENE–OSO, en el cual la sierra de Santa Catarina y los volcanes Teuhtli y Topilejo forman una falla normal de N a S respectivamente (Vázquez Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; Rodríguez-Chávez, 2003);

además se caracteriza por un alto estructural de orientación NE–SO, que coincide con el alineamiento de los volcanes Xico y Tlapacoya, que forma la división del graben en dos cuencas E y O (Urrutia-Fucuguachi y Chávez-Segura, 1991; Campos Enríquez et al., 1997), según los últimos estudios la secuencia sedimentaria lacustre abarca alrededor de 260 m (Lozano-García et al., 2017), Figura 44.

En la Figura 48 se observa el reporte de fallas en las inmediaciones flanqueando un graben en la zona de Lago Tláhuac-Xico, sin embargo, se debe señalar que no existe evidencia a nivel superficial de la presencia de elementos que evidencia la existencia de estas fallas. No obstantes estas fueron identificadas a través de métodos indirectos, mediante la exploración geofísica.

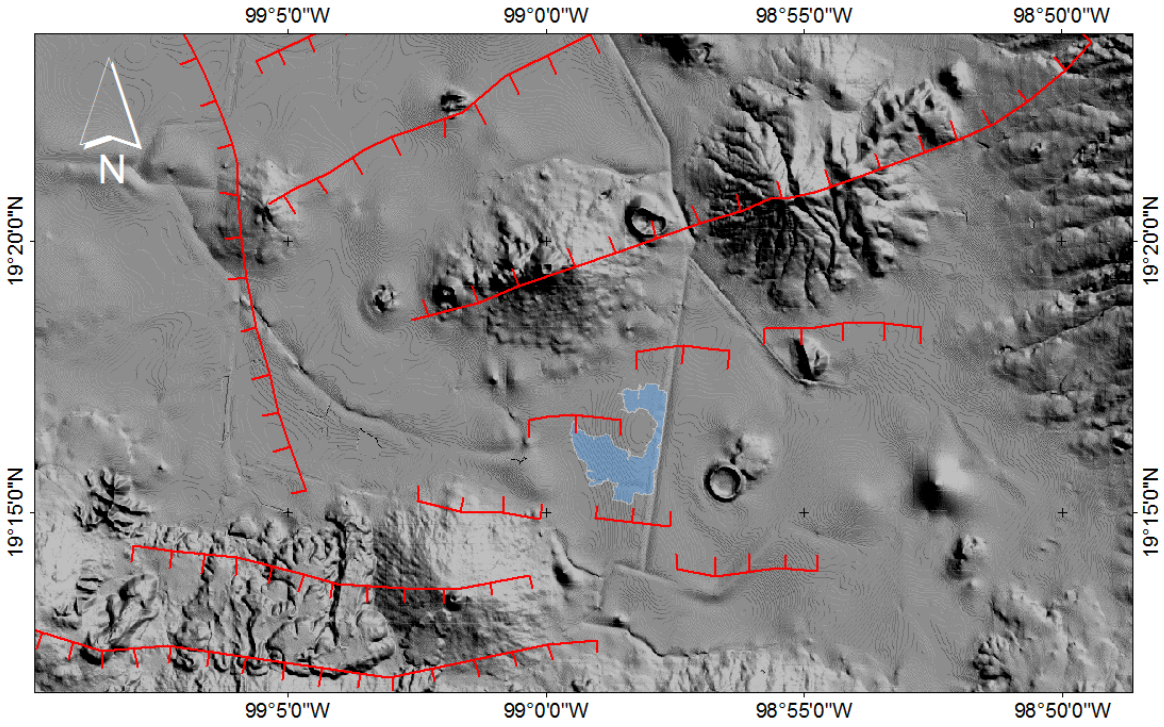


Figura 48. Trazo de fallas reportadas en estudios realizados previamente en la zona

2.7.12.3 Unidades Geológicas Locales

Las descripciones litológicas que se conocen de la subcuenca de Chalco comprenden rocas volcánicas y depósitos de origen vulcano-sedimentario. Las rocas volcánicas presentes deben su origen a varios aparatos volcánicos (Ajusco, Iztaccihuatl, Popocatepetl, Xitle, etc.), los cuales tuvieron actividad a lo largo de diferentes épocas geológicas. Así mismo, se encuentran rocas del Mioceno- Pleistoceno (andesitas, dacitas, riolitas) de la Sierra Nevada; del Plioceno-Pleistoceno (basaltos, andesitas) propias de la Sierra Santa Catarina; y para el Cuaternario (basaltos, andesitas) en la Sierra Chichinautzin.

La estratigrafía de Chalco es poco conocida, sin embargo, Ortega-Guerrero (1992) establecieron detalladamente la descripción de los primeros 26 m de la secuencia lacustre para la porción central de la subcuenca de Chalco, consistiendo principalmente en intercalaciones de ceniza y limo. Por su parte, Herrera-Hernández en el año 2011, reconstruyó, mediante registros litológicos de pozos, la secuencia lacustre para la porción central de la

subcuenca hasta una profundidad de 122 m en las que identifico intercalaciones de arcillas y limos, descritos previamente.

2.7.12.4 Hundimientos locales

Hundimientos reportados en la zona de hasta 20 cm/año provocados por la extracción desmedida de agua subterránea (aproximadamente 10 m^3/s) a través de la batería de pozos Santa Catarina Mixquic localizada sobre la planicie lacustre de Chalco, están llevando a la reaparición del antiguo lago de Chalco, el cual de seguir con estas tasas de hundimiento y extracción de agua se estima podría incrementarse el riesgo por inundación de las zonas urbanas pertenecientes a Tláhuac y Valle de Chalco (Ortiz y Ortega, 2007), así como de los asentamientos irregulares ubicados sobre la misma planicie lacustre.

2.7.12 Exploración Geofísica

Con los métodos eléctricos de prospección se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad basados en la caracterización resistiva del subsuelo. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con las nuevas técnicas de geofísica, es posible obtener una imagen lo más aproximado posible de las condiciones existentes del subsuelo.

Dentro de las secciones desarrolladas una vez procesada la información obtenida del subsuelo es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) generadas por estructuras geológicas, cambios de facies, contactos litológicos y fracturamiento de la roca, donde además la presencia del agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad que es el parámetro experimental medido en campo. Para el procesamiento de los datos se siguieron los estándares recomendados por el Colegio de Geofísicos de México.

En el área de estudio se realizaron 4 Sondeos Eléctricos Verticales en modalidad Schlumberger (SEV) con aberturas electródicas (AB/2) comprendidas en el intervalo de 1 a 300 metros con el fin de determinar la estratigrafía presente en el subsuelo, hasta una profundidad aproximada de 100 metros; así mismo se realizó el levantamiento de 15 líneas de exploración geoeléctrica (LCG) con arreglo Polo-Dipolo de 140 metros de longitud, para detallar la continuidad litológica a profundidad y ubicación de posibles planos de debilidad y/o zonas anómalas.

La ubicación de cada uno de los trabajos de campo se distribuyó espaciadamente en el terreno, determinados durante los recorridos geológicos realizados en la zona; colocando hacia los extremos longitudinales, los SEV's, con el fin de lograr una buena cobertura que permitiera obtener un modelo estratigráfico representativo a profundidad, de forma tal que se pudiera identificar la posible existencia de estratos poco permeables y/o deformables, así como su espesor y distribución espacial en los primeros 100 m de profundidad.

Del mismo modo y con objeto de caracterizar a detalle el grado de fracturamiento, permeabilidad o presencia de posibles discontinuidades y/o anomalías, se realizaron 15 LCG con longitudes de 140 metros distribuidas a todo lo largo y ancho del terreno en estudio.

Estas LCG se levantaron utilizando el dispositivo asimétrico Polo-Dipolo, debido a que es uno de los más adecuados para la detección indirecta de posibles cavernas, grietas o

discontinuidades, determinándose su trayectoria, génesis, profundidad y ancho de afectación, así como evaluar el riesgo potencial que representan para el proyecto. Los dipolos o estaciones de medición se realizaron con una separación de 4 m y en cada uno de ellos se tomarán lecturas al menos a 15 niveles con el fin de alcanzar profundidades mínimas de investigación del orden de 25 m, suficiente para caracterizar la estratigrafía somera y profundidad de las posibles grietas.

En el Anexo X se presentan la ubicación y coordenadas de los SEV´s y de los puntos iniciales y finales de las líneas de calicatas. Así como, evidencia fotográfica del proceso de levantamiento de datos.

2.7.12.5 Fundamentos del método de resistividad

Las técnicas geofísicas de exploración como el método geoeléctrico de resistividad, permite determinar la estratigrafía presente en el subsuelo, posición del nivel freático y algunas de sus propiedades físicas pueden ser naturaleza cohesiva o fracturamiento a través de la interpretación de los valores detectados. Este tipo de estudio se basa en las propiedades eléctricas de los materiales que constituyen el subsuelo del sitio, el cual tiene un comportamiento determinado al paso de la corriente eléctrica. Dicho comportamiento se manifiesta en líneas de campo o flujo eléctrico constante para materiales homogéneos, por ello cuando los valores y características de estos campos varían, indican un cambio de materiales o una discontinuidad dentro de un mismo depósito.

Cada estrato del subsuelo presenta una resistividad característica que determina su espesor, posible litología y propiedades físicas como arcillocidad, fracturamiento, saturación, etc. En términos generales el método consiste en asociar los valores de resistividad y espesores calculados a estratos o Formaciones Geológicas propias del área, de tal manera que los menores a 15 Ohm-m de resistividad corresponden a materiales arcillosos, los comprendidos en el intervalo de 15 a 25 Ohm-m a materiales limosos, de 25 a 40 Ohm-m a materiales areno-limosos, de 40 a 90 Ohm-m a materiales arenosos, de 90 a 400 Ohm-m a materiales gravosos y mayores a 400 Ohm-m a presencia de roca, dentro de estos últimos los de muy alta resistividad pudieran estar asociados a grandes fracturamientos, y por consiguiente muy alta permeabilidad.

Las cavernas, fracturas, grietas, caliches, rellenos artificiales, etc. se caracterizan por presentar valores de alta resistividad, mientras que las zonas arcillosas o con altos contenidos de humedad o presencia de sales corresponden con anomalías o valores de baja resistividad. Cabe hacer notar que la distribución y forma de las curvas de isorresistividad también es importante puesto que indican si la estratificación, la poca variación de resistividad determinan la homogénea del material o bien se encuentran presentes estructuras que distorsionan el comportamiento esperado para una estratificación normal.

No obstante, la simplicidad del método, la interpretación de los datos puede cambiar radicalmente si no se tiene bien establecido el marco geológico de referencia, el cual de acuerdo con la experiencia repercute directamente en la asignación de las anomalías detectadas, es por ello por lo que la integración de información entre geofísica y geología, en este tipo de trabajos es muy importante y determina la directriz principal de las exploraciones.

Las experiencias adquiridas al aplicar esta metodología en la exploración de cavernas, oquedades, rellenos artificiales y zonas de debilidad en las tobas que conforman el subsuelo

de las zonas de transición en diferentes Ciudades del Eje Neovolcánico, indican buena resolución, debido que existe un alto contraste resistivo entre las zonas de discontinuidad y la roca encajonante.

Operacionalmente, los métodos eléctricos de resistividad en DC consisten en inyectar corriente al terreno mediante dos electrodos que son clavados o hincados en el mismo, conocidos como “A” y “B“; el campo eléctrico así generado se monitorea a través de mediciones de diferencias de potencial ΔV entre otros dos electrodos, conocidos como “ M “ y “ N “.

El cociente de la corriente inyectada I entre la diferencia de potencial ΔV multiplicado por K, que es la constante geométrica del arreglo empleado, determina el valor del parámetro medido conocido como resistividad aparente, en unidades Ohm-m y que físicamente representa la dificultad que encuentra la corriente eléctrica para fluir a través de un material. Cada posición de los electrodos de corriente y potencial implica valores diferentes en las mediciones de corriente eléctrica “I“, diferencia de potencial o voltaje ΔV y constante geométrica K, parámetros que intervienen en la determinación de la resistividad aparente mediante la siguiente expresión:

$$\rho = (\Delta V / I)\, K$$

donde:

ρ = Resistividad aparente (Ohm-m)

ΔV= Diferencia de potencial (mV)

I = Corriente inyectada (mA)

K = Constante geométrica del arreglo (m)

La geometría de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), fue la siguiente: dos electrodos A y B son simétricamente colocados a partir de un centro, el cual es considerado como el punto de atribución de la lectura. Los electrodos M y N se colocan colineal y simétricamente en la parte interna de los electrodos A y B, con una separación mucho menor, Figura 49.

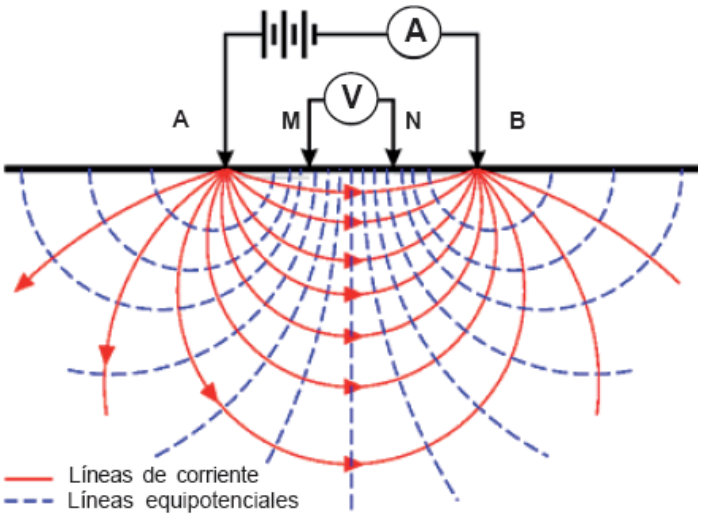


Figura 49. Líneas de corriente (en línea llena) y potencial (líneas a trazos) generadas en el SEV.

Cada posición de los electrodos de corriente y potencial implica valores diferentes en las mediciones de corriente eléctrica "*I*", diferencia de potencial o voltaje ΔV y constante geométrica *K*, parámetros que intervienen en la determinación de la resistividad aparente.

Para determinar la continuidad lateral y a profundidad de los diferentes paquetes que constituyen el subsuelo somero, se decidió realizar la exploración a través de dispositivos asimétricos, como son las Líneas de Calicateo Geoeléctrico (LCG), también conocidas como Tomografía Eléctrica, consisten en recolectar mediciones de resistividad aparente a lo largo de líneas rectas y con separaciones en planta y profundidad reducidas utilizando dispositivos asimétricos como el Polo-Dipolo, debido a que es uno de los más adecuados para la detección indirecta de cuerpos, cavernas, grietas, plumas contaminantes, estructuras o planos de debilidad en el subsuelo. Este tipo de estudio se basa en las propiedades eléctricas de los materiales que constituyen el subsuelo del sitio, el cual tiene un comportamiento determinado al paso de la corriente eléctrica. Dicho comportamiento se manifiesta en líneas de campo o flujo eléctrico constante para materiales homogéneos, por ello cuando los valores y características de estos campos varían, indican un cambio de materiales o una discontinuidad dentro de un mismo depósito o paquete litológico.
Los dipolos de potencial MN se realizan con una separación que depende de la profundidad y detalle deseado, siendo común en trabajos de exploración geotécnica de 2 a 5 m. En cada uno de ellos se toman lecturas de 6 a 15 niveles con el fin de alcanzar profundidades de investigación de aproximadamente la tercera parte de la profundad teórica máxima alcanzada en cada punto medido y que resulta de la intersección de líneas hipotéticas con inclinación de 45° que parten de los centros de los dipolos de corriente y potencial, como se indica en la siguiente Figura 50.

Los valores de resistividad aparente se exportan a un formato especial para ser leídos por el programa RES2DINV(MR). A través de iteraciones se inicia el proceso conocido como inversión del modelo, el cual consiste en generar un modelo de espesores y resistividades reales, el modelo resultante del proceso se correlaciona con el marco geológico de referencia establecido previamente.

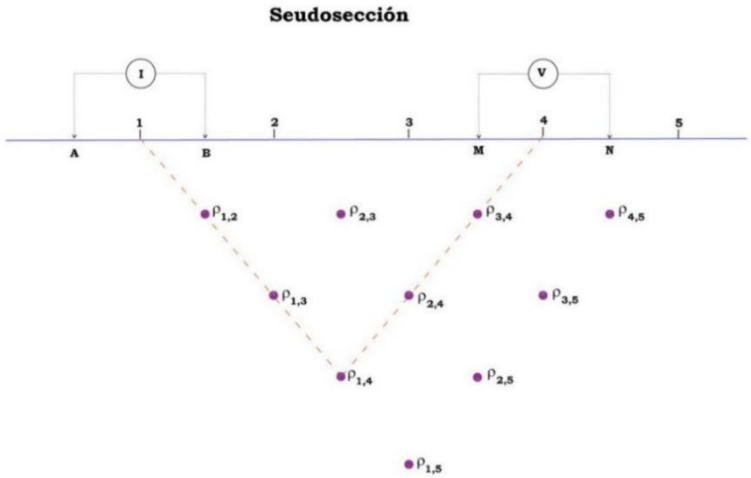


Figura 50. Configuración seudosección

2.7.12.6 Recolección de datos

Así pues, los SEV se distribuyeron espaciadamente en el terreno (Anexo X), colocándose con el fin de lograr una buena cobertura que permitiera obtener un modelo estratigráfico representativo a profundidad, es decir, que informara de la posible existencia de estratos poco permeables y/o deformables, su espesor y distribución en los primeros 100 m de profundidad. La Figura 51, presenta la ubicación de los SEV´s y la distribución de las líneas de calicatas realizadas en el predio.

La obtención de registros se realizó con un equipo automático Ares G-5, de 1100 Vpp, capaz de inyectar al terreno pulsos de 2 Amper, el cual promedias lecturas de 4 a 32 por estación o punto de medición, pulsos de diferente frecuencia hasta que los valores son muy similares (desviación estándar mínima) y obtiene un promedio, proceso que evita la influencia de corrientes parásitas o remanentes.

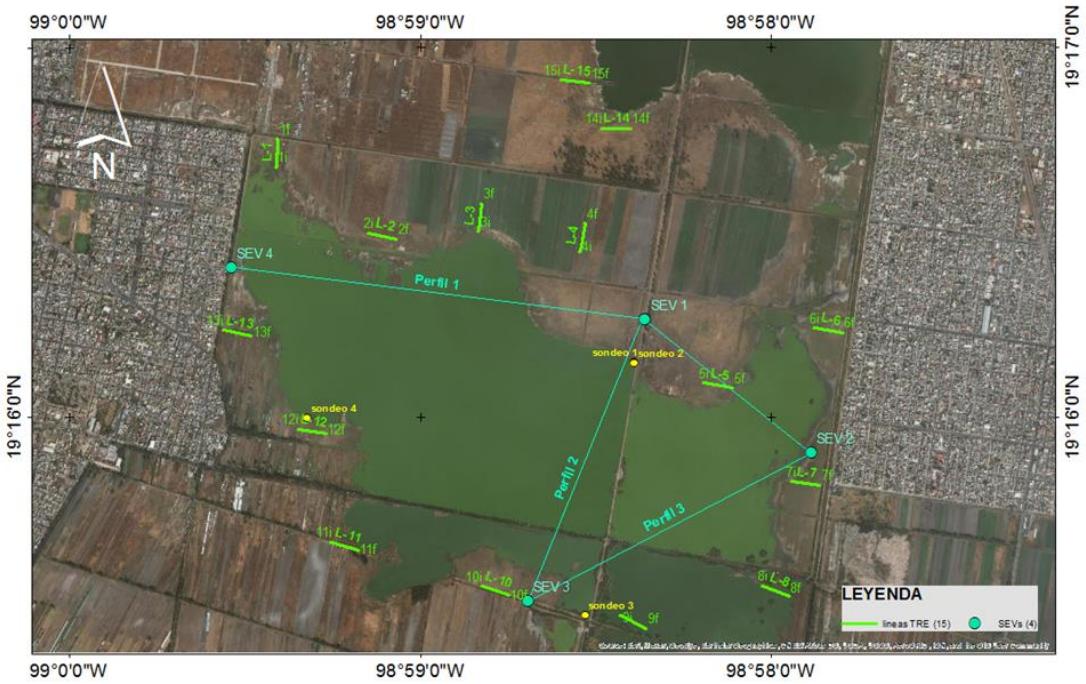


Figura 51. Localización Líneas de Calicateo Geoeléctrico (LCG) y SEV. Elaboración propia, base Google Earth

Como se mencionó previamente, los datos fueron procesados utilizando el programa RES2DINV (MR), en el que se indican el número de electrodos utilizados en cada sección. De esta forma, a través de iteraciones se inicia el proceso conocido como inversión del modelo, el cual consiste en generar un modelo de espesores y resistividades reales, el modelo resultante del proceso se correlaciona con el marco geológico de referencia establecido previamente.

El levantamiento de campo se inició con el registro de datos para cada SEV, posteriormente se obtuvieron los valores de resistividad aparente en cada estación y se graficaron los valores de Rhoa en papel bilogarítmico. En gabinete se procedió al procesamiento de la información de acuerdo con lo siguiente:

1. Verificación de los valores de resistividad aparente para cada SEV.
2. Análisis gráfico de las curvas de campo, con el objeto de determinar el número de capas por ciclo más idónea, para la curva suavizada interpretada por medios automáticos.
3. Modelación del sondeo mediante el uso del modelo del semiespacio estratificado en base a iteraciones con proceso de prueba y error, dentro del mismo paquete.
4. Ajuste automático del modelo obtenido en el paso anterior mediante el proceso "ridge regresión" y el criterio del error cuadrático medio mínimo entre los valores reales y la curva del modelo.
5. Formación de secciones de resistividad real contra profundidad, realizando interpolación de valores entre sondeos (mostradas en el perfil geoeléctrico).
6. Asignación de unidades electroestratigráficas de acuerdo con una correlación coherente con los resultados obtenidos de la modelación.
7. Interpretación de las unidades geoeléctricas en términos geohidrológicos, de acuerdo con la información geológica y geohidrológica existente, así como la teoría electromagnética.

2.7.12.7 Configuración de imágenes de resistividad

Este proceso consistió en la configuración de las secciones isorresistivas a partir de los resultados obtenidos de la inversión de los datos de campo, para establecer parámetros que permitan una mejor visualización de los resultados obtenidos, para ello se empleó el programa Surfer.

Mediante el módulo grid, se definen las características y parámetros de la rejilla de interpolación, empleando para ello el método kriging, esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón, es lineal porque los valores estimados se obtienen por combinación lineal de los datos disponibles, es centrado porque se construye para que la esperanza del error sea cero y es el mejor porque minimiza la varianza de la estimación.

En la última etapa se grafican las secciones isorresistivas, que describen el comportamiento de los campos eléctricos inducidos; en donde la geometría sigue la disposición de los estratos y/o estructuras existentes en el subsuelo, mientras que los valores de resistividad caracterizan su constitución litológica y/o condiciones físicas de los materiales, los cuales serán referidos al marco geológico de la zona, a registros de PCA y/o barrenos exploratorios realizados.

2.7.12.8 Procesamiento de datos SEV

Los resultados de campo se corrigieron por las variaciones laterales, propias de cada sitio de medición, y se interpretaron mediante técnicas gráficas, analíticas y programas de cómputo especializados a fin de obtener los modelos geoeléctricos representativos de las condiciones geológicas prevalecientes en el subsuelo.

Cada SEV se graficó en papel bilogarítmico para realizar la corrección por empalme y luego se llevó a cabo una interpretación gráfica que permitió inferir el modelo geológico preliminar del sitio, mediante este procedimiento fue posible estimar el número de estratos presentes

en el subsuelo, así como el grosor y resistividad de cada uno de ellos. Posteriormente, los datos de campo y parámetros de la interpretación preliminar se capturaron en el programa de cómputo IX1D (MR) para determinar con mayor precisión el número de estratos involucrados y sus características físicas. A partir de este proceso fue posible cuantificar el espesor y resistividad real de cada uno de los estratos presentes en el subsuelo de la zona, y construir las secciones geoeléctricas correspondientes. Los registros de campo, corregidos por empalme y procesados mediante esta técnica se muestran en el anexo correspondiente.

En su sentido más amplio la Tomografía Eléctrica es una técnica geofísica para el estudio del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del mismo dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde perforaciones. La Tomografía Eléctrica tiene por objetivo específico determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de exploración, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua.

De los SEV recolectados en campo se les aplicó las siguientes correcciones y procesos:

a) Los SEV de campo se corrigieron por las variaciones laterales, propias de cada sitio de medición, y se interpretaron mediante técnicas gráficas, analíticas y programas de cómputo especializados a fin de obtener los modelos geoeléctricos representativos de las condiciones geológicas prevalecientes en el subsuelo.
b) Una vez corregidos por variaciones laterales, los SEV se interpretaron mediante el uso de la paquetería RESIXP. Este programa afina el modelo estratigráfico elaborado inicialmente de acuerdo con el marco geológico de referencia y la interpretación cualitativa inicial.
c) En RESIXP se les dio limpieza a los archivos y se les preparó para efectuar el modelado en una dimensión con un máximo de 8 capas. Estos modelos, posteriormente se detallaron con ayuda del Winglink en modelos estratificados de 20 capas determinados mediante el proceso de inversión OCCAM, lo que permitió construir los perfiles Geoeléctricos también denominados Electro-estratificados. El Anexo geofisico muestra las curvas de campo procesadas por RESIXP y OCCAM.
d) Finalmente, con el uso del mismo paquete Winglink se construyeron configuraciones de resistividad en planta a diferentes profundidades (1, 5, 11, 15 y 22 m).

La integración de los resultados del reconocimiento geológico y prospección geofísica permitieron caracterizar el sitio estudiado, mediante el análisis de un perfiles o cortes electro-estratigráficos (Figuras siguientes), construidos a partir de la correlación de los espesores y resistividades arrojadas por los procesos de inversión, a través del uso del paquete mencionado previamente.

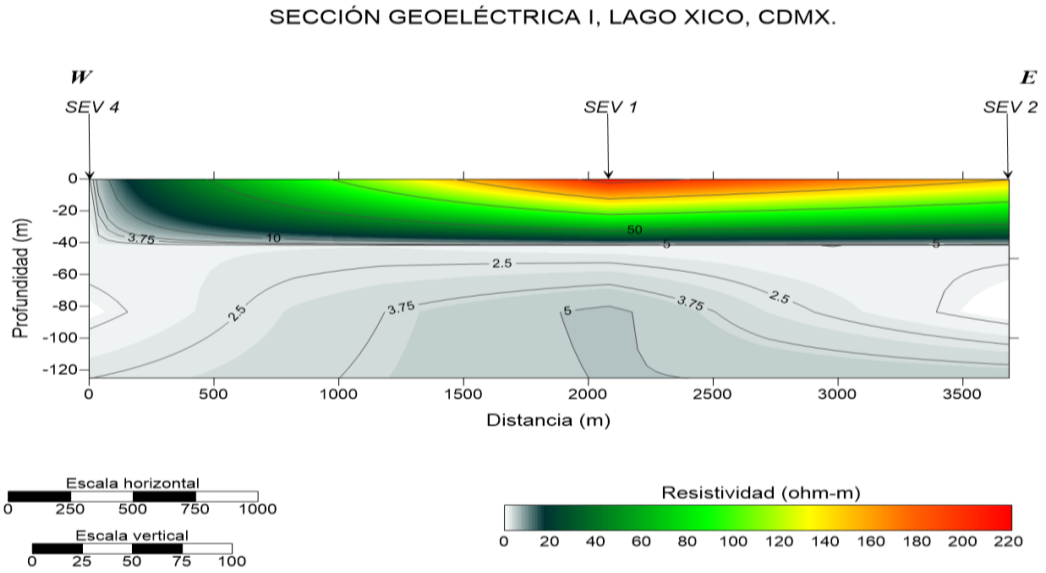


Figura 52. Perfil Electro-Estratigráfico 1, SEV- 4, 1 y 2.

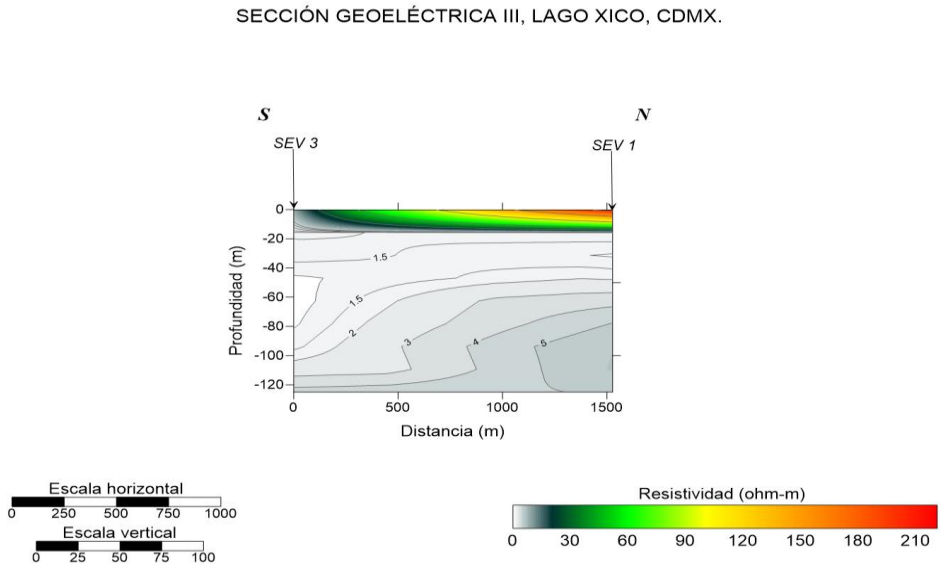


Figura 53. Perfil Electro-Estratigráfico 2, SEV-3 y 2.

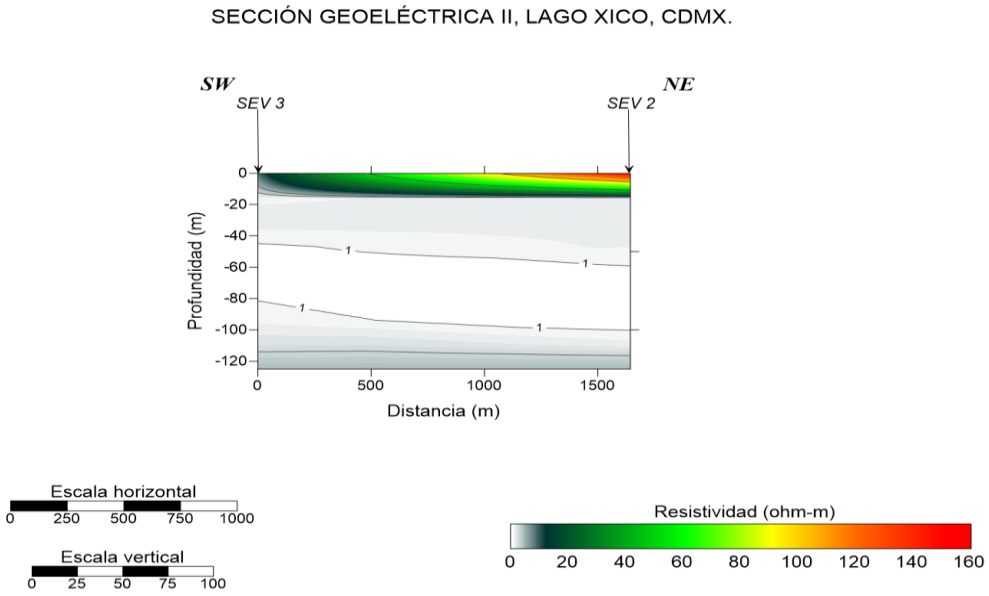


Figura 54. Perfil Electro-Estratigráfico 2, SEV-3 y 2.

Como se puede observar, cuatro son las capas, estratos o paquetes litológicos principales interpretados en los cortes o perfiles electro-estratigráficos mostrados en las Figuras, los cuales se describen a continuación:

1. El primero de ellos y más superficial presenta resistividades bajas e intermedias de 10 a 210 Ohm-m (colores verdes a rojos), correspondientes a materiales de cobertura y/o a formación de suelos constituidos por capa vegetal y suelos residuales de Tipo Limo-Arenoso, en estado medianamente compacto y con espesor variable de 1 a 3 m. Por su estado seco, alto contenido de finos y espesor reducido resultan deformables ante posibles fenómenos de subsidencia.
2. Subyaciendo al paquete anterior se presenta el segundo paquete con espesor de 10 m y resistividades bajas de 3 a 40 Ohm-m, indicativas de la presencia de arenas empacados en Arcillas y Limos en estado medianamente compacto, que en principio pudieran resultar deformables ante fenómenos de subsidencia por su alto contenido de finos.
3. Por debajo de los 2 paquetes anteriores, se presenta el tercer paquete litológico con espesor variable de 80 a 100 m y resistividades bajas e intermedias de 3.7 a 1 Ohm-m (colores grises), indicativas de materiales finos, por lo que seguramente está constituido por Arcilla Limosa de baja permeabilidad.
4.

2.7.12.9 Líneas de Calicateo Geoeléctrico

A partir de los resultados, se puede observar, que con esta técnica se alcanzaron profundidades de investigación del orden de 25 m; por lo que fue factible detallar las características de los materiales hasta esta profundidad, donde se observó que prácticamente toda la zona se caracteriza por la presencia de estratificaciones horizontales,

con valores bajos resistivos ubicados en el rango de 1 a 6 ohm-m. Secuencia que se ha asociado con la presencia de depósitos limo-arcillosos, de muy baja permeabilidad, los cuales conforme su respuesta eléctrica, es posible establecer, que presenten algún contenido de humedad, esta secuencia conforma un paquete de geometría irregular ampliamente distribuido en toda el área de estudio, condición acorde con los resultados de las perforaciones geotécnicas de exploración donde se reporta la presencia de arcillas hasta una profundidad de 15 metros.

Los valores bajos resistivos registrados en todas las secciones, de forma general, se asocian a depósitos aluviales y lacustres, conformando una secuencia estratigráfica homogénea de forma continua. Así mismo, se observa, la presencia de material de relleno heterogéneos aislados y saturados, que conforman un paquete de geometría irregular, al que se estiman con un espesor máximo de 1 a 2 metros, principalmente identificados en las secciones 1, 6, 7, 8 y 13. Cabe destacar, que estas secciones se encuentran en las inmediaciones de las zonas urbanizadas.

Dentro de este paquete no se detectaron anomalías verticales de alto gradiente que serían indicativas de muy alta permeabilidad por presencia de grietas, cavernas o discontinuidades importantes en el subsuelo; situación favorable para la factibilidad del proyecto.

De forma general se observa en las secciones dentro del estrato que va de 5 a 10 metros de profundidad la presencia de zonas (lentes irregulares), donde se presenta un incremento de resistividad, áreas donde alcanzan los máximos registrados de 5 a 6 ohm-m, las que configuran como lentes dispersos, se considera corresponde a zonas con mayor contenido de arenas y/o zonas con mayor compactación, este tipo de estructuras se encuentran ampliamente distribuidas en la zona de estudio. Estos lentes de arena fueron confirmados durante las perforaciones exploratorias realizadas.

Por debajo de los 10 metros de profundidad la secuencia litológica existente, se presenta de forma homogénea con valores de resistividad inferiores a 2 ohm-m, hasta alcanzar una profundidad total de exploración de 25 metros, prácticamente conformado una solo unidad litológica.

A la par, de la elaboración de las secciones, se realizó la integración de las imágenes de resistividad, horizontales a partir de las cuales se realzó la configuración que muestra la distribución de resistividades a diferentes profundidades (3 m, 5 m, 11 m, 15 m y 19 m), mismas que se presenta en el Anexo XI de este trabajo. Las configuraciones de los valores de resistividad en planta a diferentes profundidades corroboran lo anteriormente dicho en el análisis e interpretación de los Perfiles Electro-estratigráficos.

2.7.12.10 Interpretación general y análisis de resultados

En las imágenes de resistividad eléctrica se identificaron dos rangos principales asociados a las siguientes condiciones:

- Superficialmente se identifican altas resistividades del orden de 2 a 6 ohm-m, que definen un paquete regular que oscila entre 3 a 12 m de espesor ampliamente distribuido en la zona de estudio, se asocia con depósitos de arcillas limo-arenosa de regular permeabilidad y medianamente compactas.

- Subyaciendo a los materiales anteriores se registró un notable descenso de las resistividades oscilando de 0.9 a 2 ohm-m, se asocian a depósitos arcillo arenosos saturados de espesor no determinado.
- En el caso de los SEV's y sus secciones geoeléctricas I, II y III, construidas a partir de los sondeos eléctricos verticales presentan la misma secuencia estratigráfica con algunas diferencias que hay que considerar.
- Se identifica un horizonte superficial con resistividades de 10 a 220 ohm-m, con espesor variable de 15 a 40 m, se asocia a material areno arcilloso de permeabilidad media a alta, se correlaciona con el paquete somero identificado en las imágenes de resistividad (2 a 6 ohm-m), es importante mencionar que la diferencia de valores se debe en primer lugar el espaciamiento entre electrodos (cada 2 m, para el caso de la tomografía), mientras que los sondeos eléctricos verticales (SEV), presentan un mayor espaciamiento (1,1.5, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20,30, 40, 50, 70, 100, 150, 200 y 300 m), en tal diferencia de espaciamiento la relación de huecos entre ambos métodos es muy diferente, se puede decir que la distribución de huecos y zonas compactas son heterogéneas, de este contraste surge la diferencia de valores, sin embargo la geometría y espesores se encuentra en los mismos rangos.
- Por debajo de este paquete las resistividades registran un descenso llegado estas avalores de 1 a 5 ohm-m, que son muy similares a las registradas en las imágenes de resistividad, refleja que los depósitos arcillo arenosos son más homogéneos de ahí que las resistividades son muy próximas, el factor que hace homogéneo el comportamiento de las resistividades es la presencia de agua, por lo que se tiene la certeza de que es una zona saturada y conforma un paquete de espesor no determinado.
- A fin de poder visualizar de manera integral la distribución de resistividades en el área, se realizaron plantas a diferentes profundidades. Con estas configuraciones se identificó que los bajos resistivos asociados a condiciones de saturación presentan mayor desarrollo hacia el norte del área de estudio.
- Se puede concluir que existen 2 rangos de resistividad que caracterizan a los materiales o sus condiciones:
    - – 6 ohm-m, material arcillo arenoso parcialmente saturado.
    - 0.9 – 2 ohm-m material arcillo arenoso saturado
- El paquete con resistividades de 10 a 220 ohm-m, adopta estos valores debido a espaciamiento entre electrodos empleado en el SEV, que abarcan un mayor contraste de huecos heterogéneamente distribuidos. La zona de baja resistividad identificada mediante ambos arreglos electródicos, polo-Diplo y schlumberger, corresponde a un paquete arcillo-arenoso saturado.

2.7.13 Exploración geotécnica

2.7.13.1 Antecedentes

El subsuelo de las zonas lacustres del Valle de Chalco tiene propiedades únicas. El contenido de agua es mayor a 400 %, el índice de plasticidad excede 300% y el índice de compresión C_c puede llegar a un valor de 10, cuando en la mayoría de los suelos es menor a 1. Lo anterior, ubica a los sedimentos lacustres de la ciudad de México como altamente compresibles, lo que ha dado lugar a intrincados problemas de cimentación para la construcción de edificios elevados y de gran peso en la Ciudad de México.

Por su parte, los sedimentos lacustres de origen volcánico presentan propiedades índices y mecánicas singulares, que no se ajustan a los patrones de comportamiento de la mayoría de los suelos. Su comportamiento mecánico, tanto estático como dinámico es complejo y a la fecha aún presenta desafíos de interpretación. En general, el ángulo de fricción interna de los suelos disminuye al aumentar el índice de plasticidad, sin embargo, el subsuelo de la Ciudad de México presenta un ángulo de fricción de 43° comparable en magnitud con el de las arenas (Lo, 1962; Mesri et al., 1976; Díaz-Rodríguez et al., 1992, 1998).

Los suelos de la Ciudad de México son sedimentos heterogéneos, volcánicos, lacustres, con una proporción y variedad de microfósiles (ostrácodos y diatomeas) que adicionan compuestos solubles generados por la alteración de sus exoesqueletos y que forman parte de la microestructura del suelo (Díaz-Rodríguez et al., 1998). Esto influye de tal manera en su comportamiento que los suelos no pueden considerarse dentro de una clasificación simple.

2.7.13.2 Ubicación Geotécnica de la zona

En el capítulo 2.2 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del actual Reglamento de Construcción del Distrito Federal, se muestra y se da una descripción de las tres zonas identificadas, así como un mapa de zonificación geotécnica de la ciudad de México, en donde se muestran las zonas geotécnica I, II y III.

- Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona es frecuente la presencia de oquedades en rocas, cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados;
- Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 metros de profundidad, o menos, u que está constituida predominantemente por estratos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros; y
- Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo y arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

Como se puede observar en la Figura 55, de acuerdo con la ubicación del predio se ubica dentro de la zona geotécnica III, dentro de la zona lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de material limo-arcilloso y arcilla.

De esta forma, el objetivo del estudio geotécnico en la zona es el de conocer la estratigrafía del subsuelo de las inmediaciones del Lago Tláhuac-Xico y obtener muestras de los estratos encontrados, hasta una profundidad de 15 metros.

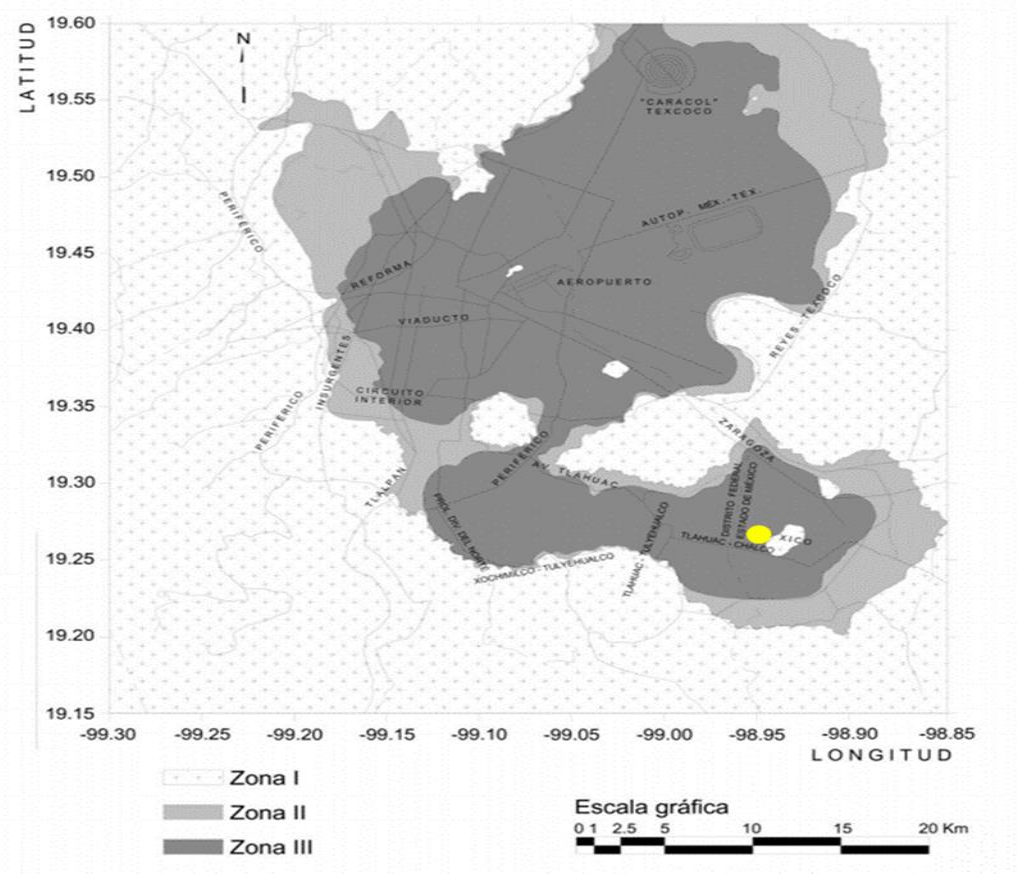


Figura 55. Zonificación geotécnica Ciudad de México y ubicación de zona de interés.

2.7.13.3 Metodología

Para alcanzar el objetivo planteado se realizaron trabajos de campo. Se realizó un recorrido de reconocimiento geotécnico, con la finalidad de ubicar físicamente los sitios donde se realizarían las exploraciones, identificando los sitios singulares de interés. La exploración se realizó con base en:

- Dos sondeos de tipo mixto a 15 m de profundidad, obteniendo muestras representativas inalteradas con tubos de pared delgada Shelby y midiendo el avance de la herramienta al penetrar en el subsuelo durante la prueba de penetración estándar (SPT).
- Dos sondeos de tipo CPTU o piezocono a 15 m de profundidad, consiste en el hincado por presión de una punta cónica a una velocidad constante, midiendo la resistencia a la penetración por la punta (qc), la resistencia por fricción (fs) y la presión de poros (u)

En la Tabla 18 se presenta la ubicación de los sondeos, de acuerdo con el sistema de coordenadas UTM, Datum WGS-84, época 10.0.

Tabla 18. Localización de perforaciones exploratorias

Sondeo	Tipo	X	Y	Latitud	Longitud	Cota

						terreno
Sondeo 1	Mixto	502,813.81	2,130,607.73	19°16'8.91"	98°58'23.64"	2,236.00
Sondeo 2	Piezocono	502,817.14	2,130,602.45	19°16'8.92"	98°58'23.72"	2,236.00
Sondeo 3	Piezocono	502,572.29	2,129,345.96	19°15'27.85	98°58'31.88"	2,236.00
Sondeo 4	Mixto	501,185.08	2,130,330.31	19°15'59.88"	98°59'19.40'	2,237.00

La ubicación de los pozos realizados se muestra en la Figura 56.

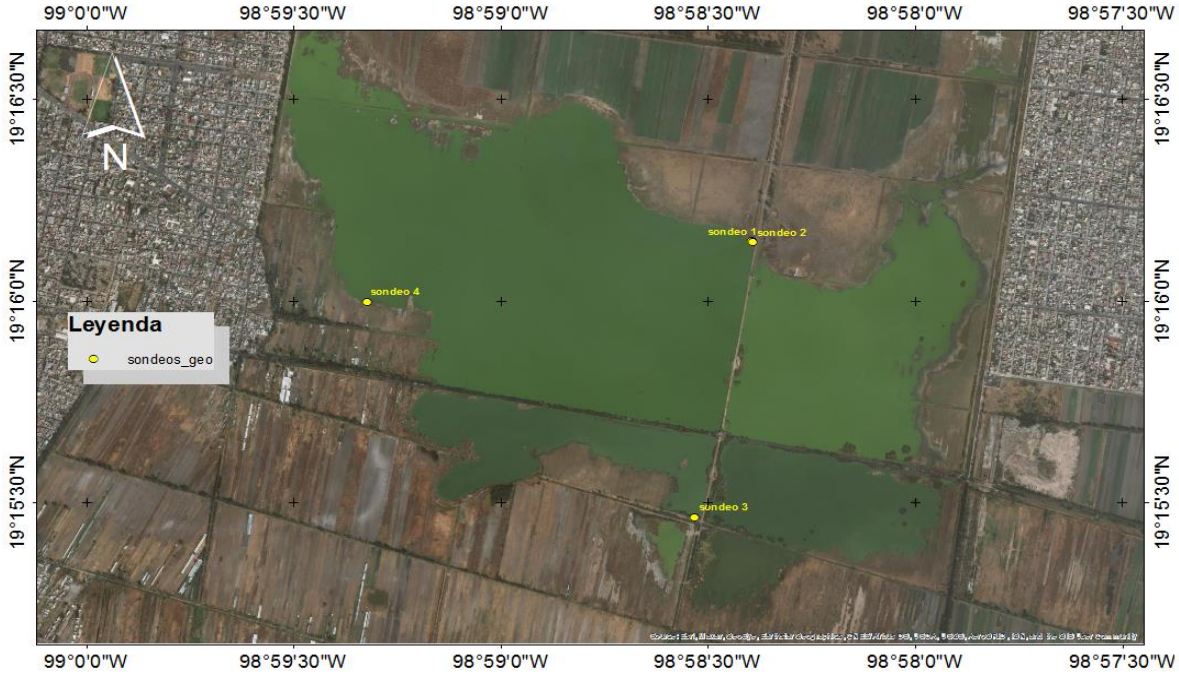


Figura 56. Localización de sondeos exploratorios.

2.7.13.4 Sondeos exploratorios

Sondeos Mixtos (SM)

Los sondeos 1 y 4, se realizaron del tipo Mixto, se ejecutaron hasta una profundidad de exploración de 15 metros, para ello se ocupó una máquina perforadora Long Year 34, en el Anexo XII se muestra la evidencia fotográfica de estas actividades.

Durante la ejecución de los sondeos se llevó un registro detallado con los datos del sondeo correspondiente, la profundidad de muestreo, numeración de muestras e identificación de materiales.

A partir de los trabajos de campo y de laboratorio se realizó la interpretación de los perfiles estratigráficos de los sondeos 1(SM-1) y 4(SM-2), (el registro de perforación de estos sondeos se encuentra en el Anexo XII).

En el sondeo SM-1 (sondeo 1): De 0.00 m y hasta del orden de 0.30 m se detectó la presencia de suelo vegetal con arcilla, de 0.30 m y hasta una profundidad del orden de 4.5 m destaca la presencia de suelos arcillosos saturados con alta plasticidad y con contenidos de humedad de hasta 300%.

En el sondeo SM-2 (sondeo 4): De 0.00 m y hasta del orden de 0.30 m se detectó la presencia de suelo vegetal con arcilla, de 0.30 m y hasta una profundidad del orden de 1.5 m destaca la presencia de limos poco arenosos saturados.

Una descripción resumida de la estratigrafía y propiedades de los materiales es la siguiente: Formación Arcillosa constituida por arcilla de alta compresibilidad (CH) y consistencia muy blanda, con lentes y estratos delgados de arena fina, limpia a limosa y vidrio volcánico. Los colores predominantes son tonos obscuros. La mayor parte de los estratos arcillosos.

Sondeos de Piezocono (CPTu)

Los sondeos de piezocono son ensayos de penetración estática de tipo convencional combinado con las medidas de las presiones intersticiales que se van generando durante el hincado. El proceso consiste básicamente en la introducción de una sonda que tiene incorporada una piedra porosa en el terreno.

Esta clase de ensayo es in situ e indica cómo es el perfil estratigráfico en la zona sin necesidad de sacar muestras que requieren de pruebas de laboratorio, ni demanda de realizar una inspección visual sobre el tipo de suelo que se encuentra, puesto que por medio de este ensayo no se pueden extraer muestras. El ensayo da una idea de qué tipo de suelo se encuentra a través de su comportamiento mecánico, es decir, la rigidez y resistencia que este tenga.

Es un ensayo estandarizado que penetra el suelo a una velocidad estándar acorde con las normas, y genera lecturas en tiempo real que permiten una adecuada caracterización de un perfil de suelo. Como fue mencionado, se realizaron dos sondeos de piezocono (sitios identificados como sondeo No. 2 y sondeo No. 3), ambos a 15 de profundidad, se empleó un equipo de perforación Mobil Drill. En el Anexo XII pueden observarse fotografías del proceso de perforación y el equipo utilizado.

Interpretación del ensayo de piezocono

La prueba de CPTU o piezocono consiste en el hincado por presión de una punta cónica a una velocidad constante, midiendo la resistencia a la penetración por la punta (qc), la resistencia por fricción (fs) y la presión de poros (u).

Como en la prueba de CPTU no se recuperan muestras de suelo y la interpretación de los resultados se hace con base en el comportamiento que presenta el suelo durante la prueba, por lo tanto, la prueba no arroja resultados en cuanto a las proporciones de los diferentes tamaños del suelo, o del comportamiento de la fracción fina.

La clasificación del suelo, utilizando la prueba de CPTU, se basa principalmente en el comportamiento del suelo durante la ejecución de la prueba, por lo tanto, la prueba no arroja resultados en cuanto a las proporciones de los diferentes tamaños del suelo, o del comportamiento de la fracción fina. De forma general se puede afirmar que los suelos

granulares tienen alta resistencia por la punta y baja fricción y los suelos arcillosos baja resistencia por la punta y alta fricción; si el suelo es una arena densa o preconsolidada tiende a dilatarse, y las presiones de poro pueden ser negativas; los suelos arcillosos disipan más lentamente la presión de poros que las arenas, por lo que se esperan excesos de presión de poros más altos en los suelos finos que en los gruesos.

Al respecto cabe mencionar:

- Sondeo CPTu-01 (sondeo 2): las presiones de poro obtenidas el día 22 de febrero del 2022, se encuentran muy cercana a la presión hidrostática a la profundidad entre 0.50m y 1m de profundidad. Entre 1 m y 10.5 m de profundidad las presiones de poro se encuentran abatidas.
- Sondeo CPTu-02 (sondeo 3): las presiones de poro obtenidas el día 23 de febrero del 2022, se encuentran abatidas hasta la profundidad del sondeo, es decir, por debajo de la presión hidrostática hasta los 15 m de profundidad.

2.7.13.5 Modelo geotécnico

Con base en la información obtenida en campo a través del ensaye de SPT (Standard penetration test) y CPTU (Cone penetration test), al igual que la información obtenida en laboratorio, se estableció un modelo geotécnico homologando la información disponible, resultando lo siguiente (Figura 57):

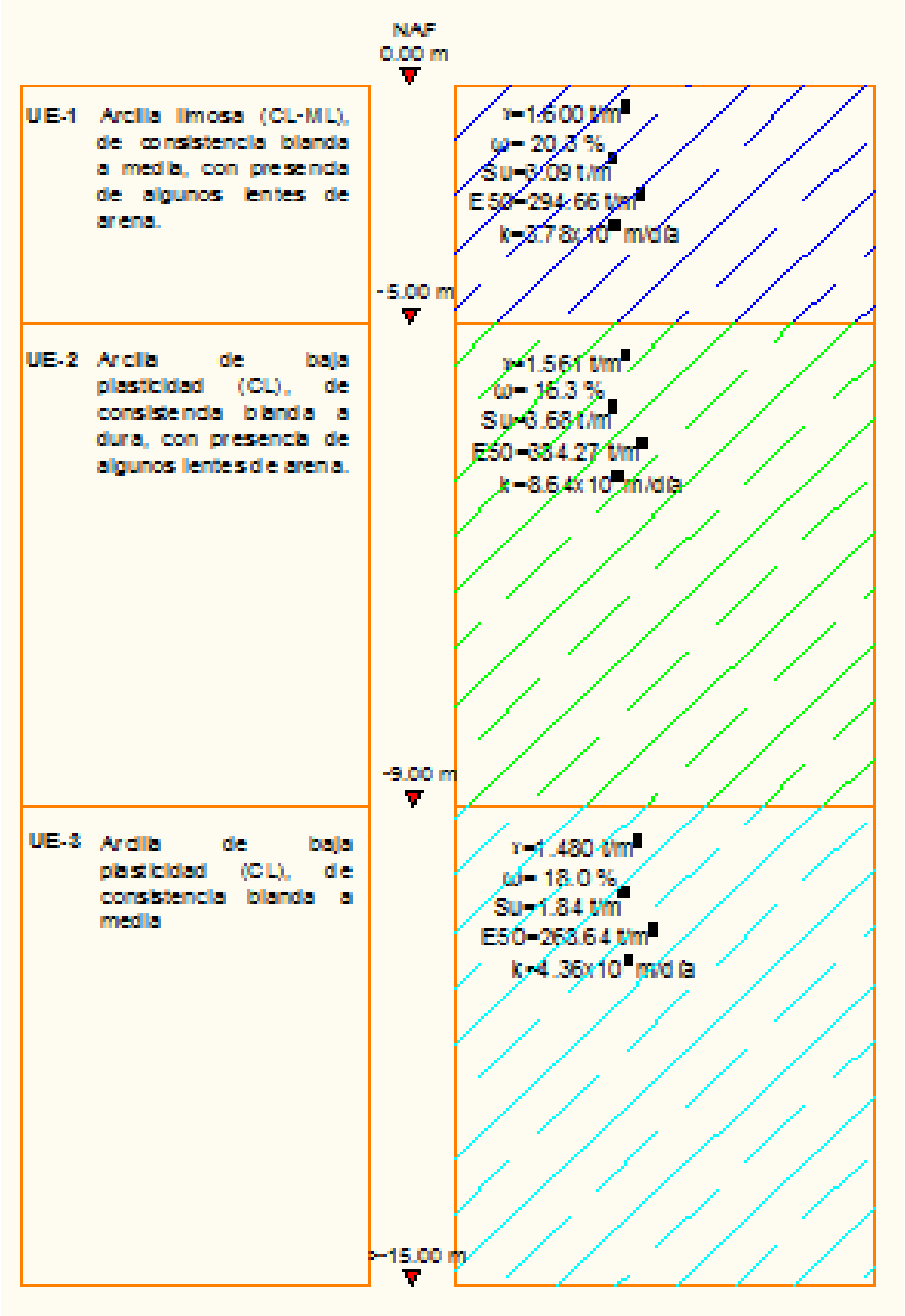


Figura 57. Modelo Geotécnico obtenido de la campaña de exploración

Esa información se encuentra disponible en la Tabla 19, que se muestra a continuación.

Tabla 19. Propiedades de las unidades correspondientes al modelo geotécnico

Unidad estratigráfica	Profundidad	γ	ω	S_u	E_s	K
	m	t/m³	%	t/m²	t/m²	m/d
UE-1	1-3	1.600	20.3	3.09	294.66	0.0000378
UE-2	4-9	1.560	16.34	3.68	384.26	0.00000864
UE-2	10-15	1.480	18	1.844	268.64	4.3632E-07

La obtención de algunas características y parámetros se obtuvo a partir de correlaciones, como lo es el caso de la densidad y el módulo de deformación.

Las propiedades y características consideradas para el terraplén se describen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Tabla 20. Propiedades consideradas para el cuerpo del terraplén

γ t/m³	S_u t/m²	E_S t/m²	K m/d
1.4	3	106	0.0000378

2.7.14 Geohidrología

2.7.14.1 Localización Geohidrológica

Como fue descrito p de acuerdo con la delimitación publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 28 de agosto del año 2009 (SEMARNAT, 2009), la zona donde se localiza el Lago Tláhuac-Xico, se encuentra entre dos acuíferos, la porción occidental se localiza en el acuífero Zona Metropolitano de la Ciudad de México (901), y la porción oriental dentro del acuífero Chalco-Amecameca (1506), como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.



Figura 58. Delimitación de acuíferos y ubicación de zona de estudio. Elaboración propia, con base en Google Earth y CONAGUA

Como parte de las actividades de campo se realizaron recorridos dentro de la zona para la identificación y ubicación de aprovechamientos subterráneos existentes en las inmediaciones de la zona de estudio.

Básicamente los pozos que existen en la zona corresponden propiamente con la batería de pozos denominada Mixquic-Santa Catarina, conformada por 14 pozos con profundidades de más de 390 metros. De estos pozos se obtuvo información sobre profundidad, niveles estáticos (NE), cortes litológicos y diseño constructivo (Anexo XIII).

2.7.14.2 Características de las unidades litológicas existentes

Se ha señalado que, dentro de los límites del acuífero de Chalco, la existencia de rocas de origen volcánico de diferentes composiciones, conformando las sierras Chichinautzin y Nevada, así como la presencia de sedimentos clásticos que rellenan los valles; técnicamente la secuencia litológica existe se puede clasificar en función de su permeabilidad.

En el caso de las formaciones volcánicas, su comportamiento geohidrológico responde invariablemente al grado de fracturamiento que presenten. Los cortes litológicos en pozos localizados en la zona de estudio muestran que en los primeros 152 m se tienen depósitos lacustres, con la presencia de horizontes arenosos. Subyaciendo a estos paquetes se tienen piroclastos y tobas, que actualmente conforman el acuífero en explotación; la profundidad de los niveles piezométricos existentes en esta zona está entre 50 y 75 m, por lo que se deduce que el acuífero responde al tipo confinado; condición que se puede comprobar con los diseños constructivos de los pozos de la batería Mixquic, los cuales presentan una tubería lisa hasta los 200 m de profundidad. En el Anexo XIII se presenta la terminación y profundidad del pozo 12 A, en el cual se observa que sellado hasta una profundidad de 295 metros.

Subyaciendo a los horizontes arenosos, se tiene la presencia de piroclastos y tobas, alterados y degradados a arcillas, carentes de todo interés geohidrológico. Toda vez que corresponde a una secuencia impermeable que funciona como acuitardo de la zona.

De acuerdo con los diseños de los pozos de la batería Mixquic, el acuífero en explotación se localiza a una profundidad superior de los 290 metros, zona donde se reportó la presencia de rocas volcánicas fracturadas. Así mismo, con base en las características constructivas de los pozos existentes, la zona de explotación del acuífero en forma local se encuentra por debajo de los 250 metros. Toda vez que los primeros 200 metros de todos los pozos de la batería están conformados por tubería ciega.

Condición que permite confirmar que el acuífero en esta zona responde al tipo confinado. Considerando que existe un espesor de más de 150 metros de material limo-arcilloso, de origen lacustre.

En la Figura 59 se observa la ubicación de los pozos que conforman la batería Mixquic-Santa Cantarina, así como en la Figura 60 las profundidades de algunos de los pozos de la batería y la profundidad de la tubería ciega en ellos.

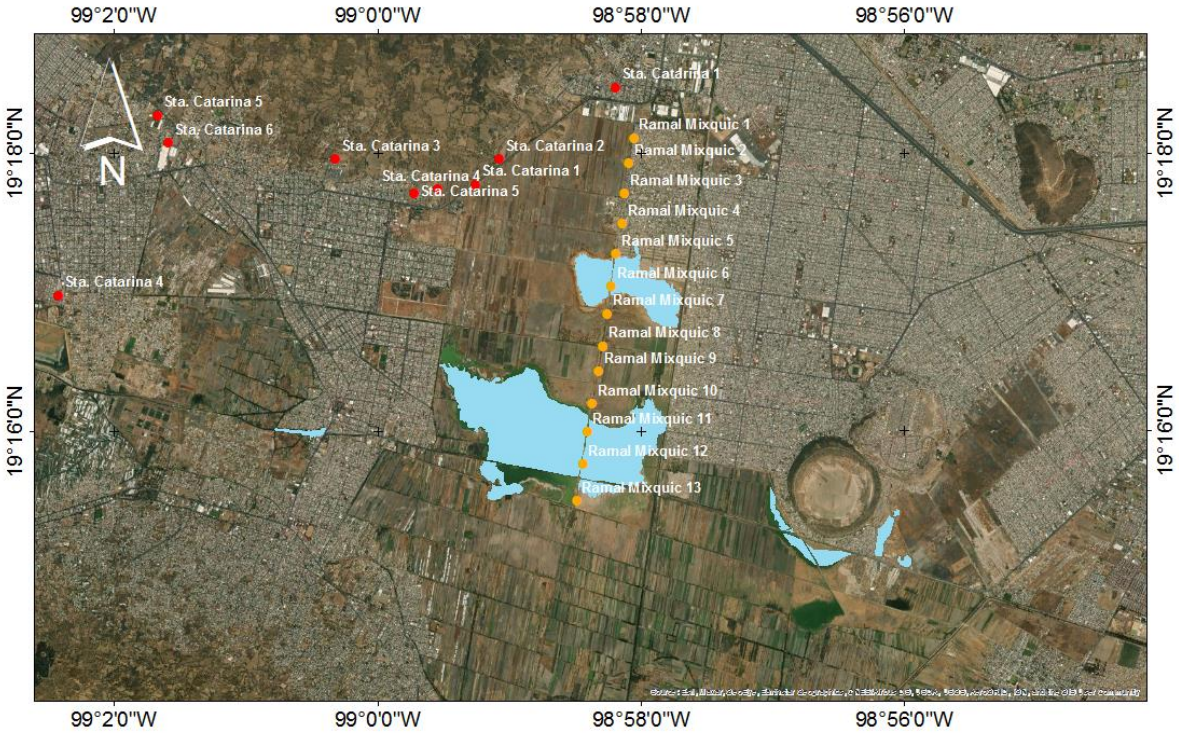


Figura 59. Localización de aprovechamientos existentes en un diámetro de 3 km

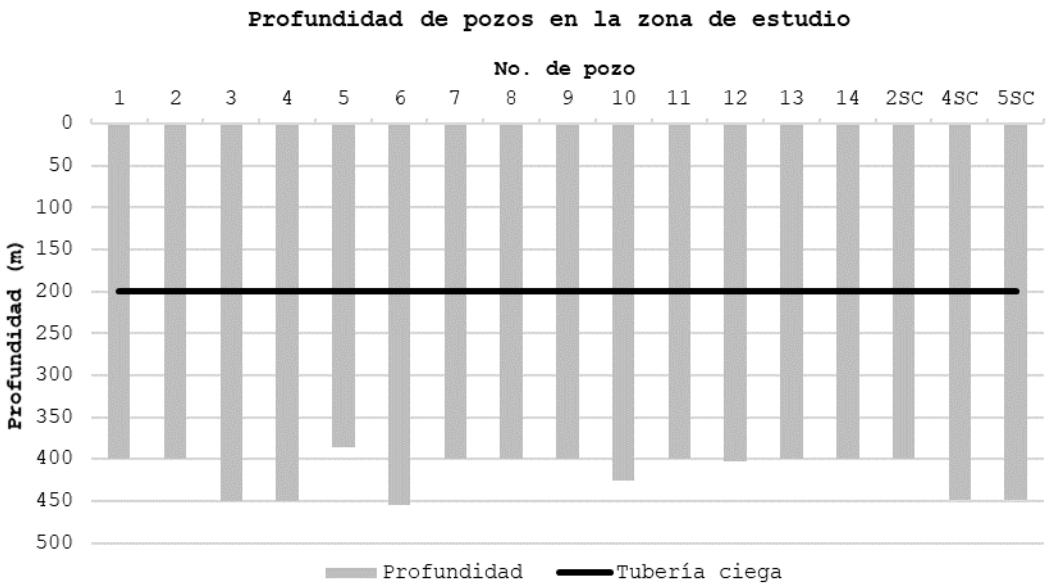


Figura 60. Profundidad de Pozos de la Batería Mixquic y Santa Catarina

2.7.14.3 Geometría del acuífero

En la zona lacustre, donde se localiza el Lago Tláhuac-Xico, se ha señalado la existencia mínima de 100 metros espesor de material lacustre, mismo que varía de 5 metros en los

lados hasta alcanzar valores superiores a los 200 metros en el centro, como se aprecia en los cortes litológicos de los pozos 6 y 7 del Ramal Mixquic-Santa Catarina, cabe señalar que dentro de esta secuencia se han reportado la presencia de horizontes arenosos poco potentes. Esta secuencia se puede clasificar como acuitardo, por sus características geohidrológicas.

Subyaciendo a la secuencia anterior se tiene la presencia de material detrítico de relleno, conformando un acuífero semiconfinado de más de 400 metros de espesor, donde los niveles piezométricos por presiones hidrostáticas alcanzan valores de 60 a 75 metros de profundidad, valores medidos en los pozos del Ramal Mixquic.

2.7.14.4 Niveles del agua subterránea

Del análisis de la información recopilada y generada se estableció que se ha registrado evolución significativa de los niveles del agua subterránea desde principios del año 2000. Se realizaron visitas a los pozos en la zona, en las que fue señalado por operadores el abatimiento y la pérdida de la capacidad de extracción en algunos de los pozos, destacando la reducción del gasto.

Con base en la información generada y recopilada en campo, se obtuvo la profundidad de los niveles estáticos (PNE), la cual se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. Niveles estáticos

Pozo	Elevación brocal	NE	PNE
	ms.n.m.	m	ms.n.m.
Batería Mixquic 4	2,241	61	2,180
Batería Mixquic 5	2,236	62	2,174
Batería Mixquic 6	2,235	75	2,160
Batería Mixquic 7	2,236	68.35	2,168
Batería Mixquic 8	2,236	71.5	2,165
Batería Mixquic 10	2,235	70.89	2,164
Batería Mixquic 13	2,236	74.85	2,161

Los valores de profundidad del nivel estático muestran que los niveles en la zona del Lago Tláhuac-Xico van de 61 hasta 74.85 metros. Donde el valor más profundo se identificó en el pozo 13, en el extremo sur de esta batería, donde se localiza la vialidad Calzada Tláhuac-Chalco. La profundidad disminuye hacia el norte donde se localiza la colonia Ampliación San Miguel.

2.7.14.5 Configuración: red de flujo subterráneo

Para determinar la configuración de los niveles estáticos del agua subterránea, con base en las elevaciones del nivel del agua observado, la cota de brocal se determinó a través de los valores obtenidos mediante un GPS Garmin ETrex 30x, el cual cuenta con un altímetro barométrico que registra los cambios en la presión para hacer correcciones a la lectura de altitud de satélites y determinar la altitud más precisa, así mismo se utilizó apoyo altimétrico complementario de las cartas topográficas. No obstante, estos valores deben de tomarse con sus respectivas reservas.

Los máximos valores de elevación registrados en la zona de estudio se presentan en la porción norte, sobre el pozo 4 de la batería Mixquic, con un valor calculado de 2,180 ms.n.m., la carga hidráulica disminuye gradualmente hacia el sur, mostrando en la zona donde se ubica el pozo 13 de la misma batería, con cargas hidráulicas de 2,160 ms.n.m (Figura 61). Con base en los resultados anteriores se puede establecer que la dirección de flujo subterráneo en la zona de estudio presenta una dirección de norte a sur, si se considera la distancia existente entre el pozo 4 y 13 de la batería de Mixquic, que es de 3.7 kilómetros, se genera un gradiente hidráulico de 0.005, hacia el hacia el sur.

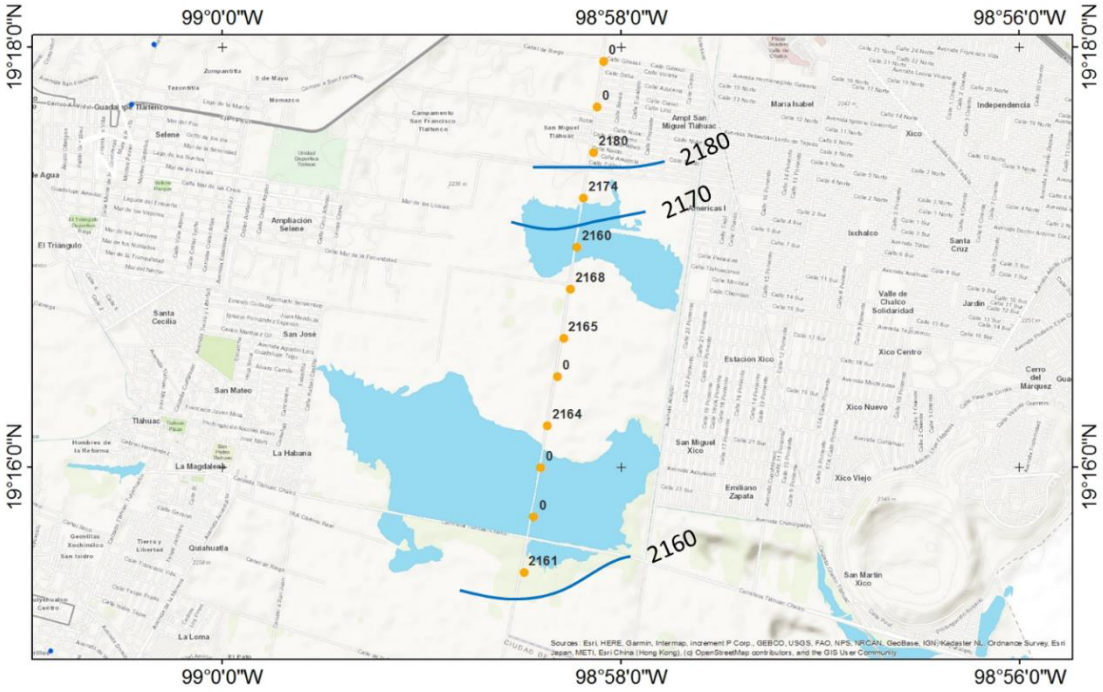


Figura 61. Valores de elevación del nivel estático

Con el fin de conocer el comportamiento del acuífero a lo largo del tiempo se recopilo la información piezométrica histórica de la Batería de pozos Mixquic. De la cual se encontró que para el año 1982, de forma general, los niveles se encontraban dentro de un rango inferior a los 30 m, mientras que para el año 2022, los niveles registrados presentan valores superiores a los 60 m de profundidad. Bajo estas consideraciones se tiene que en la zona existe un abatimiento regional del nivel estático de 0.75 m por año.

Sin embargo, si consideramos, solo el pozo 10 de la batería, en el año 1982, el nivel estático se encontraba a los 18.23 m, actualmente el dato obtenido en campo señala que el nivel estático se encuentra a una profundidad de 70.89 M, lo que genera una diferencia de 52.66 m, para un periodo de 40 años, lo que equivale a un abatimiento de 1.31 m por año.

2.7.14.6 Modelo Conceptual: Sistemas de Flujo

Las características hidráulicas y el comportamiento geohidrológico de las rocas dependen directamente de su litología, estratigrafía y de la estructura geológica. Las rocas ígneas extrusivas que forman la sierras Santa Catarina y Chichinautzin, ubicadas al norte y sur de la zona de estudio, se caracterizan por su elevada permeabilidad secundaria, asociada con

fracturamiento primario y secundario, textura porosa y rasgos estructurales, como contactos angulares, fracturas, fisuras y fallas, condiciones que favorecen su alto grado de permeabilidad.

La capacidad de infiltración de las rocas expuestas, en estas sierras, es el factor geológico que controla el ingreso del agua al subsuelo. Las rocas fracturadas, son excelentes receptoras de recarga, el agua infiltrada desciende en la masa rocosa siguiendo trayectorias tortuosas determinadas por la estructura de la masa volcánica, hasta alcanzar la zona del acuífero.

Los afloramientos de estas rocas tienen alta capacidad de infiltración, por lo cual constituyen excelentes receptoras y transmisoras de recarga de agua subterránea. En el subsuelo, las rocas consolidadas que subyacen al paquete volcánico, rocas volcanoclásticas de las formaciones Terciarias y Cuaternarias, se constituyen como un acuífero de gran capacidad transmisora. A una profundidad superior de 290 metros, en la zona del Lago.

En la zona de la planicie los acuíferos volcánicos se encuentran subyaciendo a estratificaciones de menor permeabilidad, por lo que el acuífero se comporta como confinado, de baja capacidad de almacenamiento debido a su reducida compresibilidad. No obstante, los de grano fino tienen alta porosidad y baja permeabilidad; hacia la zona saturada funcionan como acuitardos, que pueden transmitir cantidades de agua a los acuíferos adyacentes. Los piroclásticos no cementados, son más permeables y menos porosos que los anteriores, por lo que constituyen buenos acuíferos.

Por su parte, es claro que la descarga del acuífero dentro de la zona de estudio básicamente es por bombeo, toda vez que, la descarga por evaporación directa no es significativa, considerando que la superficie freática oscila a profundidades mayores de 5 m de la superficie del terreno, profundidad a la que deja de presentarse el fenómeno de evapotranspiración; lo que sí es claro es que el fenómeno de evaporación puede ocurrir en los cuerpos de agua e inmediaciones de estos.

2.7.14.7 Acuífero

De acuerdo con los datos recopilados y con las observaciones realizadas en campo, aproximadamente los 260 m superiores de la secuencia de la zona del Lago Tláhuac-Xico están dominados por materiales clásticos de grano fino, primordialmente de origen lacustre, intercalados con horizontes discontinuos o lentes de origen volcánico. Entre 260 m y 300 m los sedimentos están constituidos por material clástico más grueso, intercalados con horizontes finos, posiblemente intercalaciones de depósitos de origen fluvial y lacustre. Por debajo de los 300 m, los depósitos están constituidos por unidades volcanoclásticas con intercalaciones de flujos de lava y conglomerados.

A nivel local se reconoce la presencia de una sola unidad acuífera de origen predominantemente volcanoclásticas (tobas areno-limosas) que es la principal proveedora del agua subterránea en la región, la cual se encuentra a una profundad superior de 260 metros, equivalente a una elevación de 1,975 ms.n.m.

Litológicamente el acuífero se encuentra sobre secuencias volcanoclásticas, cuya granulometría puede estar entre arenas, arenas gruesas, que, de acuerdo con los registros geofísicos y las observaciones de campo, se estiman presentan un espesor del orden de los 230 metros en promedio.

Se puede concluir que el tipo acuífero es confinado. Como capa confinante funciona el primer estrato arcilloso, desde la superficie. El espesor del confinante, en la zona de lago es de más de 200 metros. En las zonas donde la capa arcillosa es delegada el nivel del agua es piezométrico.

Desde hace muchos años el acuífero es objeto de explotación excesiva que se refleja en el continuo descenso del nivel del agua. El acuífero consta de sedimentos muy variados incluyendo rocas basálticas a profundidad, por eso se debe considerar como heterogéneo y anisótropo.

Los abatimientos en el acuífero Chalco-Amecameca para el periodo 2010-2011, en la zona de la planicie varían de 2 a 1.5 m, los menores abatimientos cercanos a 1.5 metros se localizan hacia la porción central del Ramal Mixquic, las inmediaciones del poblado de Chalco, así como, en su zona sur-poniente del poblado de Tetelco, Delegación de Milpa Alta, en Santa Catarina Ayotzingo, San Juan y San Pedro Tezompa, en el ejido de Tenango, todos del municipio de Chalco.

2.7.15 Conclusiones

Los resultados de los estudios de exploración directa realizados anteriormente señalan, que los 260 m superiores de la secuencia están dominados por materiales clásticos de grano fino, primordialmente de origen lacustre ricos en microfósiles, mismos que están intercalados con horizontes de origen volcánico, cuyos sedimentos están constituidos por material clástico más grueso intercalados con horizontes finos, posiblemente intercalaciones de depósitos de origen fluvial y lacustre. Por debajo de los 300 m los depósitos están constituidos por unidades volcanoclásticas con intercalaciones de flujos de lava y conglomerados aluviales.

Técnicamente mediante los trabajos de campo realizados (sondeos geofísicos y perforaciones directas) se comprobó hasta una profundad de 25 m, la existencia de una secuencia de material lacustre.

En las imágenes de resistividad eléctrica se identificaron dos rangos principales asociadas a las siguientes condiciones:

- En la zona se presentan resistividades bajas de 1 a 5 Ohm-m pertenecientes a sedimentos lacustres someros, constituidos por arcillas plásticas y saturadas de baja permeabilidad con intercalaciones de capas delgadas de arena limosa. Sus variaciones en resistividad indican cambios en sus contenidos granulométricos y de sales; correspondiendo las comprendidas en el intervalo de 1 a 3 Ohm-m a arcillas plásticas; de 3 a 5 Ohm-m a arcillas plásticas con contenido de arenas, mismas que se presentan en toda la zona en forma de lentes, a una profundidad 3 a 5 metros en la zona de estudio.

- Físicamente dicha estratigrafía se comprobó mediante los sondeos de exploración directa, hasta una profundidad de 15 metros, donde se identificó la presencia de una potente secuencia de material lacustre con intercalaciones de arenas.

- El nivel freático se identificó durante las perforaciones a una profundidad de 80 cm, por lo que la instalación de piezómetros en estas zonas permitirá definir la presión esperada.

- Se observa la clara presencia de paquetes de lentes arenosos a una profundidad promedio de 2 a 3 metros mismos que se incrementan hasta una profundidad de 10 metros.

- Con base en lo anterior, es recomendable que la profundización planteada en la zona del Lago Tláhuac-Xico, se realice a una profundidad máxima de 1.5 m, antes de llegar a los lentes de arenas. No obstante, se recomienda realizar una caracterización a detalle de los horizontes de arena con el fin de evitar “fugas”, por estos horizontes permeables.

- Bajo las características mecánicas de los suelos existentes es recomendable considerar que al llenar el vaso y ver el fondo permeable, esta sobrecarga produciría una mayor deformación, condiciones que tendrían que ser monitoreadas.

- De los valores de piezometría reportados por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, la profundidad al nivel estático en la zona de interés presenta valores que van de 60 m a 70 m.

- Se determina que el agua que precipita sobre la planicie, escurre hacia las partes más bajas inclusive es captada por los canales de drenaje, por lo que la infiltración del agua de lluvia es mínima, y la que llega a infiltrase lo realiza por efectos de capilaridad, por lo que la presencia del agua durante la construcción será inminente, más no en gran medida debido al tipo de suelo que la contiene.

- Cabe la posibilidad de que existan horizontes arenosos que almacenen de manera temporal el agua, sin embargo, son de muy bajo espesor y de escasa longitud, lo cual hace manejable la situación, en cuanto a la presencia de agua.

- La principal fuente de alimentación al sistema acuífero es la generada en las estribaciones de las sierras que circundan la subcuenca y es en las formaciones de origen volcánico granular (arenas gruesas) o rocas volcánicas fracturadas (tobas y brechas volcánicas, así como basaltos), unidades que se encuentran en contacto con el sistema acuífero.

2.8 Profundización del Lago

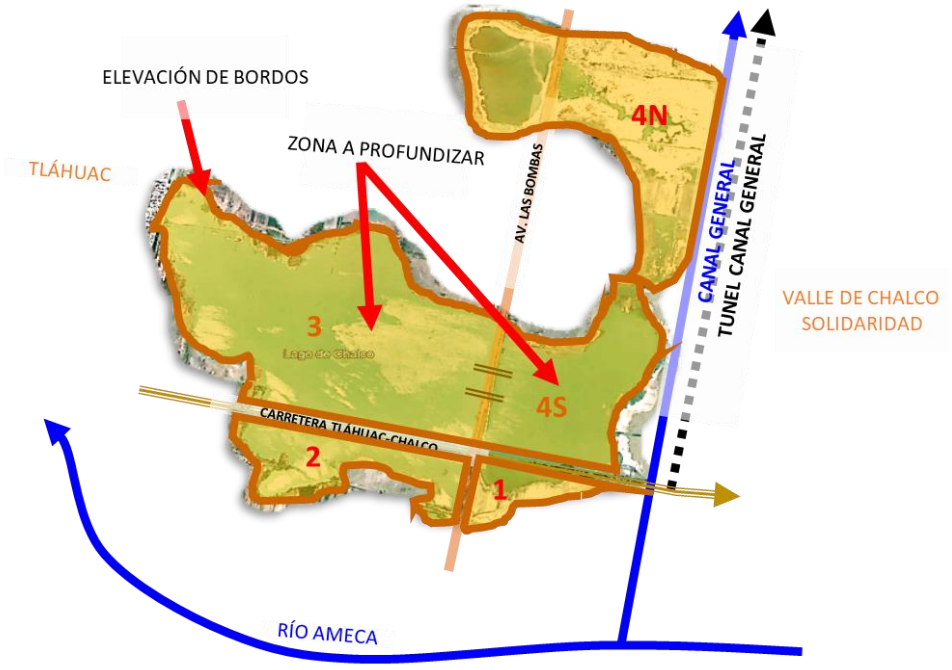
2.8.1 Introducción

Para establecer el método más apropiado para incrementar la capacidad de almacenamiento del Lago Tláhuac-Xico, se consideró la información de las batimetrías proporcionadas por SACMEX (2019), para ubicar las zonas con mayor profundidad: zonas 3 y 4S. Así como, la superficie de las zonas 1, 2, 3, 4S que en conjunto hacen 3.55 km^2 y cuentan con una capacidad de 3.00 hm^3. De esta forma, los métodos para brindar capacidad pueden ser superficiales a través de bordos y el de profundizar las zonas del lago a través de dragado.
Por otra parte, en las reuniones celebradas con los coordinadores de los grupos de trabajo, se estableció un caudal de salida para la Planta de Tratamiento que tratará el agua previamente a su ingreso al lago. Por lo cual, de acuerdo con las condiciones actuales del lago, se determinó el volumen de 12.00 hm^3, ya que considerando 3 hm^3 de capacidad actual, es requerido incrementar la capacidad de almacenamiento en 9.00 hm^3.

Estas variables y las definidas por el Balance Hídrico de la zona, así como de las características y resultados derivados de los estudios de Geotecnia, Geofísica, Topografía, Batimetría, entre otros elementos, fueron considerados para definir las alternativas más propicias para incrementar la capacidad del Lago, de acuerdo con las particularidades de la zona y las metas planteadas.

De esta forma, el objetivo del componente profundización del Proyecto de aprovechamiento y manejo ambiental del Lago Tláhuac-Xico es el siguiente:

- Incrementar la capacidad y almacenamiento del Lago Tláhuac-Xico para brindar las condiciones para que el agua que contenga sea aprovechada en cantidad y calidad como fuente de suministro.
- Para lograr el volumen de almacenamiento propuesto (12 hm^3), se evaluaron las siguientes alternativas conceptuales para incrementar la capacidad del Lago: bordos perimetrales, dragado y la combinación de ambas. En la Figura 62 se muestra el esquema a grosso modo de dichas alternativas considerando las condiciones actuales del Lago.



Zonas 3 y 4S de la laguna de Xico

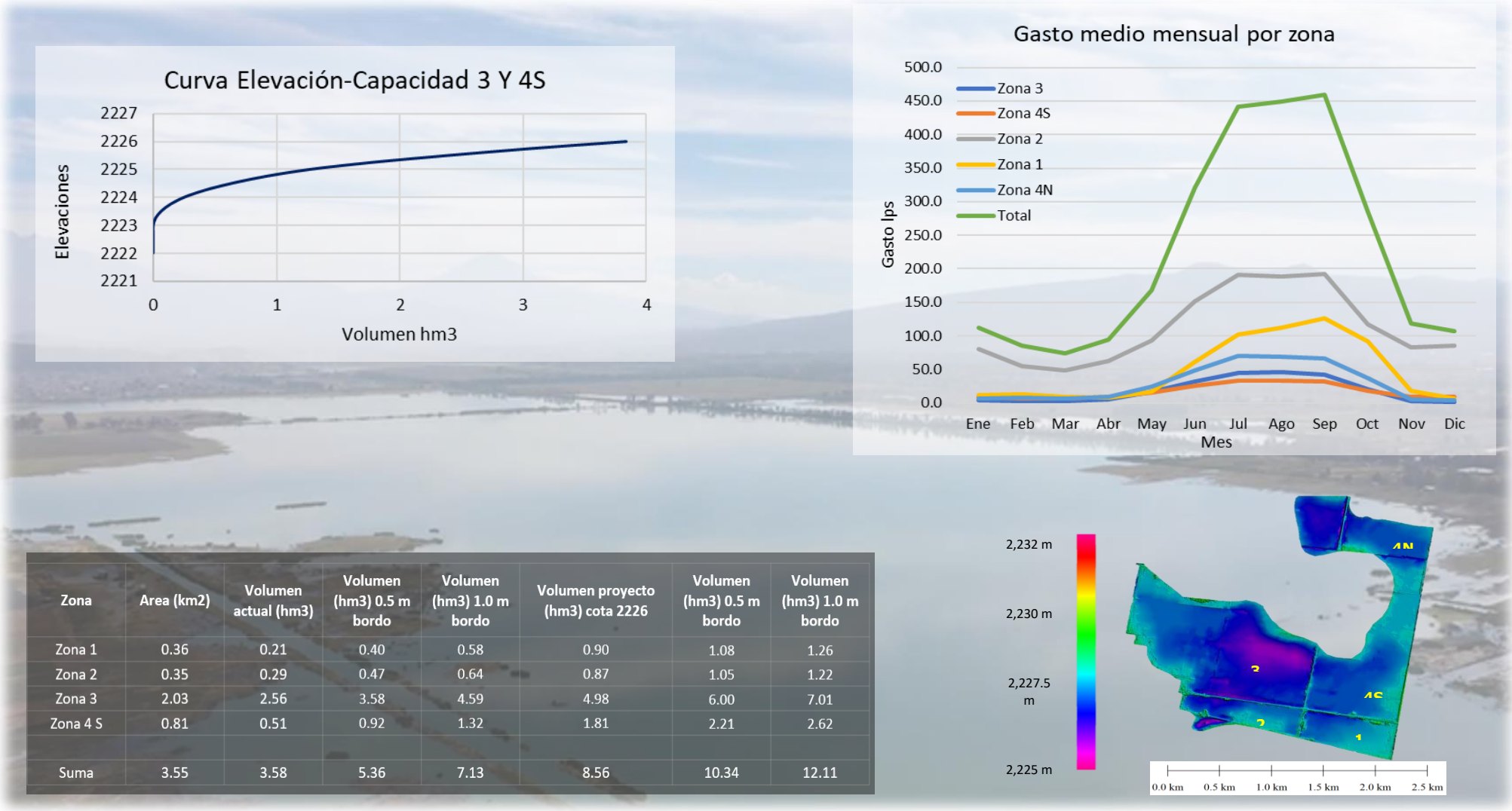
Figura 62. Planta general del Lago de Tláhuac Xico y alternativas para incrementar volumen

De esta forma, en las siguientes secciones se describirán los esquemas de las alternativas y factores de evaluación.

2.8.2 Alternativas para aumentar la capacidad del Lago

Con la información brindada por SACMEX y con los modelos de elevación digital se procedió a calcular mediante curvas capacidad elevación los volúmenes actuales en la zona de estudio.

Por si mismo el algo no tiene capacidad para llegar a los 12 millones de metros cúbicos como se ha calculado en el proyecto, sin embargo, en una combinación de dragado y elevación de bordos se puede considerar factible el volumen de proyecto.



Zona	Area (km2)	Volumen actual (hm3)	Volumen (hm3) 0.5 m bordo	Volumen (hm3) 1.0 m bordo	Volumen proyecto (hm3) cota 2226	Volumen (hm3) 0.5 m bordo	Volumen (hm3) 1.0 m bordo
Zona 1	0.36	0.21	0.40	0.58	0.90	1.08	1.26
Zona 2	0.35	0.29	0.47	0.64	0.87	1.05	1.22
Zona 3	2.03	2.56	3.58	4.59	4.98	6.00	7.01
Zona 4 S	0.81	0.51	0.92	1.32	1.81	2.21	2.62
Suma	3.55	3.58	5.36	7.13	8.56	10.34	12.11

Figura 63. Alternativas para incrementar volumen del Lago de Tláhuac Xico

2.8.3 Procedimiento para aumentar la capacidad del Lago mediante la sobre-elevación de bordos

Para incrementar el volumen del Lago a través de la elevación de bordos perimetrales, se consideró el nivel máximo de operación actual (2226.0 m) obtenido de los levantamientos topográficos realizados y descritos previamente. De esta forma, la cota de corona de 2228.0 ms.n.m., así como un talud exterior de 2:1, un talud interior de 3:1, con un ancho de corona de 7.00 m y una elevación aproximada de 2.0 m, considerando dentro de estos 1.70 m de bordo aprovechable y 30 cm de bordo libre, Figura 64.

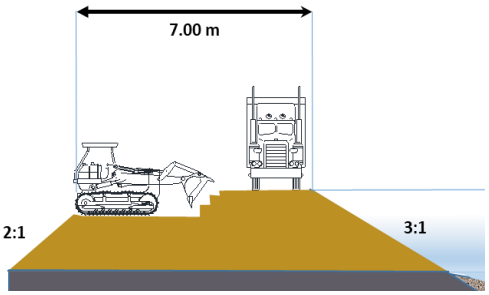


Figura 64. Sección propuesta para la conformación del bordo perimetral

A continuación, se describen los análisis y consideraciones preliminares tomadas para llegar a las características de diseño de los bordos descritas previamente, tomando en cuenta dimensiones (taludes, ancho y cota de corona), condiciones actuales del Lago y la capacidad requerida, así como, el nivel conceptual de la alternativa.

2.8.4 Modelo Geotécnico Preliminar

2.8.3.1 Dimensionamiento de Elementos de Contención

De los trabajos geotécnicos realizados, se evaluaron cuatro bordos de diferentes alturas y anchos de corona, con el propósito de brindar información para determinar de forma conceptual parámetros de diseño para elementos de contención.

Así pues, el ancho de corona se definió por el ancho requerido para funcionar como paso vehicular, considerando tres metros como ancho de un carril. La evaluación se realizó para un carril y dos carriles sobre la corona de bordo, para cada caso se evaluó el bordo con una altura de 1.5 m y 3 m. Esta evaluación fue realizada previo a la obtención de la cota del nivel máximo del agua almacenada determinada por los estudios hidrológicos-hidráulicos pertinentes que definirán la cota de nivel máximo del volumen de agua, con el propósito de brindar un panorama general.

De acuerdo con las propiedades y características del terraplén descritas en la Tabla 19, se realizó el dimensionamiento de los elementos de contención. En el análisis realizado en esta etapa se consideró un talud con una relación 1.4:1. Se consideraron los diferentes esquemas: 3 m de altura y ancho de corona; un ancho de corona de 6 m (2 carriles) con 3 m y 1.5 m de altura; considerando un bordo libre de por lo menos medio metro medidos desde la corona del terraplén así debajo de la misma. En el Anexo XIV se muestran los esquemas de acuerdo con las características descritas.

2.8.3.2 Evolución de los elementos de contención

Definidas las propiedades y sección que conforman el elemento de contención, se realizó la revisión de este desde el contexto geotécnico. Obteniendo valores de asentamientos, capacidad de carga, factor de seguridad y deformaciones, ante la carga viva y la presión hidrostática a la que estará sometido el elemento. Para esto y con el fin de considerar las condiciones de flujo se elaboró un modelo numérico en un software de elementos finitos.
La geometría y modelo geotécnico introducido en dicho software es la mismo que se definió en la sección respectiva (Modelo geotécnico) (Figura 65).

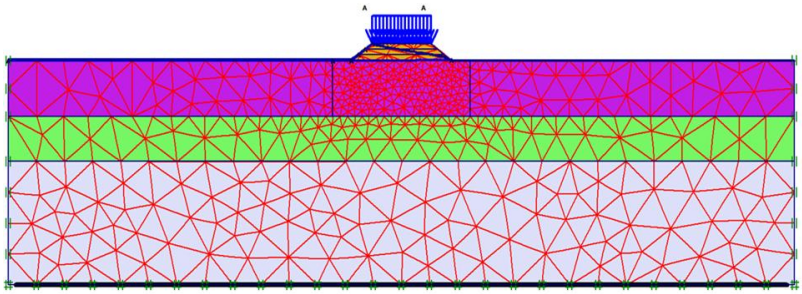


Figura 65. Malla de modelo numérico-elaborada en software de elementos finitos

El análisis se realizó considerando las condiciones iniciales, es decir al no existir bordo, posteriormente se consideró el procedimiento constructivo del terraplén mediante la conformación de capas de este y finalmente se consideró la presión hidrostática que corresponde al incremento del nivel de agua en el talud aguas adentro del bordo. Los diagramas de las condiciones de flujo resultantes del modelo de acuerdo con los esquemas descritos previamente se muestran en el Anexo XIV.

2.8.3.3 Resultados obtenidos de la modelación

De los modelos analizados se obtuvieron: asentamientos por la construcción del terraplén que involucran la carga viva, deformaciones generadas por la presión hidrostática, los valores de capacidad de carga y factor de seguridad, todo esto se resume en la Tabla 21. Así mismo, las imágenes de los desplazamientos, información de cálculo e imágenes de la capacidad de carga obtenida con el modelo y del factor de seguridad se encuentran en el Anexo XIV.

La zona en la que ocurren las mayores deformaciones es el talud aguas adentro, esto generado por la presión hidrostática, la carga uniformemente distribuida que representa la carga viva y la conformación del cuerpo del terraplén; ocurriendo así, para los cuatro modelos analizados. Se aprecia que, al incrementar el volumen del terraplén, los valores de deformación incrementan; estos resultados de desplazamientos.

2.8.3.4 Capacidad de carga

La capacidad de carga se estableció aplicando un incremento de presión gradual hasta llegar a las treinta toneladas metro cuadrado o hasta llegar a la falla, lo que ocurriera primero, esto sobre una sección con dimensiones iguales a las bases de los bordos analizados, los resultados de los cuatro modelos de muestra en la Tabla 21.

La máxima fracción de la carga gradual aplicada en los modelos es de orden similar, siendo alrededor del cincuenta por ciento de la presión total establecida de treinta toneladas metro cuadrado.

2.8.3.5 Factor de seguridad

El factor de seguridad se determinó aplicando un análisis de reducción de parámetros de resistencia, para los cuatro modelos elaborados (Anexo XIV). El valor de factor de seguridad para todos los casos analizados es mayor a tres.

Como se ha mencionado, los resultados obtenidos de los modelos analizados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados obtenidos de los modelos analizados

Altura de bordo	Ancho de corona	Número de carriles	Factor de seguridad	Asentamientos por construcción	Deformaciones horizontales por llenado	Deformaciones verticales por llenado	Capacidad de carga
	m	-	-	cm	cm	cm	t/m²
1.5	3.0	1	5.444	3.53	3.81	1.95	16.38
1.5	3.0	2	4.969	4.27	3.85	1.89	15.93
3.0	6.0	1	3.442	8.90	8.13	4.10	15.42
3.0	6.0	2	3.094	9.92	8.15	4.11	14.34

De los resultados mostrados y descritos, se obtienen las siguientes consideraciones Geotécnicas:

- Los análisis realizados para ambos casos consideran un bordo libre de cincuenta centímetros medidos desde la corona del bordo hacia abajo, este bordo libre, de igual manera debe ser tomado en cuenta al momento de definir la altura total del mismo.
- Los asentamientos representan perdida de bordo libre, por lo tanto, esto debe considerarse en al momento de definir la altura definitiva del mismo.
- Las propiedades de los materiales para el caso del cuerpo de terraplén son valores típicos de la zona, por lo tanto, lo más adecuado, es emplear materiales con características similares o mejores a las empleadas en este estudio, esto a partir de los bancos disponibles en la zona.
- Realizar un estudio geotécnico a detalle de las diferentes secciones a proteger con el bordo, esto con el fin de tener bien definidas las propiedades del suelo y así tener un diseño más certero.
- Se recomienda la protección del talud aguas adentro con el fin de proporcionar estabilidad, reducir la erosión, al igual que reducir las fuerzas de filtración y pérdida de bordo libre a través de geomembranas y goetextiles.

2.8.5 Estabilidad de taludes

Para definir los taludes de los bordos más apropiados a nivel conceptual se consideraron las condiciones geotécnicas. Con dichas condiciones del suelo de apoyo se realizaron los análisis necesarios para determinar las condiciones de estabilidad, tomando en cuenta tanto las condiciones actuales como las futuras. Así como, los procedimientos de construcción que

resulten compatibles con las condiciones del sitio. En el Anexo XV se encuentran las características geotécnicas consideradas para este análisis.

De esta forma, el objetivo planteado desde el nivel conceptual fue el analizar mediante modelación numérica las condiciones de estabilidad, seguridad y funcionalidad de los taludes artificiales que formarán parte del bordo perimetral.

Para la formación de los bordos propuestos en el Lago Tláhuac-Xico, los principales aspectos de diseño considerados son los siguientes:

- Selección del material
- Ancho de la corona
- Bordo libre
- Estabilidad de taludes
- Cimentación
- Geometría de los bordos

2.8.3.6 Análisis de estabilidad

Sobre las consideraciones determinadas para este análisis, los bordos deben tener una pendiente no mayor de 1 sobre la horizontal y 3 sobre la vertical cuando el suelo es estable y pueden ser altamente compactados para evitar fallas. Para el presente Proyecto se consideró una sección con pendiente 2:1 en el lado seco y 3:1 en el lado húmedo y a partir de los resultados obtenidos en las revisiones de estabilidad, se determinará su conveniencia o se realizarán las modificaciones correspondientes.

Para determinar la sección transversal del bordo considerado para el Lago, es necesario revisar diferentes inclinaciones de talud, iniciando con una configuración mínima de 1:1 (H: V). Para ello, se realizaron los análisis de estabilidad que a continuación se enuncian:

Cargas consideradas en los análisis

Se consideraron dos tipos de acciones que son: acciones permanentes causadas por carga muerta y acciones variables causadas durante la operación.

La carga muerta total es la correspondiente al peso propio del bordo más la sobrecarga que deba soportar la corona, ya sea el peso del material con el cual se sobre elevarán los bordos.

Se deberá considerar como carga viva las fuerzas gravitacionales que actuarán en el bordo, que no tiene carácter permanente, para el presente proyecto se considerará una sobrecarga máxima de 2.25 ton/m^2, que representa el peso del vehículo de mayor carga que transitará eventualmente sobre los bordos.

Estabilidad General de taludes

Se realizó un análisis geotécnico de acuerdo con la información recopilada de estudios previos para evaluar la estabilidad general de los taludes recomendados, prestando especial atención en las implicaciones que la geometría transversal tendría sobre el procedimiento de construcción, así como el comportamiento de largo plazo. Se revisó la estabilidad general y local de las secciones transversales en condición estática, flujo establecido y de vaciado rápido.

Se analizó la estabilidad del bordo utilizando un software para análisis por el método de equilibrio límite analizando diversas secciones de los bordos, consideradas como críticas por el método de las dovelas. Las secciones críticas se definieron con base en la geometría del bordo y en las condiciones geotécnicas del sitio. Se evaluó cada sección considerada como crítica bajo diferentes condiciones a las que el bordo podría enfrentarse durante su vida útil y se corroborará que el Factor de Seguridad de la superficie de falla más desfavorable para cada análisis, cumpla con los Factores de Seguridad mínimos preestablecidos. En este documento se ha definido como "Talud Interno" el lado del bordo que se encuentra dentro de la zona de inundación y como "Talud Externo" el lado del bordo que se encuentra fuera de dicha zona de inundación. Los siguientes análisis fueron realizados:

- Análisis estático: se evaluará que el Talud externo y el Talud interno de cada sección crítica del bordo del Lago cumplan con el Factor de Seguridad recomendado presentado en la Tabla 23. Para este caso se consideró que el nivel del agua del Lago corresponda con el Nivel de Aguas Máximas Extraordinario (NAME).
- Análisis de vaciado rápido: se realizará al Talud Interno del bordo, considerando que el nivel de agua del Lago tiene un súbito descenso del Nivel de Aguas Máximo Ordinario (NAMO). Se verificó que el Factor de Seguridad de la superficie de falla más desfavorable de cada sección, cumpla con el Factor de Seguridad Mínimo presentado en la Tabla 23.
- El Factor de Seguridad de la superficie de falla más desfavorable del Talud Externo de cada sección, debe cumplir con el Factor de Seguridad Mínimo de acuerdo con las condiciones planteadas presentado en la Tabla 23.

Tabla 23. Factores de seguridad permisibles (Duncan, 2005; Comisión de Vialidad y Transporte Urbano COVITUR, 1987)

Tipo de Análisis	Factor de Seguridad mínimo
Condición estática, talud interno	1.50
Condición estática, talud externo	1.50
Talud con sobrecargas permanentes en la corona	≥1.50
Talud con sobrecargas en la corona	≥1.50
Flujo establecido	1.30
0.75NAME + Sismo	1.01
Vaciado rápido	1.10

Considerando las características de la zona, así como, lo establecido para los bordos (con sobrecargas no permanentes), el factor de seguridad mínimo de referencia para los análisis descritos a continuación será de 1.5.

Estabilidad de talud izquierdo

Los métodos utilizados para este análisis de estabilidad de taludes fueron: Fellenius, Bishop, Jambu, Spencer y Mongestrer.

Para el talud izquierdo del bordo perimetral, en la Tabla 24 se muestran los resultados del factor de seguridad, para cada método de análisis contra diferente ángulo del talud.

En el Anexo XV se muestran los esquemas del bordo perimetral resultado del cómputo realizado utilizando software para análisis por el método de equilibrio límite de acuerdo con el ángulo de talud. Así mismo, en la Tabla 24 se observa que el factor de seguridad para las relaciones 2:1 y 3:1 es mayor a lo recomendado (1.5).

Tabla 24. Resultados de análisis talud izquierdo

Método de análisis	Ángulo de talud		
	1:1	2:1	3:1
Fellenius	1.222	1.627	1.699
Bishop	1.150	1.622	1.673
Jambu	1.179	1.538	1.577
Spencer	1.135	1.617	1.671
Morgenster	1.148	1.618	1.671

Estabilidad de taludes aguas arriba

Para el talud derecho del bordo perimetral, en la Tabla 25 se muestran los resultados del factor de seguridad, por cada método de análisis contra el ángulo del talud. Dando como resultado su factor de seguridad menor a 1.5, así pues, para mantener la estabilidad se analizó el talud con una berma.

Los esquemas del bordo perimetral resultado del cómputo realizado utilizando software para análisis por el método de equilibrio límite se observan en el Anexo XV.

Tabla 25. Resultados de análisis talud derecho

Método de análisis	Ángulo de talud		
	2:1	3:1	5:1
Fellenius	1.032	1.142	1.243
Bishop	0.990	1.123	1.233
Jambu	0.904	1.069	1.129
Spencer	1.003	1.136	1.250
Morgenster	1.016	1.152	1.269

Derivado que, en el primer análisis realizado al talud derecho del bordo perimetral, su factor de seguridad fue menor a 1.5, a continuación, se presentan los resultados de los taludes con berma (5.00 m, 7.50 m y 10.00 m).

En la Tabla 26 se muestran los resultados del factor de seguridad, por cada método de análisis contra el ángulo del talud de relación 2:1 (horizontal:vertical). Dando como resultado su factor de seguridad menor a 1.5, para los cinco métodos con berma de 5 m y 7.5 m, con berma de 10 m con el método de Morgenster es con el que se estima un factor de seguridad mayor al mínimo de 1.5.

Los esquemas resultantes del bordo perimetral resultado del cómputo realizado utilizando software para análisis por el método de equilibrio límite pueden encontrarse en el Anexo XV.

Tabla 26. Resultados de análisis talud derecho relación 2:1.

Método de Análisis	Berma		
	5 m	7.5 m	10 m
Fellenius	1.154	1.276	1.456
Bishop	1.132	1.267	1.464
Jambu	1.057	1.158	1.312
Spencer	1.155	1.296	1.194
Morgenster	1.173	1.316	1.520

En la Tabla 27 se muestran los resultados del factor de seguridad, estimado por cada método de análisis contra el ángulo del talud de relación 3:1 (horizontal: vertical). Dando como resultado un factor de seguridad menor a 1.5, con una berma 5 m y en algunos casos con berma de 7.50 m; se observa que con una berma de 10 m la estimación por todos los métodos resulta en un factor de seguridad superior a 1.5.

En el Anexo XV se encuentran los esquemas del bordo perimetral resultantes del cómputo realizado utilizando software para análisis por el método de equilibrio límite, así mismo, en los tres casos se puede ver el factor de seguridad.

Tabla 27. Resultados de análisis de talud derecho relación 3:1.

Método de Análisis	Berma		
	5 m	7.5 m	10 m
Fellenius	1.278	1.482	1.747
Bishop	1.269	1.489	1.763
Jambu	1.160	1.337	1.526
Spencer	1.292	1.515	1.774
Morgenster	1.312	1.537	1.768

Así pues, de acuerdo con los análisis descritos, para el talud izquierdo la relación 2:1 cumple con un factor de seguridad mínimo recomendado, mientras para el talud derecho la relación 3:1 cumple con un factor de seguridad mínimo recomendado, para un nivel de agua de 1 m por debajo del nivel de corona y en caso de vaciar la laguna se considerará una berma de 7.5 m o 10 m y una relación de talud de 3:1 para que sea posible cumplir con el factor de seguridad.

2.8.6 Procedimiento para aumentar la capacidad del Lago mediante Dragado

Para alcanzar el volumen de almacenamiento requerido para el Lago Tláhuac-Xico descrito previamente, se consideró dentro de las alternativas evaluadas el dragado del material del fondo del Lago. De acuerdo con las características actuales del Lago y los resultados de los estudios descritos en la sección “Características del Lago” previo, se estableció contemplando la cota del Nivel Máximo de Operación (2226.0 m), y el umbral preliminar definido por los resultados de la geotecnia y geofísica para profundizar de 1 m el vaso del Lago. De esta forma, la rasante en el fondo se considera para los métodos de dragado de 2225.0 m. Las zonas del Lago consideradas apropiadas por su profundidad para esta alternativa son las 3 y 4S.

A continuación, se describen las alternativas evaluadas para este método: Dragado de arrastre, Dragado marino y Dragado Mixto (arrastre y marino).

2.8.3.7 Dragado de arrastre

El dragado de arrastre fue evaluado como alternativa para incrementar la capacidad del Lago. La draga de arrastre es una máquina excavadora equipada con una pluma y cucharón, balde y/o almejas, se emplea, en zonas con baja profundidad de agua. Con el cucharón excava y deposita directamente al camión de volteo y en forma similar lo realiza una excavadora hidráulica, Figura 66.

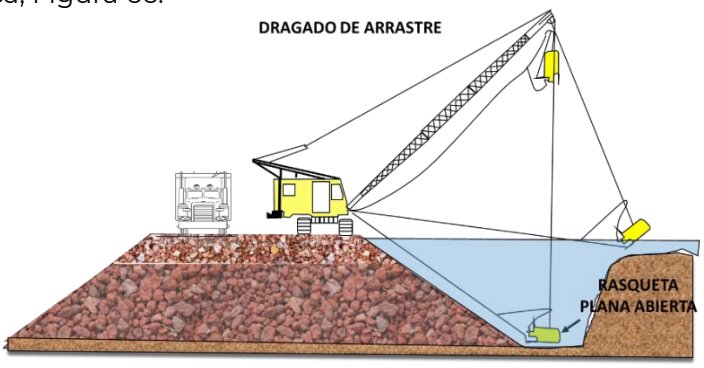


Figura 66. Dragado de arrastre

El proceso considerado para su evaluación de acuerdo con las características del Lago, consiste en la excavación con dragas de arrastre y excavadoras, mediante la extracción del suelo arcilloso de la zona, utilizando un cucharón hasta profundizar a la cota requerida depositando el material a carga directa en las góndolas. Para ejecutarlo, es necesaria la construcción de caminos de acceso, puentes provisionales y peines de penetración para la colocación del material hasta el banco de tiro autorizado, en la Figura 67se ilustra lo descrito.



Figura 67. Propuesta de circuitos, peines y caminos de acceso y salidas

De esta forma, los trabajos que se consideran para esta propuesta son los siguientes:

- Excavación del suelo arcilloso lacustre por medios mecánicos (utilizando dragas de arrastre o excavadoras hidráulicas) y rectificación de las márgenes del lago para dejar una geometría basada en tangentes y curvas con playones con un talud exterior de 2:1, un talud interior 3:1 para prevenir la falla por vaciado.
- Conformación de los bordos perimetrales del lago, para obtener la geometría definida y prevenir la falla de los taludes por efecto del llenado y vaciado del vaso, para se ha

considerado las recomendaciones derivadas de la alternativa de bordos en cuanto a taludes.
- Rehabilitación de los caminos en la zona para permitir el acarreo de los materiales producto del dragado y/o desazolve, así como la construcción de pasos provisionales sobre distintos drenes.

2.8.7 Dragado marino

La propuesta correspondiente con dragado marino consiste en profundizar el vaso del lago en la zona que actualmente es inundable con mayor profundidad, esto es, las zonas 3 y 4S en donde se cuenta con el tirante apropiado para desarrollar los trabajos a través de este método (Figura 68). Para lo cual, se deberán habilitar tarquinas, para el almacenamiento temporal del material desazolvado, debiendo de realizar la conformación de caminos de acceso y salida; así como de circuitos de movilidad a la zona de tarquinas.

La elección del equipo de dragado se realiza tomando en cuenta una serie de aspectos, siendo los principales:
- Las características del suelo a dragar
- La profundidad de dragado
- Las condiciones ambientales

La draga de cortador consiste en un pontón o un barco que aloja las bombas centrífugas para producir la succión de la mezcla de agua y sedimento. Así como, una estructura que se baja hasta el fondo y sostiene un eje con un cortador que gira en sentido normal al eje del tubo de succión. Este cortador es el responsable de la disgregación del material que al mismo tiempo es transportado por la corriente de agua generada por la succión. La draga trabaja en forma estacionaria desplazándose hacia un lado y hacia el otro a medida que va realizando el corte. La draga se mantiene en posición mediante pilones. El material dragado se transporta mediante tuberías hasta la superficie y desde allí se impulsa mediante cañerías hasta el lugar de descarga. Algunas están equipadas con dispositivos para la carga de barcazas. Algunas dragas grandes son autopropulsadas para permitir el desplazamiento entre sitios de trabajo.

Para esta propuesta, los trabajos que se consideran son los siguientes:
- Construcción de caminos de acceso provisionales.
- Limpieza y extracción de maleza acuática (lirio y tule) en forma manual o mecánica.
- Construcción de pasos provisionales sobre los drenes existentes
- Conformación y habilitación de tarquinas en la cantidad que resulte requerida para depositar el producto del dragado del lago.
- Desazolve con draga marina
- Afine de los taludes perimetrales del vaso de acuerdo con lo especificado previamente.
- Carga y acarreo del material producto del afine, limpieza o desazolve.

- Disposición del material producto de esta actividad al sitio de tiro autorizado.

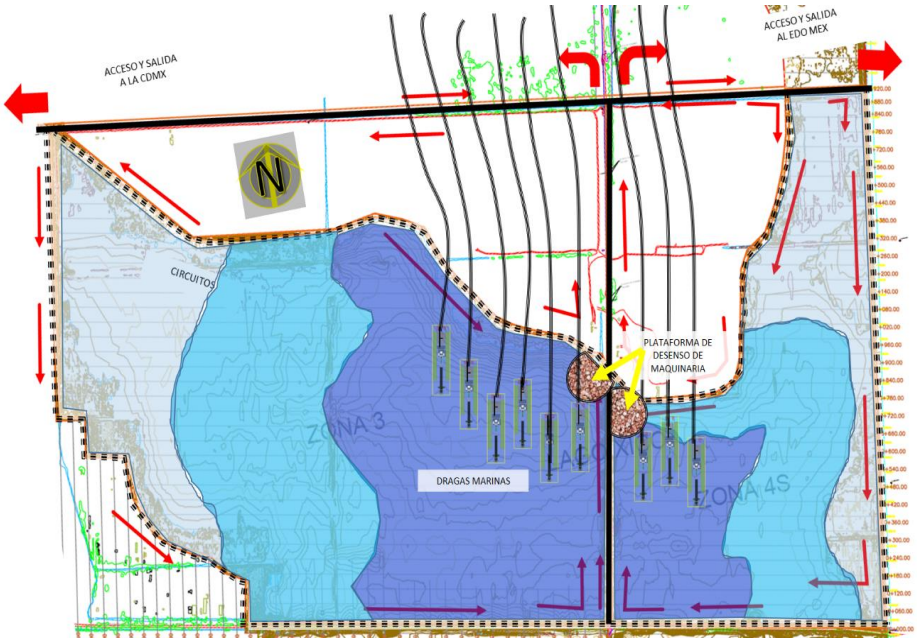


Figura 68. Zonas de Dragado Marino.

2.8.8 Dragado mixto: arrastre y marino

Una tercera alternativa evaluada para alcanzar la profundidad requerida para llegar al volumen de 12 hm^3, es la compuesta por el dragado de arrastre y marino.

Este método de profundización consiste en la excavación con dragas de arrastre y la excavación con dragas marinas mediante un sistema combinado. En zonas secas o con bajo nivel de agua, se realiza con dragas de arrastre mediante la implementación de peines y apoyo de góndolas para el acarreo del material excavado o desazolvado depositado en un banco de tiro. En zonas profundas se procedería a la utilización de dragas marinas, por lo que sería preciso hacer uso de presas de lodos o tarquinas y bancos de tiro. Figura 69.

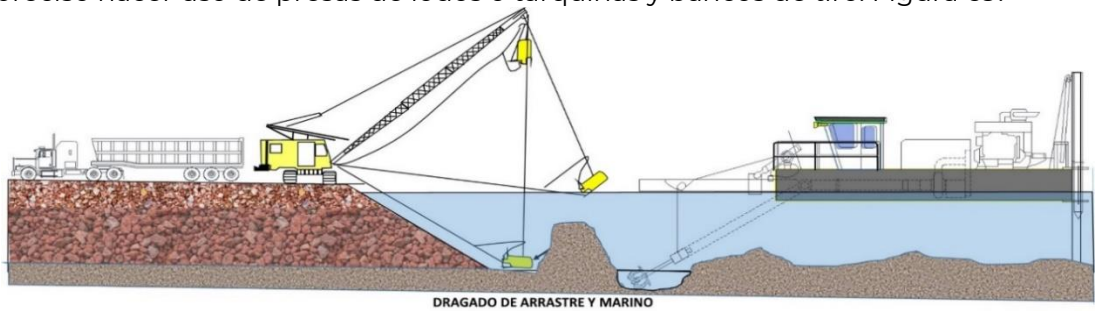


Figura 69. Dragado de arrastre y marino

Se deberá de considerar el estudio de la zona y considerar los equipos con los que se ejecutaran los trabajos de dragado.

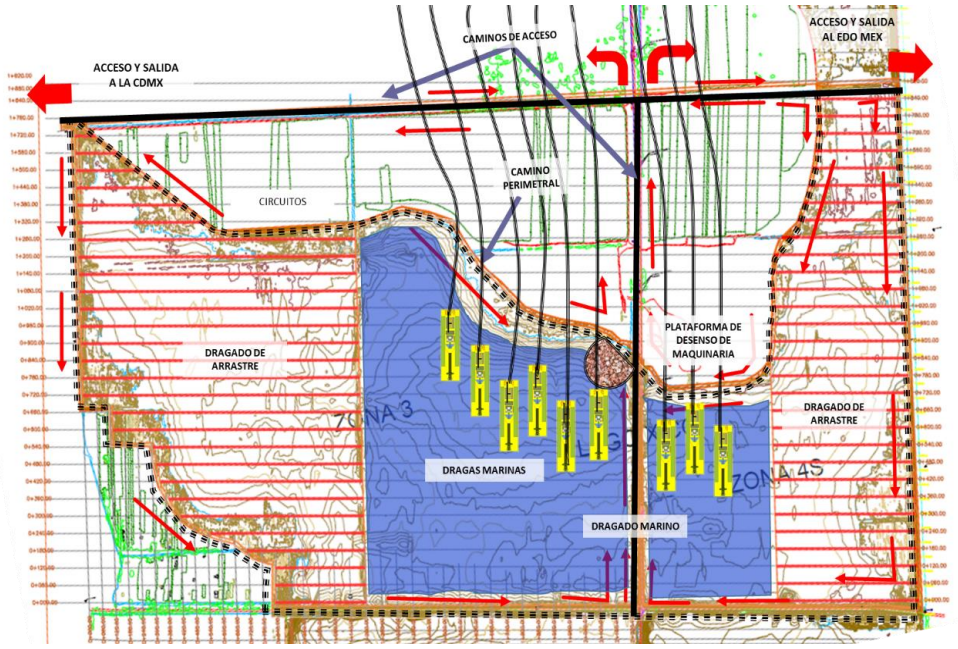


Figura 70. Planteamiento de alternativa de dragado mixto

Para este método se considera el dragado de arrastre empleando peines de penetración con una corona de trabajo de 10 metros con un talud 3:1 y una separación de eje a eje de 60 m; y el dragado marino se realizará en la zona con presencia de agua, que cumpla con el nivel requerido que oscila de 0.90 a 1.50 metros de acuerdo a las características del equipo, empleando líneas de descarga con tubería de polietileno alta densidad hasta 2.00 kilómetros de longitud y de ser necesario se auxiliara con estaciones de rebombeo y el material producto del dragado se deposite en las tarquinas dispuestas para el depósito del material producto del dragado marino. En la Figura 70 se muestra el planteamiento de esta alternativa.

Para esta propuesta, los trabajos que se consideran son los siguientes:

- Construcción de caminos de acceso provisionales.
- Desazolve con draga de arrastre en el Lago (y pasos descritos en la sección correspondiente)
- Construcción de pasos provisionales sobre los drenes existentes
- Profundización mediante dragado marino (y pasos descritos en la sección correspondiente)
- Desazolve con draga marina del vaso del Lago

2.8.9 Procedimiento combinado para aumentar la capacidad de almacenamiento del Lago Tláhuac-Xico: Elevación de bordo perimetral y dragado marino

Considerando los costos que podrían derivarse de las anteriores alternativas, se realizó la evaluación de un procedimiento combinado para incrementar el volumen de almacenamiento y la capacidad del Lago Tláhuac-Xico. Este método consiste en la Elevación del Bordo Perimetral del Lago y el Dragado Marino, con el propósito de reducir el volumen de material por dragar y compensarlo con la elevación de bordos. Considerando además que el dragado marino reduce la invasión e impactos que podrían ser producidos por el dragado de arrastre. En la FiFigura 71 se observa el esquema de esta propuesta.

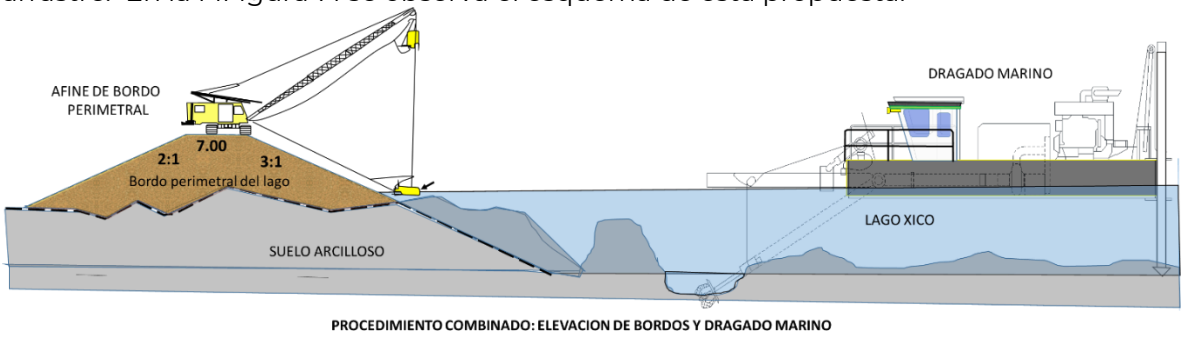


Figura 71. Procedimiento combinado: elevación de bordos y dragado marino

Para este procedimiento se consideraron los siguientes trabajos, algunos de ellos han sido descritos previamente:

- Levantamientos topográficos antes de iniciar los trabajos
- Sobre elevación de bordos
- Dragado marino
- Carga y acarreo del material producto del afine, limpieza o desazolve

Se recomienda que, para cualquier opción para incrementar el volumen de almacenamiento del Lago, sean considerados levantamientos topográficos a detalle de acuerdo con las características de la zona y el procedimiento seleccionado. Así mismo, se recomienda contemplar la obligatoriedad de la gestión ambiental y de cambio uso de suelo requeridas para todas las etapas del proyecto, de acuerdo con lo establecido por la Dependencia competente. Así como, lo establecido en las leyes, reglamentos y normativa en materia ambiental, de Impacto Ambiental y Forestal y todas aquellas que resulten aplicables y vigentes.

De la misma forma, deberán considerarse los aspectos de seguridad e higiene en las actividades que resulten necesarias para el desarrollo y ejecución del proyecto. Se determinarán las prevenciones y el establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de las leyes y disposiciones normativas vigentes aplicables en esta materia.

2.8.10 Análisis multicriterio para selección de alternativa para incrementar capacidad del Lago

Se realizó una valoración o evaluación de las alternativas planteadas para incrementar la capacidad de almacenamiento del Lago. Lo anterior, a partir de la información recopilada y generada en los apartados previos. La valoración o evaluación de alternativas es parte fundamental para establecer las alternativas viables de acuerdo con las condiciones de la

zona y los objetivos planteados, considerando además la proyección de crecimiento poblacional.

Considerando lo anterior, se utilizó una matriz de evaluación para discriminar la alternativa viable de acuerdo con lo siguiente: el incremento en la capacidad del Lago en términos de volumen que cada alternativa puede ofrecer, el importe estimado requerido y el tiempo estimado para que la alternativa sea ejecutada.

De esta forma, la alternativa seleccionada debe encaminarse al uso eficiente de los recursos disponibles para brindar de forma adecuada el servicio para el cual fue concebido.

Así pues, de acuerdo con la información mostrada, en la Tabla 28 se muestra la matriz discriminante. En la cual se observa que la alternativa que cumple en cuanto a capacidad, costo y tiempo requerido para ejecución (15 meses), es la alternativa combinada que considera la elevación del bordo perimetral y el dragado marino. Con la cual podría incrementarse la capacidad del Lago de la forma más viable considerando las tres variables descritas y en comparación las alternativas de dragado y bordos individualmente, y descritas previamente.

Tabla 28. Matriz discriminante, Alternativas de profundización del Lago.

	Volumen	Costo del incremento de la capacidad de almacenamiento del Lago Tláhuac-Xico	*Costo de inversión por m³	Variables evaluadas			Descripción
				Capacidad	Importe	Tiempo	
Bordo perimetral	6 hm³	$209 MDP	$8.7/m³	No cumple	Bajo	Cumple	No cumple con el volumen requerido, costo de inversión bajo.
Dragado de arrastre	12 hm³	$3,194 MDP	$37.75/m³	Cumple	Alto	Cumple	Presenta el costo más alto de las alternativas evaluadas. Es el procedimiento más invasivo por la construcción de peines.
Dragado marino	12 hm³	$2,134 MDP	$23.87/m³	Cumple	Medio	Cumple	Presenta un costo medio, aunque más alto que el método combinado.
Dragado mixto (arrastre y marino)	12 hm³	$2,892 MDP	$30.57/m³	Cumple	Alto	Cumple	Presenta un costo alto, es un procedimiento invasivo por la construcción de peines del dragado de arrastre. El 2° costo de inversión estimado más alto.
Bordo perimetral y dragado marino	12 hm³	$825 MDP	$12.29/m³	Cumple	Bajo	Cumple	Con la alternativa combinada de sobre elevación de bordos y dragado marino se cumple con el volumen requerido. Se reduce el impacto del dragado de arrastre. Costo de inversión cumple. Por lo que, la combinación de estos métodos cumple con la capacidad, y el importe estimado se encuentra por debajo del importe promedio, así mismo, cumple en cuanto a tiempo.
Costo promedio		$1,851.00	*calculado para una tasa de descuento del 10% y una vida útil de 30 años.				

2.10 Colectores/Fuentes

2.10.1 Introducción

El segundo componente evaluado para el Proyecto de aprovechamiento y manejo ambiental del Lago Tláhuac-Xico fue el denominado “Colectores”. Cuyo objetivo fue el de definir la alternativa viable para suministrar agua en la cantidad requerida al Lago Tláhuac-Xico de acuerdo con la capacidad propuesta y considerando la infraestructura hidráulica en la zona y la disponibilidad de agua.

De esta forma, para lograr el volumen de almacenamiento de hasta 12 hm^3 planteado en la sección anterior, bajo las consideraciones establecidas para el proyecto integral resulta necesario garantizar el suministro al Lago de cierto caudal.

Como resultado del análisis de la información proporcionada, la recopilada y la generada en el Balance Hídrico, es posible establecer cuando menos tres alternativas a nivel conceptual que permitirían suministrar agua al Lago Tláhuac-Xico.

Las alternativas referidas toman como punto de partida el planteamiento original contenido en el “Plan Hídrico de las subcuencas La Compañía y Tláhuac Xico” (Comisión de Cuenca de los Ríos Amecameca y La Compañía, y Universidad Autónoma Metropolitana, 2011) que consiste en aprovechar en primera instancia el agua generada en la subcuenca propia del Lago y gestionar integralmente su uso, para luego dar paso al uso del agua cuya fuente lo constituyen aguas pluviales y residuales cuyo origen reside en las subcuencas “La Compañía” y “Amecameca”, respectivamente.

De las tres alternativas planteadas, las dos primeras privilegian como fuente el agua proveniente de la subcuenca del Lago Tláhuac-Xico, mientras que la tercera alternativa considera las aguas pluviales y residuales de las subcuencas de La Compañía y Amecameca.

El volumen de agua a utilizar en las alternativas aquí planteadas se encuentra ligado al balance hídrico de las subcuencas, mismo que considera el total de aportaciones sanitarias, pluviales, salidas y pérdidas de agua. Así como, la operación de la infraestructura hidráulica existente y actualmente en operación, mostrado de forma previa en este informe.

Consideraciones:

- La propuesta de alternativas toma como referencia el volumen actual del lago estimado en 3 millones de metros cúbicos (3 hm^3).
- Las alternativas consideran como referencia la disponibilidad de agua de las fuentes presentadas.
- De acuerdo con la información presentada en este informe, es necesario ingresar como aguas crudas un total de 1,200 L/s para su tratamiento.

2.10.2 Descripción de alternativas conceptuales

2.10.2.1 Aprovechamiento de agua pluvial y residual de las microcuencas urbanas de Chalco y Tláhuac

Esta primera alternativa considera captar los escurrimientos pluviales de las colonias del municipio de “Valle de Chalco” y la alcaldía “Tláhuac” mediante la adecuación del drenaje para su separación del sanitario. En ambos casos el agua se canalizaría directamente al Lago Tláhuac-Xico mediante una red de colectores. Se estima que es posible captar hasta 1,460.0 L/s.

Esta alternativa implica las siguientes acciones:

2 Reconexión de colectores existentes a PB08, PB3, PB07, PB14, PB6A, PB06 y PB10 para bombear las aguas residuales hacia el Lago Tláhuac-Xico.

3 Rehabilitación de las plantas PB08, PB3, PB07, PB14, PB6A, PB06 y PB10 y acondicionamiento para bombear el agua pluvial y residual, incluye reequipamiento, obra civil y eléctrica.

4 Conducción de descarga de las plantas de bombeo, cruce con el canal general, hasta el canal influente en el Lago Tláhuac-Xico.

5 Profundización de lago para almacenar 12 Hm^3

Una estimación de la inversión requerida para ejecutar esta primera alternativa, muestra un precio nivelado o paramétrico de producción de agua de $ 11.86 pesos por metro cúbico (m^3) y Figura 72**.** Los precios estimados se encuentran en el Anexo XVI.

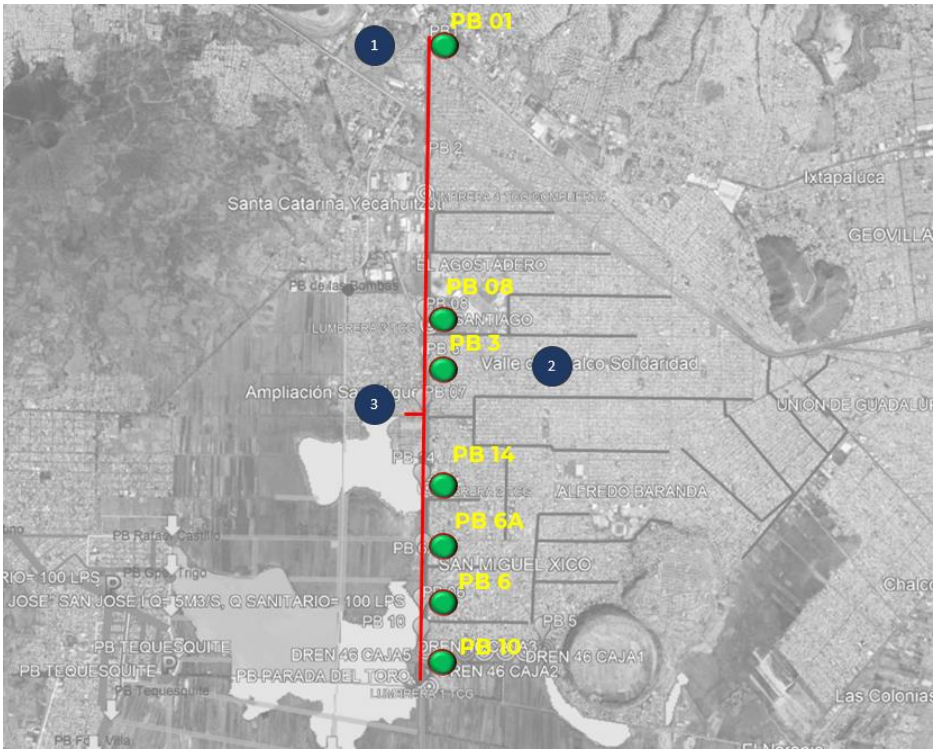


Figura 72. Esquema conceptual correspondiente a la alternativa 1

2.10.3 Aprovechamiento de agua residual de la Planta de Bombeo La Caldera

Esta alternativa plantea obtener agua de la planta de bombeo “La Caldera” (PB La Caldera), canalizarla a través del canal general hacia una planta de tratamiento (PTAR) que la conduzca, ya con mejor calidad, al vaso del lago. Con base en la información proporcionada por la CAEM, el gasto medio en la lumbrera es de 2.8 m^3/s, por lo que de no estar comprometida en otros usos esta agua, es posible emplear 1.0 m^3/s como fuente de agua (Figura 73).

Esta alternativa implica las siguientes acciones, en la Figura 74 se presenta el esquema conceptual de la alternativa:

1 Rectificación de 7.9 km del Canal General (PB La Caldera a PB Parada del Toro).
2 Estructura de Conducción y Control del Canal Liconsa y descarga a la L3 TCG mediante lumbrera adosada en el interior de la lumbrera.
3 Construcción Estructuras de control e instalación de compuertas, para invertir el flujo de CG en las PB (1,2 y 3) existentes.
4 Se conservan PB (1, 2 y 3) existentes sobre el CG, y los cárcamos de bombeo con su equipamiento para operar en emergencia.
5 Construcción de PB4, sobre CG para enviar caudal de norte a sur del Canal a la PTAR Parada del Toro.
6 Construcción de estructuras de control e instalación de compuertas, y descarga a L1 TCG mediante lumbera adosada en el interior de la lumbrera.
7 Construcción de PB Ameca, sobre CG para enviar caudal proveniente del Río Ameca de sur a norte y bombear caudal al Lago Tláhuac-Xico.
8 9Construcción de Rebombeo para Q= 50 L/s y colector “Vicente Guerrero” con L=3.87 km, para verter a la PTAR Parada del Toro.
9 10.- Construcción de Rebombeo para Q= 100 L/s y colector “La Lupita” con L=1.88 km, para verter de PTAR La Lupita a PTAR Serpentino.
10 Construcción de Rebombeo para Q= 5 L/s y colector “Serpentino” con L=2.5 km, para verter a la PTAR Serpentino.

Una estimación de la inversión requerida para ejecutar esta primera alternativa muestra un precio nivelado o paramétrico de producción de agua de $ 11.19 pesos por metro cúbico (m^3). La información de precios estimados puede ser consultada en el Anexo XVI.

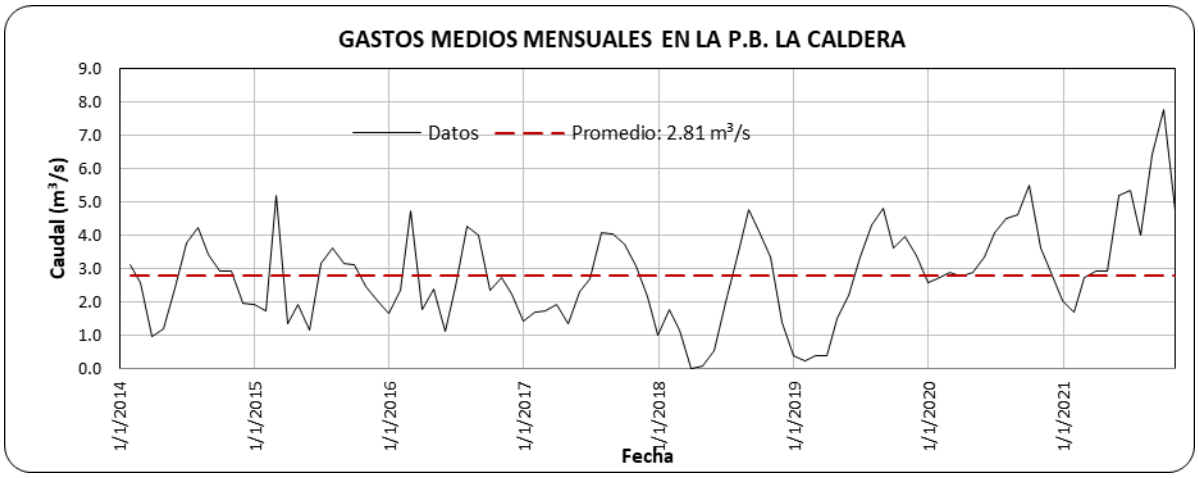


Figura 73. Potencial de agua residual en la zona de estudio

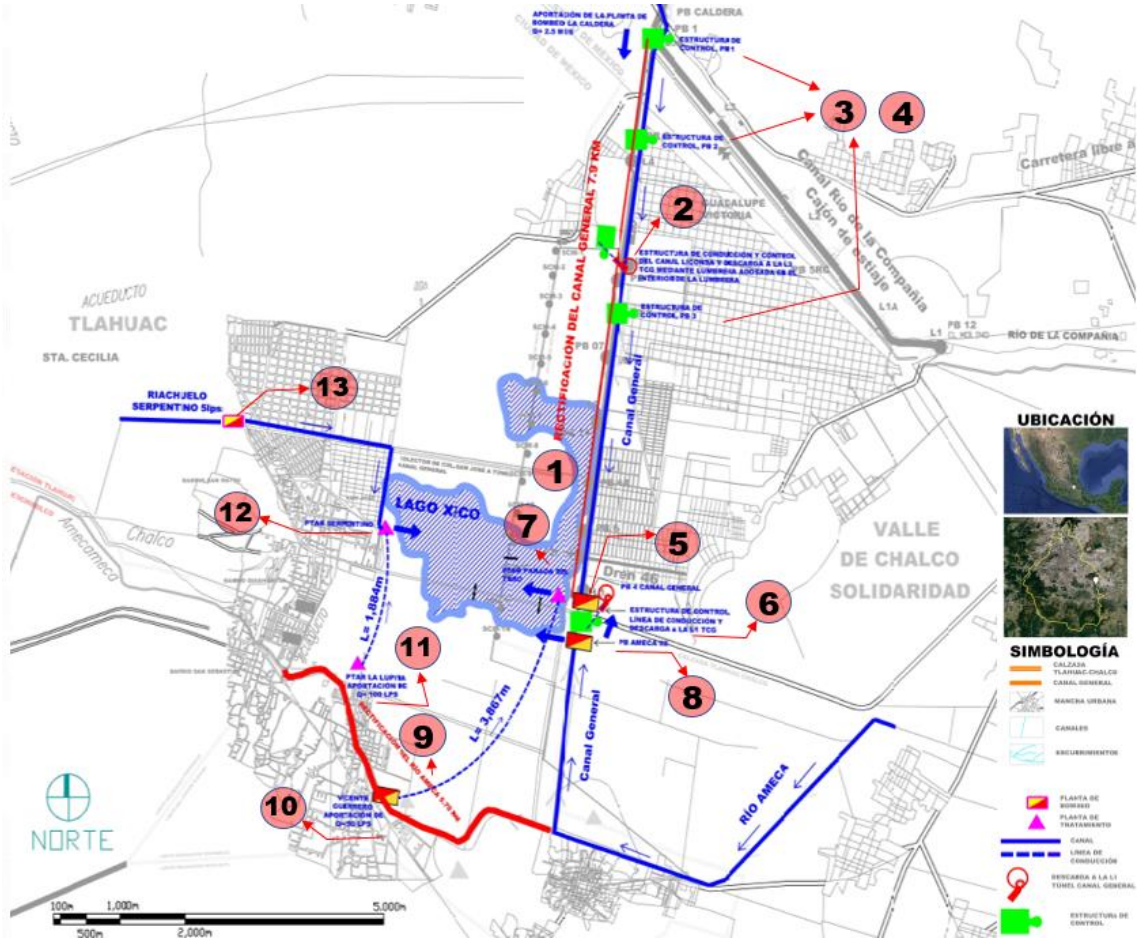


Figura 74. Esquema conceptual correspondiente a la alternativa 2

2.10.4 Aprovechamiento de aguas residuales de Valle de Chalco y Tláhuac, canal Liconsa y Canal General

Esta alternativa plantea obtener agua residual de Valle de Chalco, Tláhuac, canal Liconsa, Canal General y los escurrimientos superficiales ubicados al sur de las zonas 1 y 2 (Figura 75). Esta alternativa implica las siguientes acciones:

1 Las Plantas de Bombeo existentes sobre el Canal General PB1, PB2 y PB3, se conservan, así como, los cárcamos de bombeo con su equipamiento para operar en emergencias.
2 Estructura de Conducción y control del canal de Liconsa en la PB3 para descargar en el tramo invertido.
3 Rectificación de 3.9 km del Canal General (Desde la Planta de Bombeo PB3 a la Planta de Bombeo Parada del Toro), para invertir el Flujo de Canal General de norte a sur.
4 Construcción de Planta de Bombeo, sobre Canal General para enviar el caudal invertido de norte a sur del Canal a la PTAR.
5 Construcción de Estructuras de control e instalación de compuertas, así como Línea de Conducción de 1.83 m de diámetro interior con tubería de concreto reforzado y descarga a la lumbrera L1 TCG mediante lumbera de descarga en el interior de esta.

Una estimación de la inversión requerida para ejecutar esta primera alternativa, muestra un precio nivelado o paramétrico de producción de agua de $ 4.42 pesos por metro cúbico (m^3), en el Anexo XVI se muestran los detalles sobre el precio estimado.



Zona	Area (km2)	Volumen actual (hm3)	Volumen (hm3) 1.2m + 0.3m bordo
Zona 1	0.36	0.21	0.45
Zona 2	0.35	0.29	0.71
Zona 3	2.03	2.56	4.99
Zona 4 S	0.81	0.51	1.49
Zona 4 N	0.76	0.95	1.91
Humedales	0.32	0	0.23
Suma	**3.92**	**4.07**	**8.61**

Figura 75. Esquema conceptual correspondiente a la alternativa 3

2.10.5 Selección de alternativa viable

Como se ha descrito previamente, las tres alternativas relacionadas con el componente de Colectores/Fuentes, pueden brindar la cantidad de agua determinada para satisfacer la dinámica planteada en el Lago. De esta forma, para la selección de la alternativa más viable se consideró el costo de inversión estimado.

Tabla 29. Costo de inversión de alternativas Colectores/Fuentes

Concepto	Costo de inversión $/m³	Caudal de aportación	Importe	Tiempo
Alternativa 1	$ 11.86	Cumple	Alto	Cumple
Alternativa 2	$ 11.19	Cumple	Alto	Cumple
Alternativa 3	$ 4.42	Cumple	Bajo	Cumple

Cabe señalar que las alternativas evaluadas fueron desarrolladas a nivel conceptual, por lo cual, esta selección se realiza bajo esta prevención. Caso similar a la alternativa para brindar una mayor capacidad en términos de volumen al Lago y seleccionada a través de la matriz presentada en el análisis multicriterio presentado en la Tabla 27.

2.10.6 Conclusiones y Recomendaciones

En el presente documento se describió la información recopilada y generada de las características de la zona en donde se ubica el Lago Tláhuac-Xico. Así como, el análisis de dicha información para obtener, el balance hídrico, la disponibilidad de agua de diferentes fuentes y la dinámica en Lago.

De esta forma, se identificó el potencial de agua pluvial, residual, tratada y subterránea. De los cuales, el agua residual y la superficial (pluvial, residual y tratada) son las que podrían brindar el mayor caudal para su uso en el Lago.

De los trabajos de campo, se encontró para el fondo del lago una diferencia promedio de 20 centímetros por debajo entre lo identificado en los trabajos realizados por SACMEX durante el año 2019 y los realizados para este proyecto. Así como, en el nivel de la carretera que se encontró 20 cm arriba de lo reportado durante el 2019.

Sobre la elevación de la superficie libre del agua, se identificó que la Zona 1 del Lago, presenta una menor elevación de las 4 zonas. El gradiente hidráulico se presenta de sur a norte, desde la zona 2 hacia la zona 4, con diferencias de nivel de alrededor de 20 cm. De forma general, se observó que la elevación del agua que transita a través del canal general se encuentra más arriba que el nivel del agua en cualquiera de las zonas del lago. Lo anterior permitió comprobar que, hacia la zona oriente del lago, la única forma de trasladar aguas hacia el Canal General es mediante bombeo.

La zona donde se desarrolla el Lago Tláhuac-Xico forma parte del denominado Eje Neovolcánico, un espacio donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos tectónicos desde principios del Terciario, se caracteriza por el predominio de derrames basálticos Cuaternarios, derivados de los numerosos aparatos volcánicos existentes, así como de la

presencia de importantes lagos, cuya morfología, orientación y distribución superficial sugieren estar situados en fosas tectónicas.

La presencia de las sierras perimetrales es uno de los aspectos físicos que caracterizan y limitan a la subcuenca de Chalco (en donde se localiza el Lago). Sin embargo, en su interior el relieve es dominando por llanuras lacustres con altitudes promedio de 2,230 msnm, que solo se ven interrumpidas por la presencia de algunas elevaciones topográficas, de relativa altura.

Geológicamente el relleno de la subcuenca de Chalco, tiene una distribución irregular, lo mismo que su textura, dando como resultado que la secuencia estratigráfica sea compleja. A través de los resultados obtenidos de los sondeos geofísicos y perforaciones directas, se comprobó hasta una profundidad de 25 m la existencia de una secuencia de material lacustre.

Se identificaron rangos de resistividad eléctrica en la zona de 1 a 5 Ohm-m pertenecientes a sedimentos lacustres someros, constituidos por arcillas plásticas y saturadas de baja permeabilidad con intercalaciones de capas delgadas de arena limosa. Se identificaron dos variaciones comprendidas en el intervalo de 1 a 3 Ohm-m y de 3-5 Ohm-m. El primero correspondiente con cambios en contenidos granulométricos y de sales y el segundo correspondiente con arcillas plásticas con contenido de arenas, que se presentan en forma de lentes a una profundidad de 3 a 5 metros.

Se observa la clara presencia de paquetes de lentes arenosos a una profundidad promedio de 2 a 3 metros mismos que se incrementan hasta una profundidad de 10 metros.

Con base en lo anterior, es recomendable que la profundización planteada en la zona del Lago Tláhuac-Xico, se realice a una profundidad máxima de 1.5 m a 2 m, antes de llegar a la zona donde se presentan los lentes de arenas. Así mismo, se recomienda, realizar una caracterización a detalle de los horizontes de arena con el propósito de evitar “fugas”, por estos horizontes permeables.

La profundidad al nivel estático en la zona de interés presenta valores que van de 60 m a 70 m. La dirección del flujo subterráneo se presenta de norte a sur. Los abatimientos en el acuífero Chalco-Amecameca varía de 2 a 1.5 m

Sobre el componente de profundización, se identificó que el método más favorable en términos de la capacidad que puede brindar al lago y el costo de inversión es el método combinado de “Bordo perimetral y dragado marino”. Para ello, se consideró con base en el análisis de estabilidad de taludes, los resultados de geotecnia y geofísica, un talud exterior de 2:1 y un talud interior de 3:1. Así como, una altura de bordo aprovechable de 1.7 m y 30 cm de bordo libre.

Sobre el componente colectores, la alternativa que se identificó con mayor viabilidad fue el aprovechamiento de aguas residuales de Valle de Chalco y Tláhuac, Canal Liconsa y Canal General y los escurrimientos superficiales de la zona 1 y 2 del Lago.

Debido a que las alternativas evaluadas se desarrollaron a nivel conceptual, se recomienda la realización de los estudios que resulten requeridos, que brinden la información a detalle para la realización de los proyectos requeridos.

Por otra parte, se recomienda para todo caso seleccionado la manifestación de Impacto ambiental y resolutivo. Así como, la consideración de las normas aplicables y vigentes para su cumplimiento en los trabajos que sean propuestos, considerando entre ellos la movilidad de material y disposición final, medidas de conservación y manejo, de la flora y fauna del sitio, seguridad e higiene, entre otras.

En general (además de todas las medidas mencionadas), se deberán considerar todas las acciones de prevención orientadas a la protección y conservación del medio ambiente en cada una de las etapas. Así como, dar cumplimiento a cualquier legislación y normativa aplicable y vigente de acuerdo con las acciones que resulten de la propuesta del proyecto ejecutivo.

Se deberá contemplar la integración de los componentes que conforman el proyecto integral con el propósito de gestar el proyecto ejecutivo con el mayor detalle y consideraciones.

Como parte de la integración de información generada en los trabajos de campo realizados, en el Anexo XVII se presentan los planos de las Zonas 3 y 4 (sur y norte) del Lago con nomenclaturas desde 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 4sa, 4sb, 4sc, 4sd, 4na, 4nb y 4nc. La Zona 3 va desde el km 0+000 al 6+823, la Zona 4 sur va desde el km 0+000 al km 4+625 y la Zona 4 norte va desde el km 0+ 000 al km 2+992.

Capítulo 3

Evaluación de la factibilidad técnica y normativa de un proyecto de reúso de agua potable indirecto del Lago Tláhuac- Xico

Normatividad

3.1 Marco normativo internacional para el reúso potable

Algunas organizaciones internacionales y nacionales han desarrollado pautas de referencia para las aplicaciones de reúso del agua, porque un enfoque coherente para la gestión de los **riesgos para la salud y el medio ambiente** derivados del reúso del agua requiere una guía de alto nivel basada en un consenso mayoritario. Dicha orientación se proporciona en forma de un marco de gestión de riesgos para la gestión beneficiosa y sostenible de los sistemas de reúso del agua. Los ejemplos incluyen la orientación proporcionada por organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y organizaciones nacionales de gobiernos federales como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y, en Australia, Consejo Ministerial de Manejo de Recursos Naturales (NRMMC), el Consejo de Protección del Medio Ambiente y Patrimonio (EPHC) y la Conferencia de Ministros de Salud de Australia (AHMC). Estas pautas pueden ser utilizadas por estados que tienen regulaciones o pautas limitadas o nulas (Alcalde Sanz & Manfred Gawlik, 2014)

La Tabla 30 muestra un resumen de las normativas desarrolladas por diferentes organizaciones.

Tabla 30. Normativas desarrolladas para sistema de reúso potable. Modificado de Alcalde Sanz & Manfred Gawlik (2014)

Organización o país	Normativa
Organización Mundial de la Salud (OMS)	Reúso potable Guía para la producción de agua segura (2017)
Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos	Guía de reúso de agua (2012)
Australia	Normativa para el reciclaje de agua: gestión de riesgos para la salud y el medio ambiente. Fase 1, 2006 Normativa para el reciclaje de agua: gestión de riesgos para la salud y el medio ambiente. Fase 2. Aumento del suministro de agua potable (2008).
California, Estados Unidos	Código de Regulaciones de California Título 22. Seguridad social División 4. Salud ambiental Capítulo 3. Criterios de reciclaje de agua
Virginia, Estados Unidos	Código Administrativo de Virginia Título 9 – Medio Ambiente Junta estatal de control de agua Capítulo 740- Reglamento de reclamación y reúso de agua
Colorado, Estados Unidos	Pautas para el reúso directo de agua potable (2019)
Singapur	Junta de Servicios Públicos Agencia Nacional del Agua de Singapur Guía técnica para el reciclaje de aguas grises (2014)

3.1.1 Reúso potable directo

3.1.1.1 Goreangab en Windhoek, Namibia

El proyecto más notable de reúso potable directo es la planta de recuperación de agua de Goreangab en Windhoek, Namibia. Windhoek fue la primera ciudad en implementar la reutilización potable a largo plazo sin el uso de un amortiguador ambiental. El proyecto experimental de Windhoek comenzó en 1969 y se amplió en 2002 a 240 L/s (World Health Organization, 2017). Puede abastecer alrededor del 35% del suministro de agua potable de la ciudad durante el consumo normal de agua y hasta el 50% durante condiciones de sequía severa (Du Pisani, 2006). La filosofía de diseño de la planta sigue el concepto de barreras múltiples. El tren de tratamiento (figura 2.1) de potabilización consiste en coagulación/floculación, seguida por flotación con aire disuelto (DAF) y filtración en medio granular. Posteriormente, el agua se trata con ozono/peróxido de hidrógeno seguido de una filtración con carbón activado granular. La ultrafiltración proporciona una barrera final antes de la estabilización y desinfecciones finales (Edzwald, 2011).

Cuando se desarrolló la primera planta de recuperación en Goreangab en la década de 1960, no había estándares para el reúso potable. Como resultado, en 1973, el Subcomité Técnico de Recuperación identificó los requisitos para garantizar la seguridad del reúso potable. Estos incluían requisitos relacionados con la calidad de las aguas residuales, el control de las descargas industriales, sistemas de tratamiento, el control operativo, el monitoreo de la calidad del agua y la supervisión por parte del director de Salud Pública. Cuando se desarrolló la nueva planta de recuperación de Goreangab, aunque las Directrices de Namibia para el agua potable se habían aprobado en 1988, no había ninguna referencia respecto al uso de aguas residuales tratadas. Como resultado, la ciudad de Windhoek aplicó la autorregulación mediante el desarrollo de normas para la nueva planta a partir de las normas y directrices internacionales existentes para la calidad del agua potable. Se incorporaron múltiples barreras en la nueva planta para eliminar contaminantes o sustancias a niveles específicos y garantizar el cumplimiento de las normas (World Health Organization, 2017).

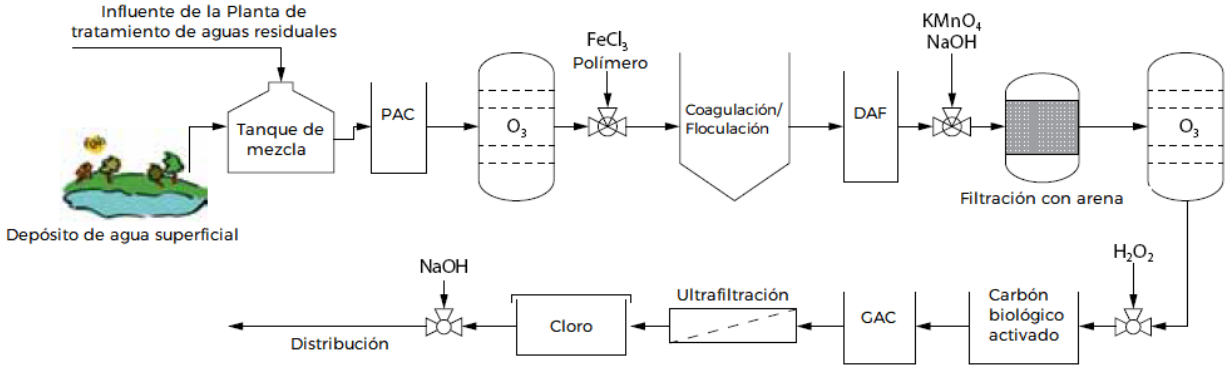


Figura 76. Representación esquemática del sistema de tratamiento de la planta de Goreangab en Windhoek, Namibia. Modificado de (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013).

3.1.1.2 Big Spring, West Texas, EU.

Big Spring es una ciudad en el oeste de Texas. Se encuentra en la cuenca del Pérmico. La cuenca del Pérmico ha estado sujeta a severas condiciones de sequía durante gran parte de los últimos 15 años (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013). El Distrito Municipal de Agua del Río Colorado (CRMWD, por sus siglas en inglés) suministra agua a las ciudades de Big Spring, Snyder y Odessa, así como a Midland, San Angelo y Abilene. La mayor parte del agua suministrada es agua superficial sin tratar de los tres embalses que CRMWD ha construido en el río Colorado: JB Thomas, EV Spence y OH Ivie. Estas fuentes se complementan con reservas de agua subterránea ubicadas en la parte occidental del área de servicio de CRMWD (World Health Organization, 2017). A principios de la década del 2000 era evidente que se necesitarían suministros adicionales para satisfacer la creciente demanda y compensar las reducciones en los rendimientos de los embalses (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013) .

En 2005 se realizó un estudio de factibilidad de reúso que abarcó un análisis de la cantidad y la calidad de los efluentes municipales, contacto preliminar con los reguladores, costos y una estrategia de divulgación pública, entre otras cosas (Environmental Protection Agency, 2017). Las principales categorías consideradas incluyeron categorías no potables como el riego y usos de tipo industrial, así como reúso potable directo y reúso potable indirecto (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013). Varios factores persuadieron al CRMWD para buscar el reúso potable, incluyendo:

- La demanda de reúso no potable tiende a ser muy estacional mientras que la demanda de reúso potable es continua.
- Pocos clientes potenciales importantes para el reúso no potable.
- Para reúso no potable, altos costos en los sistemas de distribución debido a las distancias, baja densidad de población.
- Las condiciones climáticas áridas han restringido el riego de jardines, poca demanda para implementar reúso no potable.
- Las fuentes actuales de agua potable sin tratar y otras posibles fuentes son generalmente distantes y de menor elevación que los usuarios, lo que resulta en altos costos de suministro, mientras que el agua recuperada es local.

En 2012, durante un período de sequía récord en todo Texas, uno de los embalses del río Colorado, el embalse EV Spence, que proporciona agua a Big Spring, se llenó hasta un 0.2 % (Environmental Protection Agency, 2017), con lo cual inició el proyecto de RPD de Big Spring en 2013. La PTAR de Big Spring con capacidad de 162.11 L/s comenzó a transferir 109.53 L/s de efluentes secundarios filtrados a una instalación adyacente denominada Instalación de Producción de Agua Cruda (RWPF, por sus siglas en inglés), cuya función es obtener la calidad de agua potable (Environmental Protection Agency, 2012) (Environmental Protection Agency, 2017). La figura 72 muestra el tren de tratamiento aplicado a este esquema de RPD.

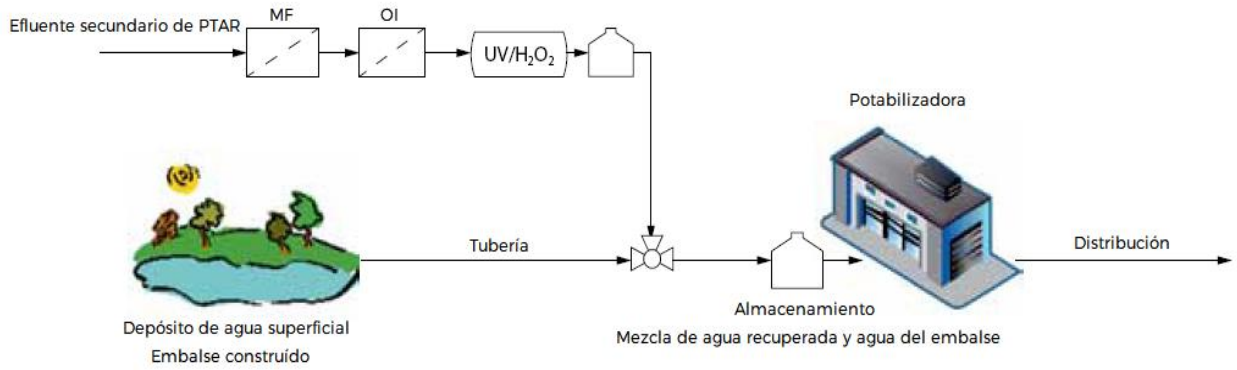


Figura 77. Representación esquemática del sistema de tratamiento de la planta de Big Spring en Texas, E.U. Modificado de (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013).

Al seleccionar los procesos de tratamiento, se consideraron las condiciones locales. El uso de sistemas naturales como humedales o embalses fue impedido debido a las altas tasas de evaporación. En lugar de tal opción, se consideró necesario un riguroso esquema de tratamiento de múltiples barreras. Los suministros de agua en el Distrito tienen un alto contenido de sólidos disueltos, que luego se concentran aún más en el efluente de aguas residuales tratadas. Por lo tanto, la desalinización se indicó como un elemento esencial del tratamiento propuesto para cumplir con los estándares de sólidos disueltos totales (SDT) para el suministro de agua potable (Environmental Protection Agency, 2012).

La Comisión de Calidad Ambiental de Texas (TCEQ, siglas en inglés) asignó los valores de reducción logarítmica para cada proceso unitario en función de la metodología utilizada para las instalaciones de agua potable prescritas en la Norma Mejorada de Tratamiento de Aguas Superficiales a Largo Plazo 2 (figura 73) (World Health Organization, 2017). La microfiltración proporciona la eliminación de material particulado, incluidos los quistes de protozoos resistentes a la desinfección química. La ósmosis inversa proporciona la eliminación de sales disueltas, virus y bacterias, así como muchos compuestos traza como productos farmacéuticos y de cuidado personal. La oxidación avanzada con UV y peróxido de hidrógeno proporciona una barrera adicional contra posibles patógenos y trazas de contaminantes, que no se pueden eliminar mediante OI (Environmental Protection Agency, 2012). Por ejemplo, el tratamiento de oxidación avanzada con UV destruye compuestos de bajo peso molecular como la NDMA, que es un compuesto cancerígeno, también logra una reducción de 1,4-dioxano. El agua producto de esta planta luego se mezcla con el suministro de agua cruda de CRMWD antes de ser tratada por las plantas de tratamiento de agua convencionales de Big Spring, Stanton, Midland, Odessa y, en ocasiones, Snyder. Las plantas de tratamiento de agua utilizan métodos de mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración por medio granular y desinfección. El agua reciclada constituye aproximadamente el 15-20% del volumen total de agua mezclada (Environmental Protection Agency, 2017).

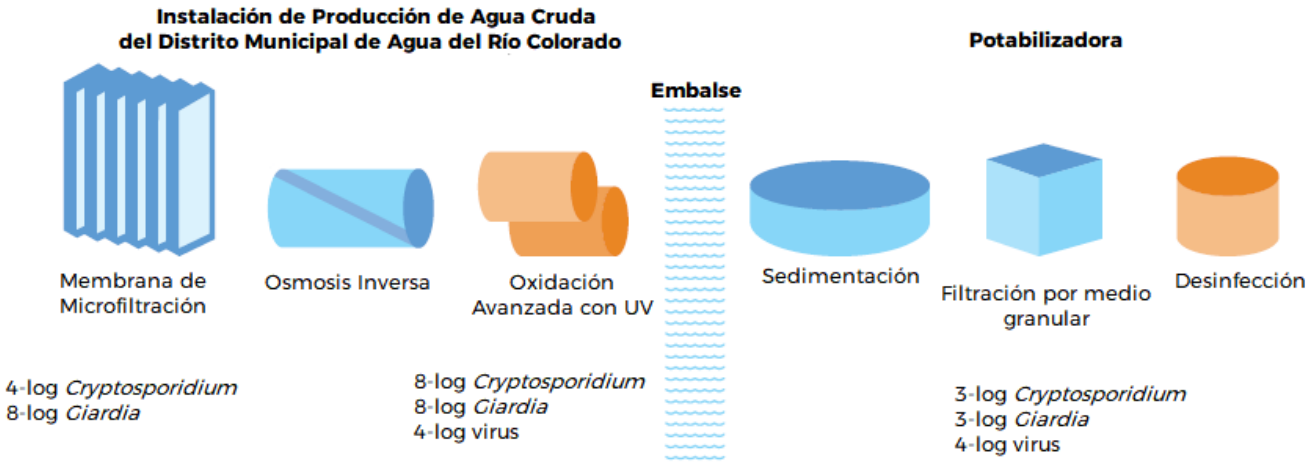


Figura 78. Créditos asignados a cada proceso de tratamiento que conforma el esquema de RPD de Big Spring en Texas, E.U. Modificado de (World Health Organization, 2017).

El rechazo de la OI se descarga en Beal's Creek con un permiso obtenido por CRMWD. Beal's Creek es un arroyo naturalmente salobre. CRMWD opera un sistema de agua salobre con alto contenido de cloruro que vende a las compañías petroleras o en su caso la evapora. Los residuos del retrolavado de la membrana de microfiltración se dirigen a la PTAR, donde luego fluyen a través del proceso de tratamiento en lugar de eliminarlos en otro lugar fuera del sitio.

Al igual que con otros proyectos de reúso potable en Texas y en ausencia de lineamientos de reúso potable impuestas por el estado, la Comisión de Calidad Ambiental de Texas (TCEQ) revisó la propuesta del proyecto de acuerdo con su proceso de aprobación de excepciones caso por caso. La carta que otorga la excepción, que funciona como un permiso para la instalación, incluye requisitos sobre tratamiento, diseño, operación y monitoreo. Luego de la prueba piloto en 2009, la TCEQ estableció los requisitos de calidad del agua para el sistema que puede producir agua para uso municipal e industrial. El requisito original era lograr niveles de turbidez inferiores a 10 NTU y una reducción de virus de 4 log (Environmental Protection Agency, 2017).

3.1.1.3 Wichita Falls, West Texas, EU

El lago Arrowhead y el lago Kickapoo son los principales suministros de agua superficial para la ciudad de Wichita Falls, Texas. Durante 2013, ambos lagos se encontraban con menos del 35% de su capacidad de llenado, lo que provocó que Wichita Falls entrara en condiciones de escasez extrema sin una solución de suministro de agua fácilmente disponible (Environmental Protection Agency, 2017). En respuesta, la ciudad desarrolla un enfoque de dos fases para el reúso potable (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013). El primer enfoque a largo plazo era tratar efluentes de la planta de tratamiento de aguas residuales "River Road" mediante procesos avanzados para descargarlos al lago Arrowhead, sin embargo, esto requeriría de un permiso de descarga autorizado por TCEQ que tomaría aproximadamente 4 años. El segundo enfoque si la sequía

persistía implementar un proyecto de 'emergencia' temporal de RPD que podría ponerse en marcha más rápido.

Para el proyecto de RPD (figura 74), la ciudad analizó el efluente de su planta principal de tratamiento de aguas residuales y lo comparó con los Estándares primarios y secundarios de agua potable del estado de Texas. El efluente cumplió con todos los Estándares primarios de agua potable excepto para trihalometanos totales, nitratos y patógenos. Teniendo en cuenta las tecnologías disponibles para reducir estos tres parámetros, la ciudad determinó que la microfiltración y la ósmosis inversa eran las más eficientes. La ciudad tenía una instalación de microfiltración/ósmosis inversa en su planta de tratamiento de agua Cypress que se usaba para tratar agua superficial salobre del lago Kemp (K. Nix , 2019). La sequía había bajado el nivel del reservorio salobre y concentrado los sólidos disueltos totales (SDT) de 500 ppm a 8000 ppm (Environmental Protection Agency, 2017) al punto que la instalación de ósmosis inversa ya no podía tratar esa fuente. La ciudad buscaba sacar de servicio ese sistema de tratamiento. Sin embargo, la ósmosis inversa (OI) se diseñó adecuadamente para manejar las características de calidad del agua del efluente de aguas residuales considerado para el proyecto de RPD. El personal de la ciudad estimó que la ósmosis inversa podría lograr una reducción del 80 % del nitrato y una eliminación del 50 % de trihalometanos totales (Tabla 31) (K. Nix , 2019).

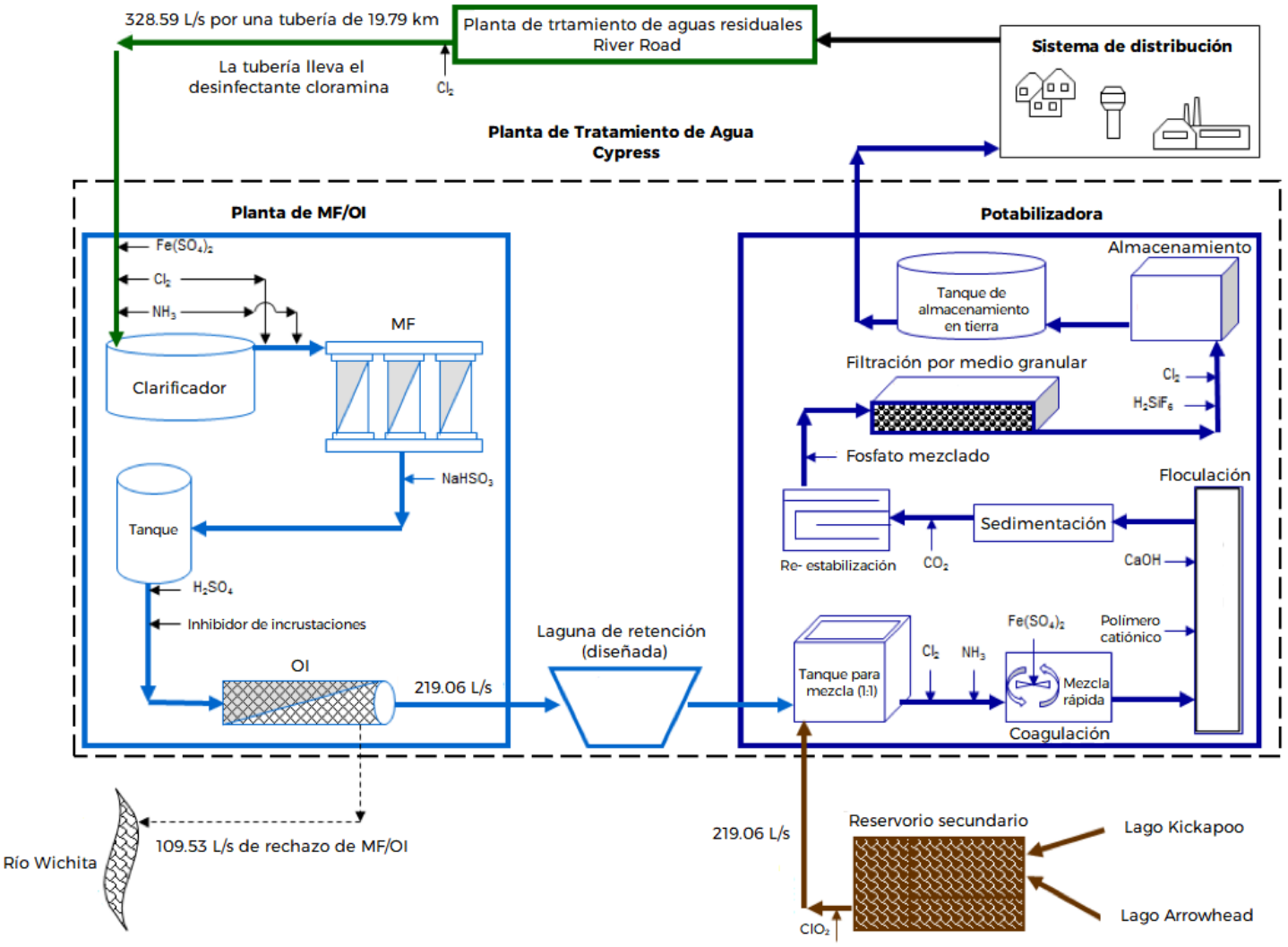


Figura 79. Esquema de RPD de Wichita Falls en Texas, E.U. Modificado de (K. Nix , 2019).

Tabla 31**.** Reducción de parámetros que incumplían los Estándares primarios de agua potable. Modificado de (K. Nix , 2019).

	Efluente	Remoción estimada en OI	Concentración estimada en el permeado OI	Concentración estimada después de la mezcla	Nivel máximo de contaminante (MCL)
Nitrato	18 mg/L	80%	3.6 mg/L	1.8 mg/L	10 mg/L
Trihalometanos totales	106 µg/L	50%	53 µg/L	26.5 µg/L	80 µg/L

La dosis de UV permitió la inactivación específica de patógenos, pero no fue diseñada para tratar los compuestos no regulados, como la n-nitrosodimetilamina (NDMA), ni proporcionar

una oxidación avanzada. El agua tratada de forma avanzada (permeado de OI) se mezcló en una proporción de 1:1 con agua sin tratar (cruda) del lago Arrowhead, posteriormente se trató en una potabilizadora convencional, y se mantuvo en un tanque de almacenamiento diseñado durante 24 horas antes de enviarse al sistema de distribución (EPA, 2017).

La TCEQ usó las Reglas de Tratamiento de Aguas Superficiales (SWTR) como base para asignar los requisitos de remoción para patógenos. De acuerdo con lo especificado por la TCEQ, para un esquema de RPD es necesario lograr la eliminación de virus, *Giardia* y *Cryptosporidium* en 9 log, 8 log y 5.5 log respectivamente. Inicialmente se habían requerido otros valores para los patógenos, para los virus se aumentó a un valor de 9 log porque las cloraminas se estaban formando previo a la PTAR por lo tanto se consideró que con cloro libre no se tendría la desinfección. Para *Giardia* como inicio se propuso 6 log pero se aumentó (8 log) por la concentración alta en las aguas residuales tratadas. Estos ajustes mostraron la adaptabilidad de la TCEQ a condiciones cambiantes, la comunicación entre los participantes en el proyecto tuvo el objetivo común de proteger la salud pública.

En resumen:

- La ciudad de Wichita Falls operó las instalaciones de RPD desde el 9 de julio de 2014 hasta el 21 de julio de 2015, tratando efluentes de aguas residuales en agua potable.
- La ósmosis inversa pudo reducir las concentraciones de nitrato muy por debajo del MCL de 10 mg/L. La OI mostró una reducción promedio de nitrato del 92%, valor arriba de lo estimado. Esto redujo las concentraciones de nitrato de 18 mg/L a un promedio de 1.4 mg/L.
- Utilizar cloraminas como desinfectante en la PTAR permitió reducir los trihalometanos totales de 106 ug/L a menos de 15 ug/L, eliminando así la necesidad del proceso de OI para reducir este contaminante.
- Las reducciones microbianas también fueron mucho más altas que las estimadas en el diseño conceptual.

3.1.1.4 El Paso en Texas, E.U.

Ubicada dentro del árido desierto de Chihuahua, el área de servicio de El Paso Water (EPWater) es propensa a sequías y el suministro de agua superficial no es confiable. Para conservar sus recursos disponibles y diversificar su suministro de agua, EPWater planea construir la instalación avanzada para potabilizar agua, la primera instalación de reúso potable directa (RPD) "directa a la distribución" en los Estados Unidos. Esta instalación histórica estará ubicada en el campus de tratamiento de EPWater, que también incluye una potabilizadora de aguas superficiales y una planta de tratamiento de aguas residuales (Carollo Engineers, s.f.).

Conceptualmente el proyecto se presenta en la figura 75. El concepto de tratamiento está diseñado para garantizar la protección de la salud pública mediante la aplicación de múltiples procesos de tratamiento avanzados y un control riguroso de los procesos críticos.

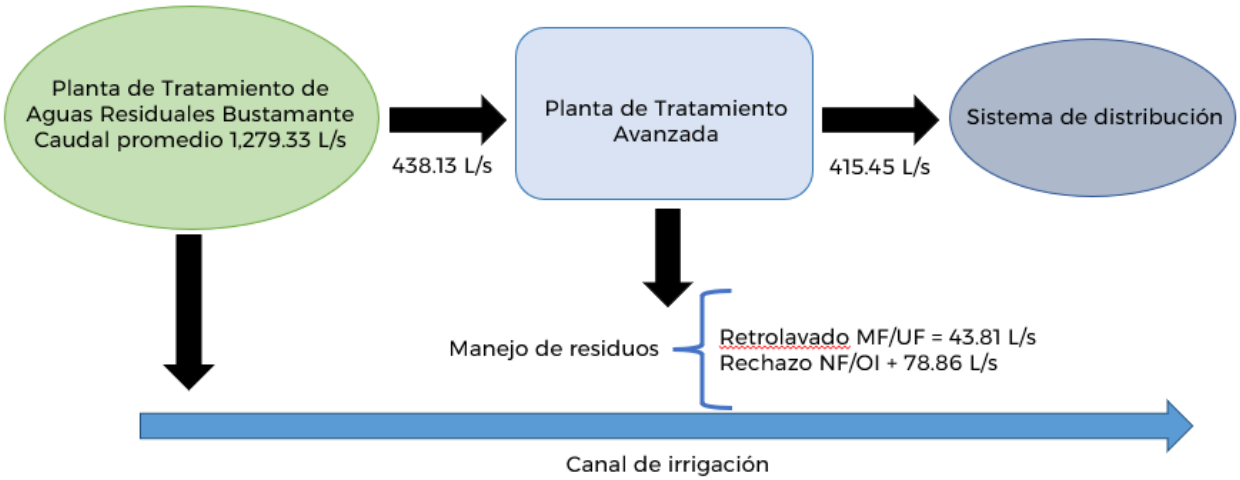


Figura 80. Diseño conceptual. Modificado de (P. Maseeh, G. Russell, Lair Villaobos, E. Balliew, & Trejo, 2015).

De acuerdo con (Villalobos) el tren de tratamiento (figura 76) estará conformado por:

- Filtración por membranas: barrera primaria para partículas y microorganismos que pueden causar enfermedades, como bacterias, virus y protozoos.
- Osmosis inversa: elimina sales y productos químicos orgánicos y proporciona una barrera adicional para los microorganismos.
- Oxidación Avanzada con UV y peróxido de hidrógeno: tercera barrera para los microorganismos y destruye cualquier resto de compuestos químicos orgánicos.
- Carbón granular activado: elimina el exceso de peróxido de hidrógeno y proporciona una tercera barrera para compuestos químicos orgánicos.
- Desinfección con cloro: barrera final para los microorganismos que perduran mientras el agua llega a hogares y negocios.

Los objetivos a cumplir con los procesos del tren de tratamiento serán:
Control de los niveles de nitrógeno.

- Reducción de sólidos disueltos totales (SDT).
- Eliminación/inactivación de patógenos.
- Eliminación de precursores de subproductos de desinfección.
- Eliminación de contaminantes emergentes, incluidos productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal y otros productos químicos traza que podrían introducirse a través de descargas industriales y municipales río arriba.

La instalación tratará hasta 438.13 L/s de efluentes secundarios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Roberto R. Bustamante para producir agua purificada de alta calidad, que

se introducirá directamente en el sistema de distribución de agua potable a través de una infraestructura de conducción que también se utiliza para el agua tratada producida por la planta de tratamiento de agua adyacente Jonathan W. Rogers (Carollo Engineers, s.f.).

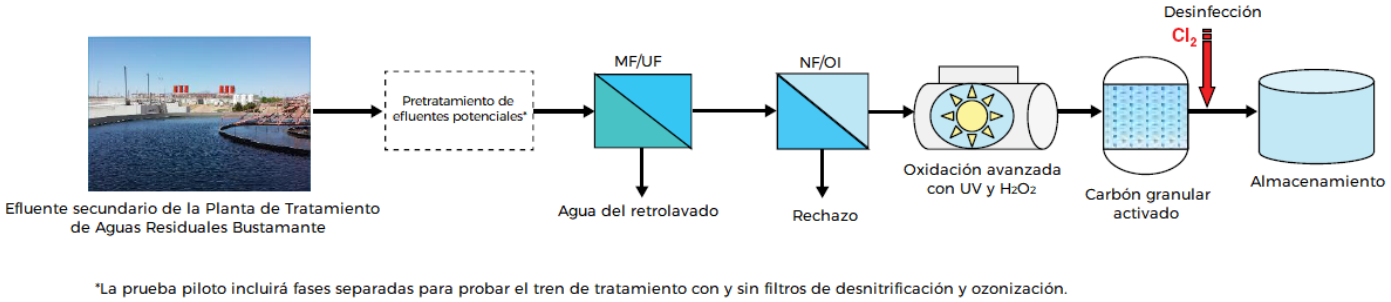
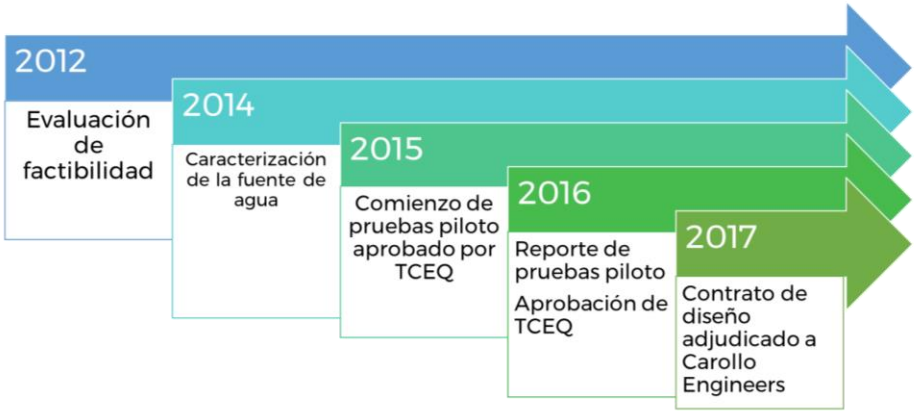


Figura 81. Esquema de RPD de El Paso en Texas, E.U. Modificado de (P. Maseeh, G. Russell, Lair Villaobos, E. Balliew, & Trejo, 2015).

Como se indica en la figura 77, la planta está en proceso de construcción a cargo de Carollo Engineers y se tiene planeado comience a operar en 2023. La viabilidad de implementar esquemas de RPD en Texas ha sido demostrada a través de los esquemas de Big Spring y Wichita Falls. Sin embargo, el concepto EPWater es único en un tratamiento avanzado



completo para producir agua purificada para introducirla directamente en el sistema de distribución. Los impulsores de este concepto de reúso potable para EPWater incluyen la proximidad de la PTAR Bustamante al sistema de distribución servido por la PTAR Jonathan Rogers, la ausencia de un suministro de agua superficial durante todo el año para facilitar la mezcla y las capacidades tecnológicas para producir de manera confiable agua purificada que cumple y supera todos los estándares de agua potable del TCEQ. Este proyecto pionero no solo proporcionará una fuente sostenible de suministro de agua para El Paso, sino que también ayudará a allanar el camino para esfuerzos similares del DPR en todo el país (P. Maseeh, G. Russell, Lair Villaobos, E. Balliew, & Trejo, 2015).

Figura 82. Desarrollo del proyecto de El Paso en Texas, E.U. Elaboración con información de (P. Maseeh, G. Russell, Lair Villaobos, E. Balliew, & Trejo, 2015)

3.1.2 Reúso potable indirecto

3.1.2.1 Organización Mundial de la Salud (OMS)

En 2017, la Organización Mundial de la Salud publicó "Reutilización potable: Guía para producir agua potable segura". El marco incluye tres componentes como se muestran en la Tabla 32. La normativa de la OMS tiene el propósito de describir cómo aplicar sistemas de gestión apropiados a la producción de agua potable segura a partir de aguas residuales municipales. El alcance de la guía incluye el reúso potable directo e indirecto.

Tabla 32. Componentes en un sistema de reúso potable. Modificado de (World Health Organization (2017).

Reúso potable: guía para la producción de agua potable segura (2017)	
Metas basadas en la salud	Objetivos medibles basados en el riesgo que definen la seguridad del agua potable. Incluyen objetivos de rendimiento para lograr la seguridad con respecto a microorganismos patógenos y objetivos numéricos de parámetros de calidad del agua.
Plan de seguridad de agua	Un enfoque integral de evaluación y gestión de riesgos desarrollado e implementado por los proveedores de agua, que incluye: Evaluación del sistema para identificar, evaluar y garantizar la gestión de los riesgos para la salud pública a lo largo de la cadena de suministro de agua. Monitoreo para determinar si las medidas de control implementadas son efectivas para alcanzar los objetivos basados en la salud. Gestión y comunicación para garantizar que los sistemas operativos y de gestión estén en funcionando adecuadamente.
Monitoreo independiente	Actividades realizadas por la agencia reguladora para asegurar que los Planes de seguridad de agua se estén implementando de manera efectiva y que se cumplan los objetivos basados en la salud.

La normativa de la OMS establece que la calidad del agua con respecto a los contaminantes químicos (valores de referencia) y microorganismos (reducción o eliminación) son los principales objetivos para el reúso potable.

La Normativa de la OMS (Reutilización potable: Guía para producir agua potable segura 2017), no establece límites máximos permisibles para los llamados contaminantes emergentes (CEs) o microcontaminantes; sin embargo, sí proporciona ejemplos que podrían ser implementados como parte del programa de monitoreo para evaluar el desempeño de los procesos de tratamiento para el reúso potable, tanto directo como indirecto. Cabe señalar que las concentraciones de CEs en las aguas residuales, incluso después del tratamiento secundario (figura 78), suelen estar muy por debajo de los valores permisibles en los criterios de salud (World Health Organization, 2017).

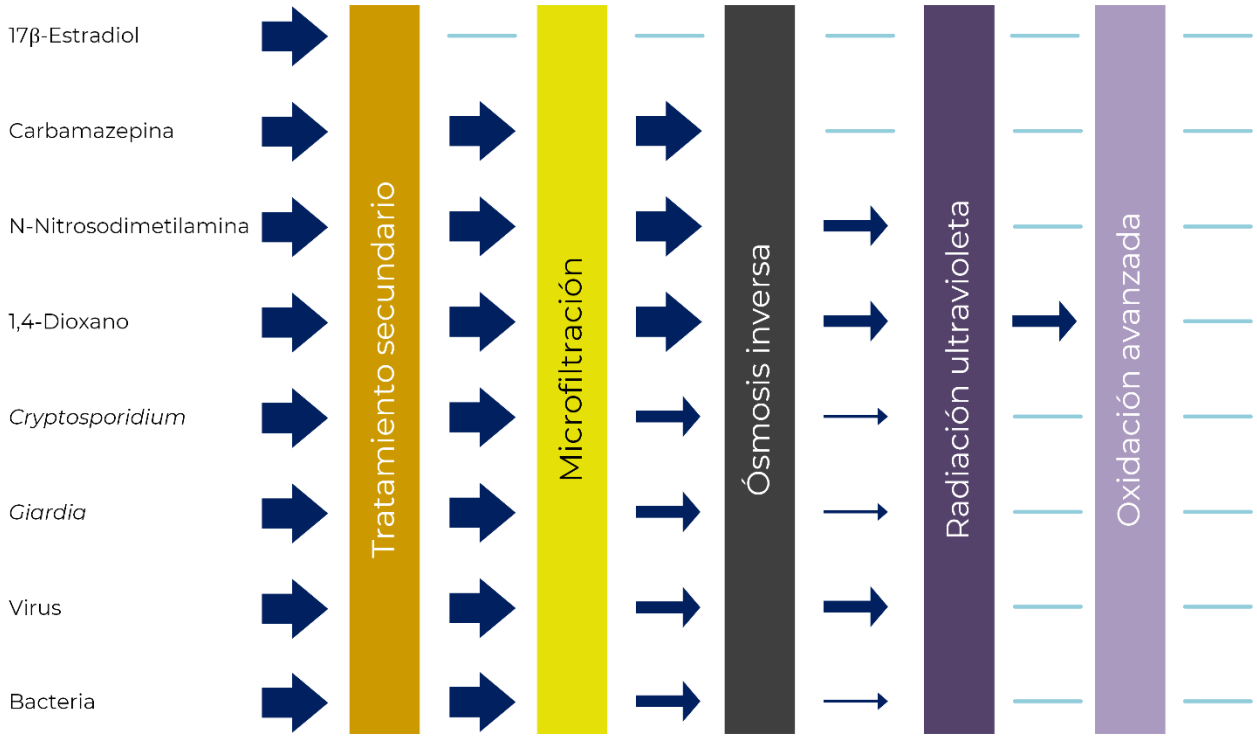


Figura 83. Aplicación de barreras múltiples para remoción de contaminantes emergentes. Modificado de World Health Organization (2017).

El objetivo de las reglamentaciones sobre el agua potable, incluidos los planes de reúso potable, debe ser **garantizar la producción y el suministro de agua potable segura a los consumidores**. Las reglamentaciones para el reúso potable deben cumplir la normativa internacional y nacional de cada lugar, e incluir disposiciones que describan:

- Responsabilidades de los proveedores de agua potable, entidades de gestión de aguas residuales, organismos reguladores y partes interesadas.
- Requisitos para el plan de seguridad del agua y plan de seguridad sanitaria.
- Normas de calidad del agua aplicables.
- Requisitos de seguimiento y prueba.
- Requisitos de información durante el funcionamiento normal y en respuesta a incidentes y emergencias.
- Monitoreo.

Al igual que la planta de tratamiento de aguas residuales, el tratamiento de agua potable varía según la calidad del agua presente en la fuente de abastecimiento y las normativas establecidas en cada país**. Según el nivel de contaminación (real o supuesto), se establece la complejidad del sistema de la planta potabilizadora.**

Los objetivos basados en la salud, deben ser establecidos por las autoridades sanitarias nacionales o regionales en consulta con las partes interesadas, incluidos los proveedores de agua potable, y deben considerar la viabilidad económica, social y técnica. Los objetivos utilizados para definir la seguridad de la salud en los esquemas de reúso potable son los objetivos de rendimiento (microorganismos patógenos) y los objetivos de calidad del agua (valores de referencia de compuestos químicos). Los objetivos de rendimiento generalmente

se expresan como LRV (valor de reducción $\log_{10}$) de microrganismos patógenos potencialmente presentes en las fuentes de abastecimiento de agua.

La OMS en la Guía para producir agua potable segura (2017), utiliza el nivel de referencia de riesgo de **10^{-6} DALYs pppy** (por sus siglas en inglés *Disability Adjusted Life Years, per person pero year;* también conocido como **AVAD pppa** en español por sus siglas **"**Año de Vida Ajustado por Discapacidad, por persona por año"). **Una unidad AVAD puede considerarse como la pérdida de un año de vida "saludable"**. La suma de estos AVAD en toda la población (la carga de la enfermedad) puede considerarse como una medida de la brecha entre el estado de salud actual y una situación de salud ideal en la que toda la población vive hasta una edad avanzada, libre de enfermedades y discapacidades.

Los AVADs se utilizan para ponderar los impactos en la salud en términos de gravedad y duración de una enfermedad y el número de personas afectadas. En el agua de consumo se utilizan principalmente para peligros asociados a microrganismo patógenos, 10^{-6} AVADs pppa (o DALYs pppy en inglés) equivale aproximadamente a 1 caso de diarrea por cada 1,000 personas por año. También 10^{-6} AVADs pppa equivale aproximadamente a 1 caso de riesgo de cáncer por cada 100,000 personas debido a la exposición a lo largo de la vida. Sin embargo, las autoridades sanitarias pueden optar por adoptar esto como un objetivo o pueden variarlo según las circunstancias locales, incluida la identificación de una enfermedad asociada a la fuente de abastecimiento de agua potable.

Al igual que con todas las formas de abastecimiento de agua potable, **la contaminación microbiana representa el riesgo más probable e importante para la salud pública**. Los objetivos de rendimiento para el reúso potable suelen ser mucho más altos que las fuentes de abastecimiento de agua potable debido a las concentraciones relativamente altas de patógenos en las aguas residuales. La producción de agua potable a partir de aguas residuales debe ser microbiológicamente segura y requiere el establecimiento de objetivos de rendimiento relativamente altos, por ejemplo, una reducción mínima de 8.5 log de bacterias entéricas, 9.5 log de virus entéricos y 8.5 log de protozoos entéricos. La selección de patógenos de referencia debe basarse en una serie de factores como la evidencia de transmisión a través del consumo o contacto con el agua, la sensibilidad de inactivación o eliminación por los procesos de tratamiento y las condiciones locales como la prevalencia de una enfermedad asociada a la fuente de abastecimiento de agua. Los patógenos de referencia utilizados por la OMS son *Campylobacter,* rotavirus y *Cryptosporidium*.

Respecto a los contaminantes emergentes, por ejemplo, la mayoría de los disruptores endocrinos son altamente lipofílicos y es poco probable que estén presentes en cantidades significativas en el agua, y tienden a absorber los sólidos presentes en los cursos de agua. Tales cualidades aumentan la probabilidad de eliminación durante la potabilización. Una vez en la planta potabilizadora, se considera que las influencias más fuertes sobre los disruptores endocrinos son su biodegradabilidad y sus propiedades fisicoquímicas. El proceso convencional para potabilización implica floculación, sedimentación y filtración. Los pesticidas lipofílicos (pesticidas clorados) pueden eliminarse parcialmente durante este proceso, por ejemplo, el alacloro, disminuye en un 24% después de la floculación, sedimentación, filtración y cloración. Por el contrario, los plaguicidas más polares no se reducen significativamente con estos procesos. Se ha demostrado que el 17α-etinilestradiol (EE2) se une rápidamente al lodo generado por el floculante y permanece estable siempre que el flóculo no se descomponga (W. Birkett & N. Lester, 2003).

La Tabla 125 menciona algunos métodos de remoción de compuestos disruptores endocrinos durante la potabilización.

Tabla 33. Métodos de remoción de disruptores endocrinos durante la potabilización. Modificado de (W. Birkett & N. Lester, 2003).

Compuesto disruptor endocrino	Método de remoción	Comentarios
Bisfenol A	UV con catalizador	UV y TiO_2 como catalizador dio como resultado una mineralización completa en 20 horas. 90% de descomposición ocurrió dentro de los 50 minutos. 90% de mineralización después de 3 horas.
17β-estradiol	UV con catalizador	No se observaron cambios solo para la radiación UV. Remoción del 90 % después de 2 horas con UV y TiO_2.
	Filtración con arena	Remoción del 15%. Formación de metabolitos.
Estrona	UV	Se observó una descomposición del 20%.
17α-etinilestradiol	UV con catalizador	UV y TiO2 como catalizador, la fotodegradación fue más rápida que para 17β-estradiol. Remoción del 90% de los dos esteroides en 30 minutos.
Atrazina	Ozono	No se observaron derivados hidroxi. 60% de degradación en 30 minutos.
	Ozono con peróxido de hidrógeno	Se necesitaron 2 minutos para alcanzar el mismo nivel de degradación que con ozono.
Lindano	UV con catalizador	Mineralización por degradación fotocatalítica UV- TiO_2.
Metoxicloro	GAC	Amplia gama de procesos de tratamiento de agua probados y GAC determinó la mejor remoción que cumple con el nivel máximo de contaminante de 0.1 mg/l. Es la mejor tecnología disponible recomendada por la EPA.
Endosulfán	GAC	Es la mejor tecnología disponible recomendada por la EPA para sistemas pequeños. Se puede utilizar también PAC.

GAC: carbón activado granular
PAC: carbón activado en polvo

3.1.2.2 Agencia de Protección Ambiental (EPA)

El reúso potable indirecto está incluido en las Normativas para el reúso del agua de la EPA, 2012. Las normativas contienen recomendaciones generales para RPI y describen

combinaciones de procesos de tratamiento, criterios de calidad del agua, requisitos de monitoreo y un **período de retención de dos meses en las aguas receptoras** (reservorios ambientales) (World Health Organization, 2017).

En el capítulo 4 titulado *State Regulatory Programs* establece la normativa sugerida para reúso de agua, específicamente del RPI con aumento de los reservorios de suministro de agua superficial se indica:

Tabla 34**.** Normativa para reúso de agua, específicamente del RPI con aumento de los reservorios de suministro de agua superficial. Modificado de Environmental Protection Agency (2012).

Tratamiento	Secundario [1] Filtración [2] Desinfección [3] Tratamiento avanzado de aguas residuales [4]
Calidad de agua recuperada	Coliformes totales no detectables/100 ml [5,6] 1 mg/L de Cl_2 residual (min) [7] pH = 6.5 - 8.5 ≤ 2 NTU [8] ≤ 2 mg/L de COT de origen de aguas residuales Cumplir con los estándares de agua potable
Monitoreo de agua recuperada	pH - diario Turbidez - continua Coliformes totales - diario Cl_2 residual - continuo COT - semanal Normas de agua potable - trimestral Otros (ej. CEs) [9] - depende del constituyente No se requiere monitoreo de virus y parásitos: sus tasas de eliminación están prescritas por los requisitos del tratamiento.
Tiempo de retención	Específico del sitio: basado en proporcionar un tiempo de retención de 2 meses entre la introducción de agua regenerada en un depósito de suministro de agua cruda y la entrada a una potabilizadora.
Comentarios	El agua recuperada no debe contener niveles mensurables de patógenos [10]. El nivel de tratamiento recomendado es específico del sitio y depende de factores como la calidad del agua de recepción, el tiempo y la distancia al punto de extracción, dilución y tratamiento posterior antes de la distribución para usos potables. Puede ser necesario una mayor concentración de cloro residual y / o un tiempo de contacto más prolongado en la desinfección para asegurar la inactivación de virus y protozoos. Las reducciones logarítmicas recomendadas de virus, *Giardia* y *Cryptosporidium* pueden basarse en pruebas de desafío o en la suma de las reducciones logarítmicas estimadas en cada una de las operaciones unitarias de la planta. La dilución del agua regenerada con agua de origen no residual se puede utilizar para ayudar a cumplir con el límite de COT sugerido.

(1) El proceso de tratamiento secundario incluye procesos de lodos activados, filtros percoladores, biológicos rotativos y sistemas de lagunas de estabilización. El tratamiento secundario debe producir un efluente en el que tanto la DBO como SS no superen los 30 mg/L.

(2) Medios filtrantes: el paso de aguas residuales a través de suelos naturales no perturbados o medios filtrantes como arena y / o antracita; o el paso de aguas residuales a través de microfiltros u otros procesos de membrana.

(3) Desinfección significa la destrucción, inactivación o eliminación de microorganismos patógenos por medios químicos, físicos o biológicos. La desinfección se puede lograr mediante cloración, ozono, otros desinfectantes químicos, UV, procesos de membrana u otros procesos.

(4) Los procesos avanzados de tratamiento de aguas residuales incluyen clarificación química, adsorción de carbono, ósmosis inversa y otros procesos de membrana, oxidación avanzada, flotación por aire disuelto, ultrafiltración e intercambio iónico.

(5) A menos que se indique lo contrario, los límites de coliformes recomendados son valores promedio determinados a partir de los resultados bacteriológicos de los últimos 7 días para los que se han completado los análisis. Se puede utilizar la técnica del filtro de membrana o del tubo de fermentación.

(6) El número de organismos coliformes totales o fecales (el que se recomiende para el seguimiento en la tabla) no debe exceder 14/100 mL en ninguna muestra.

(7) Esta recomendación se aplica solo cuando se utiliza cloro como desinfectante principal. El cloro residual total debe alcanzarse después de un tiempo de contacto real mínimo de al menos 90 minutos, a menos que se haya demostrado que un tiempo de contacto menor proporciona una reducción de microorganismos indicadores y patógenos equivalentes a los sugeridos en estas pautas. En ningún caso el tiempo de contacto real debe ser inferior a 30 minutos.

(8) La turbidez recomendada debe cumplirse antes de la desinfección. La turbidez promedio debe basarse en un período de tiempo de 24 horas. La turbidez no debe exceder las 5 NTU en ningún momento. Si se usa SS en lugar de turbidez, el SS promedio no debe exceder los 5 mg/L. Si se utilizan membranas como proceso de filtración, la turbidez no debe exceder de 0.2 NTU y el SS promedio no debe exceder de 0.5 mg/L.

(9) El seguimiento debe incluir compuestos orgánicos e inorgánicos, o clases de compuestos, que se conozca o se sospeche que son tóxicos, cancerígenos, teratogénicos o mutágenos y no están incluidos en las normas para el agua potable.

(10) Es aconsejable caracterizar completamente la calidad microbiológica del agua regenerada antes de implementar un programa de reutilización.

En el Capítulo 4 de la normativa, se describen los constituyentes químicos traza potencialmente presentes en las aguas residuales sin tratar. Los procesos unitarios que logran la remoción de estos compuestos incluyen ósmosis inversa OI), electrodiálisis (ED), electrodiálisis inversa (EDR), NF, carbón activado granular (GAC), intercambio iónico y

filtración biológicamente activa (BAF). La Tabla 127, muestra los porcentajes de remoción de algunos de los compuestos químicos traza o también denominados contaminantes emergentes.

Tabla 35. Comparativa de diferentes procesos aplicados a la remoción de algunos CEs. Modificado de Environmental Protection Agency (2012) y Taoufik, Boumya, Achak, Sillanpää, & Barka (2021).

	Porcentaje de remoción										
				Compuestos Farmacéuticos				Hormonas			
Tratamiento	B(a)p	Antibióticos[1]	DZP	CBZ	DCF	IBP	PCT	Esteroides[2]	Anabólicos[3]	Fragancia	NDMA
Secundario (lodos activados)	sd	10–50	sd	–	10–50	>90	sd	>90	Sd	50–90	–
Infiltración a suelo	sd	Sd	sd	25–50	>90	>90	>90	>90	Sd	>90	>90
Almacenamiento en acuífero	sd	50–90	10–50	–	50–90	50–90	Nd	>90	Sd	–	–
Microfiltración	sd	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	Sd	<20	
Ultrafiltración/CAP	sd	>90	>90	>90	>90	>90	sd	>90	Sd	>90	>90
Nanofiltración	>80	50–80	50–80	50–80	50–80	50–80	50–80	50–80	50–80	50–80	
Ósmosis inversa	>80	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	25–50
CAP	>80	20–>80	50–80	50–80	20–50	<20	50–80	50–80	50–80	50–80	
Carbón activado granulado		>90	>90	>90	>90	>90		>90		>90	>90
Ozonización	>80	>95	50–80	50–80	>95	50–80	>95	>95	>80	50–90	50–90
Oxidación avanzada		50–80	50–80	>80	>80	>80	>80	>80	>80	50–80	>90
Ultravioleta de alto nivel		20–>80	<20	20–50	>80	20–50	>80	>80	20–50	sd	>90
Cloración	>80	>80	20–50	–<20	>80	<20	>80	>80	<20	20≥80	–
Cloraminación	50-80	<20	<20	<20	50-80	<20	>80	>80	<20	<20	
Humedales construidos de flujo horizontal	-	21-45[4]	-	27-99	32-99	28-99	95-100	-	-	-	-

B(a)p = α-benzopireno; CBZ = carbamazepina; DBP = Desinfección por producto; DCF = diclofenaco; DZP = diazepam; IBP = ibuprofeno; NDMA = N-nitrosodimetilamina; sd = sin dato; CAP = carbón activado en polvo; PCT = paracetamol.

[1] eritromicina, sulfametoxazol, triclosán, trimetoprima.

[2] etinilestradiol; estrona, estradiol y estriol.

[3] progesterona, testosterona.

[4] amoxicilina

Como lo estable la normativa el objetivo principal en cualquier programa de reúso es proteger la salud pública y existe diferentes opciones de tratamiento para mitigar los contaminantes microbianos y químicos en el agua recuperada y cumplir con los objetivos específicos de calidad del agua. La protección de la salud pública se logra:

- Reduciendo o eliminando las concentraciones de bacterias patógenas, parásitos y virus entéricos en el agua recuperada o reciclada.
- Controlando los constituyentes químicos en el agua recuperada.
- Limitando la exposición del público (contacto o ingestión) al agua recuperada.

Los proyectos de reúso pueden variar significativamente de acuerdo con el nivel de exposición o contacto humano, con una variación correspondiente en el potencial de riesgos para la salud. Cuando sea probable la exposición o contacto humano, el agua recuperada debe recibir un alto grado de tratamiento antes de su uso (Tabla 36). El agua recuperada utilizada para el riego de cultivos no alimentarios puede ser de menor calidad que el agua para el riego de jardines en un parque público o una escuela, que puede ser de menor calidad que el agua recuperada destinada a aumentar los suministros potables. Para que el reúso sea rentable, el nivel de tratamiento debe ser "adecuado para el propósito". El efluente secundario puede convertirse en agua recuperada para reúso no potable mediante la adición de filtración y desinfección mejorada. Los usos de mayor nivel (p. ej., reúso potable) pueden incluir procesos adicionales, como membranas u oxidación avanzada para eliminar los componentes químicos y biológicos.

Tabla 36. Tipos de reúso apropiados de acuerdo al nivel de tratamiento. Modificado de Environmental Protection Agency (2012)

<table>
<tr><td rowspan="2">Nivel de tratamiento</td><td colspan="4">Incremento del nivel de tratamiento →</td></tr>
<tr><td>Primario</td><td>Secundario</td><td>Filtración y desinfección</td><td>Avanzado</td></tr>
<tr><td>Procesos</td><td>Sedimentación</td><td>Oxidación biológica y desinfección</td><td>Coagulación química, biológica o remoción química de nutrientes, filtración y desinfección</td><td>Carbón activado, ósmosis inversa, procesos de oxidación avanzada, tratamientos por infiltración a suelo, etc.</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Uso final</td><td rowspan="6">Usos no recomendables</td><td>Riego de huertos y viñedos</td><td>Riego de jardines y campos de golf</td><td rowspan="6">Reúso potable indirecto; incluye recarga de acuíferos y aumento de aguas superficiales.</td></tr>
<tr><td>Riego de cultivos sin fines de alimentación</td><td>Uso en sanitarios</td></tr>
<tr><td>Embalses paisajísticos restringidos</td><td>Autolavados</td></tr>
<tr><td>Recarga de acuíferos de agua no potable</td><td>Riego de cultivos para alimentación</td></tr>
<tr><td>Aumento de humedales, hábitat de vida silvestre y arroyos</td><td>Embalses recreacionales no restringidos</td></tr>
<tr><td>Procesos de refrigeración industrial</td><td>Sistemas industriales</td></tr>
<tr><td>Exposición antropogénica</td><td colspan="4">Incremento aceptable al nivel de exposición antropogénica →</td></tr>
<tr><td>Costo</td><td colspan="4">Incremento del nivel de costo →</td></tr>
</table>

La ósmosis inversa se utiliza ampliamente para la desalinización de agua de mar y agua subterránea salobre; el reúso potable también puede aprovechar la ósmosis inversa debido a su capacidad para la remoción de patógenos, sustancias químicas disueltas, carbono orgánico total (COT), CEs y sólidos disueltos totales. **Una desventaja del tratamiento con OI es que se genera una corriente de agua de rechazo altamente concentrada**. Para las instalaciones de reúso, es importante que el agua de rechazo no se devuelva a la misma planta de tratamiento a menos que la planta de OI represente una porción muy pequeña del flujo total de la planta (<10% del flujo total de la planta). Los métodos más comunes para la eliminación del agua de rechazo son las descargas al mar combinadas con los emisores de aguas residuales existentes, descarga al alcantarillado con flujos dirigidos a una instalación de tratamiento de aguas residuales aguas abajo y la inyección en pozos profundos. Debido a que el agua de rechazo está altamente concentrada (STD de 3,000 a 20,000 mg/L), puede ser difícil permitir una descarga directa al agua superficial, a menos que haya aguas superficiales

de alta salinidad. Los métodos alternativos de eliminación del agua de rechazo, no mencionados anteriormente, incluyen el uso de estanques de evaporación, evaporación mecánica, cristalizadores de salmuera y varias tecnologías emergentes, como la ósmosis directa y la destilación por membrana. Además, el permeado de OI requiere una estabilización posterior debido a la eliminación casi completa de la dureza y la baja alcalinidad.

3.1.2.3 Normativa Australiana

El reporte sobre: "El agua potable a través del reciclaje" de la Academia Australiana de Ciencias Tecnológicas e Ingeniería (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013); aborda algunos detalles inmersos dentro de las normas australianas para el reciclaje de agua. En él, se explican conceptos importantes que se deben tomar en cuenta para la identificación de los posibles riesgos, así como las consideraciones recopiladas en las distintas normas que rigen la gestión de agua potable y su reúso potable en Australia; a continuación, se presenta un breve resumen.

Las normas australianas para el reciclaje de agua (AGWR por sus siglas en inglés) constan de 2 fases:

FASE 1.
Publicada en 2006. Proporciona una orientación sobre la gestión de los riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con el uso de agua reciclada para aplicaciones no potables. Esta se basa en las normativas australianas respecto al agua potable (ADWG), las cuales ofrecen un marco de referencia robusto que implica la comprensión de todo el sistema de suministro de agua, desde los riesgos y/o eventos que pudieran comprometer su calidad hasta las medidas preventivas y el control operativo necesarios para garantizar la seguridad y confiabilidad del agua potable. La fase 1 reconoce explícitamente que los patógenos representan la mayor amenaza para la seguridad de los suministros de agua potable. Actualmente la condición que debe cumplirse durante el monitoreo de los microorganismos para asegurar la calidad del agua es que la *Escherichia coli* (*E. coli*) no debe detectarse en una muestra de agua potable dentro de un volumen mínimo de 100 mL. Si es detectada, la norma dicta que se deben tomar medidas correctivas inmediatas. Aunque la mayoría de las variedades de *E. coli* son inofensivas, la intención es que su ausencia sea un indicador de que los procesos de tratamiento de agua potable y la protección de los sistemas de distribución han sido efectivos. Es decir, la *E. coli* cumple su papel como indicador de una gestión eficaz.

Esta primera fase ofrece un desarrollo adicional muy importante: la **evaluación cuantitativa de los riesgos para la salud**, la cual representa una definición numérica de seguridad. Para su cálculo, se utilizan los años de vida ajustados por discapacidad (DALY's o AVAD en español), para convertir la probabilidad de infección o enfermedad en cargas de enfermedad, estableciendo un **riesgo tolerable de 10^{-6} AVAD por persona por año**. Luego, el riesgo tolerable se usa para establecer objetivos basados en la salud que, si se cumplen, garantizarán que el riesgo se mantenga por debajo de 10^{-6} AVAD por persona por año.

La aplicación práctica de este enfoque se centra en tres "patógenos de referencia" cuidadosamente seleccionados que representan virus entéricos como una combinación de rotavirus y adenovirus, bacterias (*Campylobacter jejuni*) y protozoos (*Cryptosporidium parvum*). La evaluación de las concentraciones en agua cruda de estos patógenos de referencia y la determinación de la relación entre la exposición y la pérdida de AVAD permiten determinar el rendimiento general del proceso de tratamiento para garantizar que la exposición en el agua tratada esté por debajo de los niveles del 10^{-6} AVAD por persona por año.

FASE 2
Está basada en el marco de gestión de riesgo propuesto por la OMS dentro de sus normas para la calidad del agua potable (OMS, 2004 y 2011) y la propia AGWR fase 1 del año 2006. En ella **se abordan distintos esquemas de reciclaje de agua como el uso de aguas pluviales, recarga de acuífero y el aumento de suministros de agua potable**.

De igual forma que la normativa AGWR fase 1, la AGWR fase 2 utiliza los AVAD para medir el riesgo asociado a los microorganismos patógenos tomando en cuenta el umbral de los 10^{-6} AVAD por persona por año. Así, **como indicador de la existencia de protozoos y helmintos se utiliza como referencia a *Cryptosporidium***, mientras que, para determinar la existencia de virus entéricos a los rotavirus y adenovirus, y como **indicador de la existencia de bacterias se utiliza la *Campylobacter***. Utilizando el valor de la reducción logarítmica entre AVAD y la concentración de estos microorganismos para un año, la norma ofrece un valor a fin de establecer la efectividad de la reducción de microorganismos después de los distintos tratamientos efectuados; es así que **el valor mínimo del orden de reducción logarítmica que se espera para un agua tratada destinada a ser potable debe ser de 8 para el caso del *Cryptosporiduim*, 9.4 para los virus entéricos y 8.1 para *Campylobacter***.

La AGWR también se enfoca en otras dos características clave para la verificación del rendimiento de un sistema las cuales son: además de los organismos indicadores microbianos, los productos químicos relacionados con la salud y la actividad biológica.

En cuanto a los valores de referencia relacionados con la salud como dioxinas, furanos y bifenilos policlorados (PCB), se tomó como referencia las ingestas tolerables recomendadas por el *National Health and Medical Research Council*, asumiendo una exposición total combinada para múltiples sustancias químicas. Además, utilizando factores de equivalencia de toxicidad evaluados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) se determinó un valor de referencia de concentración total de 0.016 nanogramos por litro de equivalentes de toxicidad para este grupo de productos químicos.

En la AGWR, los valores de referencia para productos farmacéuticos para humanos fueron basados de las dosis terapéuticas diarias más bajas divididas por factores de incertidumbre de 1000–10 000. Las normas referentes a los productos farmacéuticos, utilizados con fines agrícolas o veterinarios, se desarrollaron a partir de los valores de ingesta diaria aceptable establecidos por una variedad de agencias internacionales de alimentos y salud.

Finalmente, la AGWR menciona que cuando no se disponía de antecedentes existentes ni datos toxicológicos relevantes, se utilizó un enfoque cuantitativo de relación estructura-actividad como método para determinar los umbrales de preocupación toxicológica (TTC). El uso de TTC está bien establecido internacionalmente y ha sido aplicado por la FDA en los Estados Unidos y la OMS para establecer las normas para contaminantes químicos menores.

Así también, las directrices brindan una variedad de ejemplos de **esquemas de RPI para los cuales el agua reciclada puede representar desde el 1% hasta el 80 o 90% del suministro de agua,** según las condiciones climáticas (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013).

3.1.2.4 Normativa en diferentes estados de Estados Unidos

En los Estados Unidos se han desarrollado regulaciones para el reúso del agua por estado (Tabla 129). Estados como Arizona, California, Florida y Washington han desarrollado reglamentos o pautas que fomentan el reúso del agua como estrategia de conservación de los recursos hídricos. Estos estados han desarrollado regulaciones o pautas integrales que

especifican los requisitos de la calidad del agua, los procesos de tratamiento o ambos, para el espectro completo de aplicaciones de reúso. El objetivo en estos estados es obtener los máximos beneficios de los recursos del agua recuperada mientras se protege el medio ambiente y la salud pública (Alcalde Sanz & Manfred Gawlik, 2014).

Tabla 37. Normativa de estados de Estados Unidos que abordan el reúso potable indirecto a partir de 2017. Modificado de Environmental Protection Agency (2017).

Estado	Tipos de reúso	Requisitos de tratamiento	Recomendaciones
California	Reposición de aguas subterráneas utilizando agua reciclada a través de aplicaciones superficiales y subterráneas (inyección directa)	• Tratamiento completamente avanzado para inyección directa • Filtración + Desinfección para dispersión superficial [A].	• Remoción de 12-log de virus (1-log por mes en retención del subsuelo). • Reducción de 10-log de Cryptosporidium y Giardia. • 3 o más barreras de tratamiento • Cada proceso de tratamiento remueve entre 0.5-log y 6-log de créditos[B]. • El tiempo de respuesta mínimo permitido es de 2 meses. • Niveles máximos de contaminantes para agua potable. • Monitoreo de niveles de plomo y cobre. • Nitrógeno total ≤10 mg/l de (se aplica a efluentes de agua reciclada o concentración de agua mezclada). • COT ≤ 0.5 mg/l dividido por la fracción de aporte de agua reciclada. • NDMA (N-nitrosodimetilamina) < 10 ng/l. • Control de fuentes contaminantes y pretratamiento de descargas industriales.
Florida	Aumento de aguas superficiales	• Secundario • Filtración • Desinfección • Barreras múltiples para el control de patógenos y orgánicos. • Prueba piloto requerida	Uso planificado de agua recuperada para aumentar los recursos de agua superficial que se utilizan o se utilizarán para el suministro público de agua: • Normas primarias y secundarias de agua potable. • SST < 5 mg/l • COT < 3 mg/l • Coliformes totales no detectables /100 ml • TOX (haluros orgánicos totales) < 0.2 mg/l • N total < 10 mg/l • [C] $DBOC_5$ < 20 mg/l Nota: Los haluros orgánicos totales solo son regulado en el estado de Florida.

Carolina del Norte	RPI y RPD	Instalaciones para obtener agua regenerada • **Sistemas de desinfección duales** que contienen desinfección UV y cloración o equivalente que pueden cumplir con los requisitos de reducción de patógenos.	• El agua recuperada y la fuente de agua se combinan en un embalse, dimensionado para almacenar > 5 días. • El diseño del embalse debe garantizar la mezcla. • Agua recuperada tratada al más alto nivel. • El flujo promedio diario de agua regenerada hacia el embalse es ≤ 20 %. • Las medidas de conservación son implementadas y maximizadas. • Fugas no identificadas se mantiene por debajo del 15%. • Plan de Reúso. • Participación pública. Estándares de efluentes de agua recuperada: • Reducción de *E.coli* ≥ 6-log; ≤ 3/100 mL (media geométrica mensual). • Reducción de Colífagos ≥ 5-log; ≤ 5/100 mL (media geométrica mensual). • Reducción de *Clostridium perfringens* ≥ 4-log; ≤ 5/100 mL (media geométrica mensual). • DBO_5 ≤ 5 mg/L (promedio mensual). • SST ≤ 5 mg/L (promedio mensual). • NH_3 ≤ 1 mg/L (promedio mensual). • NTU ≤ 5
Nevada	Categoría de reúso A+: RPI a través de expansión de cuencas o inyección directa		• Reglamento Nacional Primario de Agua Potable adoptada por el estado. • Nivel máximo de contaminante secundario adoptado por el estado. • Virus entérico: reducción de 12-log. • *Giardia*: reducción de 10-log. • *Cryptosporidium*: reducción de 10-log.

Virginia	RPI	• Enfoque de barrera múltiple • Secundario • Filtración • Desinfección	Estándares de nivel 1: Tratamiento secundario con filtración y desinfección de nivel superior. • DBO_5 ≤ 10 mg/l (promedio mensual). • (C) $DBOC_5$ ≤ 8 mg/l (promedio mensual). • NTU ≤ 2 • Coliformes totales ≤ 14 colonias /100 ml (media geométrica mensual). • *E. coli* ≤ 11 colonias/100 ml (media geométrica mensual). • *Enterococos* ≤ 11 colonias/100 ml (media geométrica mensual). • pH 6-9 • Cloro residual total < 1 mg/l • Normas específicas basadas en factores considerados por la Junta Estatal de Control del Agua. • Otros estándares, como CTMD, que es la cantidad máxima de un contaminante que se permite ingresar a un cuerpo de agua para que el cuerpo de agua cumpla y continúe cumpliendo con los estándares de calidad del agua para ese contaminante en particular. Estándares de nivel 2: Tratamiento secundario y desinfección estándar • Coliformes fecales ≤ 200 colonias/100ml. • *E. coli* ≤ 126 colonias/100ml. • *Enterococcus* ≤ 35 colonias/100ml. • Cloro residual total 1.0 mg /l (30 minutos). • pH 6.0-9.0 • DBO_5 ≤ 30 mg/l (promedio mensual). • (C) $DBCO_5$ ≤ 25 mg /l (promedio mensual). • SST ≤ 30 mg/l (promedio mensual)
Texas	RPD y RPI	Caso por caso	Determinado caso por caso para RPD y RPI

Washington	Agua regenerada clase A (aumento de agua superficial, recarga indirecta y directa de agua subterránea, recuperación de acuíferos)	• Oxidación • Coagulación • Filtración • Desinfección	• La desinfección requiere la reducción de 4-log o inactivación de virus. • DBO_5 ≤ 30 mg/l (promedio mensual). • [C] $DBOC_5$ ≤ 25 mg/l (promedio mensual). • SST ≤ 30 mg/l (promedio mensual). • NTU ≤ 2 (coagulación y filtración). • NTU ≤0.2 (filtración por membrana) (promedio mensual). • Coliformes totales ≤ 2.2 NMP/100 ml (mediana de 7 días). • N total ≤ 10 mg/L (promedio mensual). • pH = 6-9 o 6.5-8.5 (recarga de agua subterránea). • Los requisitos adicionales se basan en las condiciones particulares de reúso
	Agua regenerada de clase B (aumento de agua superficial, recarga indirecta de agua subterránea)	• Oxidación • Desinfección	• DBO_5 ≤ 30 mg/l (promedio mensual). • $DBOC_5$ ≤ 25 mg/l (promedio mensual). • SST ≤ 30 mg/l (promedio mensual). • Coliformes totales ≤ 23 NMP/100 mL (mediana de 7 días). • pH = 6-9 o 6.5-8.5 (recarga de agua subterránea) • Los requisitos adicionales se basan en condiciones particulares de reúso.

[A] Dispersión superficial: Es el método de recarga de agua subterránea más utilizado debido a sus altas tasas de carga con requisitos de mantenimiento relativamente bajos. En la cuenca de distribución, el agua recuperada se filtra en el suelo, que consta de capas de marga, arena, grava, limo y arcilla. A medida que el agua recuperada se filtra a través del suelo, estas capas le permiten someterse a una mayor purificación física, biológica y química a través de un proceso llamado tratamiento del acuífero del suelo (Environmental Protection Agency, 2012).

[B] Las agencias reguladoras emplean un enfoque llamado valor de eliminación de registros (LRV, por sus siglas en inglés) o crédito de eliminación de registros (LRC, por sus siglas en inglés) para verificar la funcionalidad de múltiples barreras para el control de patógenos. Los LRV requeridos para lograr los objetivos en los efluentes, según lo establecido por la regulación, se calculan y comparan con los resultados reales del tratamiento para su validación. La División de Agua Potable de California (DDW, por sus siglas en inglés), por ejemplo, controla los patógenos y fuerza el diseño de barreras múltiples en los sistemas de reúso de reposición de aguas subterráneas al exigir que las aguas residuales municipales recicladas o recuperadas logren una reducción de virus entérico de al menos 12-log, una reducción de ooquistes de *Cryptosporidium* de 10-log, y reducción de quistes de *Giardia* de 10-log (Environmental Protection Agency, 2017).

[C] Demanda bioquímica de oxígeno carbónico

3.2 Marco normativo nacional

Los acuíferos constituyen la principal y, en algunos casos, única fuente de recursos hídricos del país, ocasionando que al menos 17.3% de los acuíferos estén sobreexplotados y continúen siendo presionados. Tan sólo para el abastecimiento público, 58.4% del agua proviene de aguas subterráneas, y esto es más alarmante cuando la mayoría del agua extraída provee zonas con mayor urbanización y que no parecen desacelerar su crecimiento y demanda. En el caso de las actividades agrícolas, 36% del agua proviene de los acuíferos, lo que ejerce una fuerte presión al ser la actividad a la que mayor agua se le destina en el país (76% del agua disponible). Además, en las zonas semiáridas y áridas (norte del país), el agua subterránea equivale a las dos terceras partes del agua para consumo humano y la mitad de lo requerido para actividades industriales (Ramos, Zagal-Ramírez., & Galván Benítez, 2020).

En el caso específico del deterioro de la calidad del agua relacionado con los cambios hidroquímicos, la extracción intensiva de aguas subterráneas favorece procesos como: la intrusión de agua de mar; la mezcla de aguas superficiales con aguas subterráneas; la mezcla con las aguas subterráneas altamente mineralizadas de acuíferos subyacentes o superpuestos o capas confinantes; la propagación lateral de plumas contaminantes y la propagación de contaminantes de fuentes puntuales de superficie, como aguas residuales industriales y municipales sin tratar, a través de fracturas o fallas causadas por subsidencia (Martínez-Austria, Díaz-Delgado, & Moeller-Chavez, 2019).

Es evidente que, mientras mayor sea la demanda de agua, la generación de aguas residuales será cada vez mayor. Uno de los mayores desafíos hídricos en muchos países del planeta y en México es la calidad del agua, que se encuentra aunada a la baja cobertura de tratamiento de aguas residuales (Ramos, Zagal-Ramírez., & Galván Benítez, 2020). A pesar de que al concluir el año 2019 existían registradas en el país, 2,642 plantas municipales de tratamiento en operación, con una capacidad total instalada de 194,715.3 L/s, las que daban tratamiento a 141,479 L/s, equivalentes al 65.7% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país. Al cierre de 2020 el registro de plantas en operación aumentó a 2,786 instalaciones en relación con el año anterior con una capacidad instalada de 196,749.5 L/s y un caudal tratado de 144,710 L/s, que significa incrementos que permitieron alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 67.2% en el ejercicio.

El agua residual puede tratarse hasta lograr diversas calidades para satisfacer la demanda de diferentes sectores, incluida la industria y la agricultura. Puede emplearse para mantener el flujo ambiental o incluso para reutilizarse como agua potable. El |tratamiento del agua residual es una solución al problema de escasez de agua, y también para el problema de seguridad hídrica, puesto que se liberan recursos hídricos para otros usos o para su conservación (Rodríguez, Serrano, Delgado, Nolasco, & Saltiel, 2020).

Por lo anterior, en los albores del siglo XXI, se distingue una nueva etapa en la historia de la política hídrica nacional enfocada a la sustentabilidad hídrica, en la cual se incrementa significativamente el tratamiento de aguas residuales, se impulsa el reúso del agua y se hace énfasis en la administración de las aguas nacionales mediante la verificación de aprovechamientos, el ordenamiento de acuíferos y cuencas, y la actualización de la metodología para el pago de derechos por uso o aprovechamiento de aguas nacionales .

El régimen jurídico del agua está constituido por un conjunto de instrumentos normativos destinados a reglamentar el uso, la explotación, el aprovechamiento y la distribución del líquido. Se trata de un conglomerado de normas de diversa naturaleza, contenido y ámbito espacial de aplicación. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

(LGEEPA), eje rector del sistema jurídico ambiental de México, establece que el cumplimiento de las NOM contribuye al aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Esta ley reglamenta lo asentado en la Constitución Política en torno a la preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente, con la finalidad de garantizar a toda persona el derecho a un medio ambiente sano. Las disposiciones normativas en el **aprovechamiento sustentable del agua** y de los ecosistemas acuáticos está a cargo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en coordinación con la Secretaría de Salud (SSA). Ambas Secretarías son responsables de expedir las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) referidas al establecimiento y manejo de fuentes de abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones. Las NOM se centran en la regulación técnica de observancia obligatoria. Establecen reglas, especificaciones, concentraciones máximas permisibles, directrices y características del tratamiento del agua apta para consumo humano. Están directamente relacionadas con la prestación de los servicios públicos (Zamudio Santos, 2020).

La Tabla 38 muestra un compendio de las normas mexicanas relacionadas con el tema de reúso potable.

Tabla 38. Normas mexicanas del sector agua relacionadas al reúso potable.

SEMARNAT
NOM -001-SEMARNAT-2021 -Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación.
SALUD
NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
NOM-127-SSA1-2021 (por publicarse). Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
NOM-179-SSA1-2020, Agua para uso y consumo humano. Control de la calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua.
CONAGUA
NOM -014-CONAGUA-2003 – Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

El escenario en México en el siglo XXI se caracteriza por un agudizamiento de las presiones sobre los recursos naturales indispensables para el desarrollo de la economía, en particular, sobre el agua. Dadas las desiguales distribuciones geográficas de los recursos hídricos y de las actividades económicas, alrededor de 80% del producto interno bruto y 75% de la población del país se localizan en regiones que sufren de escasez de agua alta y muy alta. El estrés hídrico se expresa sobre las fuentes de agua subterráneas y superficiales: uno de cada seis acuíferos localizados principalmente en el norte y centro del país está ya comprometidos con sobreexplotación, salinización o contaminación; mientras que al menos la mitad de las cuencas nacionales exhibe alta y muy alta alteración eco-hidrológica de ríos (López, y otros, 2017).

En materia de prevención y control de la contaminación, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) establece que todas las personas físicas o morales, incluyendo las dependencias, organismos y entidades de los tres órdenes de gobierno, que exploten, usen o aprovechen aguas nacionales en cualquier uso o actividad, serán responsables en los términos de ésta Ley de: a) Realizar las medidas necesarias para prevenir su contaminación y, en su caso, para reintegrar las aguas referidas en condiciones adecuadas, a fin de permitir su explotación, uso o aprovechamiento posterior, y b) Mantener el equilibrio de los ecosistemas vitales. A su vez, la LAN establece que todas las descargas residuales deben cumplir con las Normas Oficiales

Mexicanas (NOM), o en su caso con Condiciones Particulares de Descarga. En el caso de localidades que no cuenten con sistema de alcantarillado o que no viertan sus aguas residuales en la red municipales de alcantarillado, estas también deberán realizarse con apego a dicha normatividad.

3.2.1 NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación.

La NOM-001-SEMARNAT-2021 fue publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 10 de marzo de 2022, sustituyendo así a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

La NOM-001-SEMARNAT-2021 tiene por objeto establecer los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y bienes nacionales. Es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas de aguas residuales en cualquier tipo de cuerpo receptor propiedad de la Nación. La Norma no aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes destinados exclusivamente para aguas pluviales ni a las descargas que se vierten directamente a sistemas de drenaje y alcantarillado municipales.

En la tabla 1 y 2 de la NOM-001-SEMARNAT-2021, se establecen los límites permisibles (LP) para contaminantes básicos en descarga a diferentes cuerpos de agua. En el apartado 3.13 de la NOM se define como embalse a un “vaso de formación artificial que se origina por la construcción de un bordo o cortina o vaso de formación natural, ambos alimentados por uno o varios ríos, o por agua subterránea o pluvial”. Por lo tanto “embalse” sería la definición más cercana para el LTX de acuerdo con la presente norma.

Los LP en embalses, lagos y lagunas son parecidos a los LP en las zonas marinas mexicanas; son más laxos que los LP en suelo cárstico y riego en áreas verdes, pero son más estrictos que los LP en ríos, arroyos, canales, drenes, así como infiltración y otros riegos. Todos los LP en la nueva norma son más estrictos que en la anterior emitida en 1996. La Tabla 131 y Tabla 40 muestran esta comparativa.

Dentro de las modificaciones realizadas a la NOM-001-SEMARNAT-1996 se encuentra la inclusión de tres nuevos parámetros: toxicidad, demanda química de oxígeno y el color. Además de un ajuste en el límite máximo para la temperatura (se redujo de 40 °C a 35°C).

Tabla 39**.** Comparativa de límites máximos permisibles de contaminantes de NOM-001-SEMARNAT-2021 que acaba de sustituir a la NOM-001-SEMARNAT-1996

	NOM-001-SEMARNAT-1996 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (ANTERIOR)		**NOM-001-SEMARNAT-2021 Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación. (NUEVA)**		
Parámetros	**Embalses naturales y artificiales (Uso público urbano) (C)**		**Embalses, lagos y lagunas**		
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	**P.M.**	**P.D.**	**P.M.**	**P.D.**	**V.I.**
Temperatura °C (1)	40	40	35	35	35
Grasas y aceites (2)	15	25	15	18	21
Materia flotante (3)	ausente	ausente	-	-	-
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	-	-	-
Sólidos suspendidos totales	40	60	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	-	-	100	120	140
Demanda Bioquímica de $Oxígeno_5$	30	60	-	-	-
Carbono Orgánico Total*	-	-	25	30	35
Nitrógeno total	15	25	15	25	30
Fósforo total	5	10	5	10	15
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	-	-	NA	NA	NA
Escherichia coli, (NMP/100 ml)	-	-	250	500	600
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	-	-	250	400	500
pH (UpH)	-	-		6 – 9	
Color verdadero	-	-		Longitud de onda 436 nm 525 nm 620 nm	
Toxicidad aguda (UT)	-	-		2 a los 15 minutos de exposición	

(1) Instantáneo
(2) Muestra simple promedio ponderado
(3) Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006.
P.D.= Promedio diario, P.M.= Promedio mensual
(C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley federal de derechos
V.I: Valor Instantáneo
NMP: Número más probable
UpH: Unidades de pH
UT: Unidades de Toxicidad
* Si Cloruros es menor a 1000 mg/l se analiza y reporta DQO.
* Si Cloruros es mayor o igual a 1000 mg/l se analiza y reporta COT.
* Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta E. coli.

* Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales.
Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.

Tabla 40. Comparativa de límites máximos permisibles de metales pesados de NOM-001-SEMARNAT-2021 que sustituye a la NOM-001-SEMARNAT-1996

	Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros NOM-001-SEMARNAT-1996		**Límites Permisibles para Metales y Cianuros NOM-001-SEMARNAT-2021**		
Parámetros (*)	**Embalses naturales y artificiales (Uso público urbano) (C)**		**Embalses, lagos y lagunas**		
(miligramos por litro)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	V.I.
Arsénico	0.1	0.2	0.1	0.15	0.2
Cadmio	0.1	0.2	0.1	0.15	0.2
Cianuro	1.0	2.0	1	1.5	2
Cobre	4	6.0	4	5	6
Cromo	0.5	1.0	0.5	0.75	1
Mercurio	0.005	0.01	0.005	0.008	0.01
Níquel	2	4	2	3	4
Plomo	0.2	0.4	0.2	0.3	0.4
Zinc	10	20	10	15	20

(*) Medidos de manera total.
(C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley federal de derechos.
P.M: Promedio Mensual
P.D: Promedio Diario
V.I: Valor Instantáneo

3.2.2 NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

La provisión de agua potable y de saneamiento es un factor significativo en la salud de la población, al evitar su exposición a los agentes patógenos. El acceso adecuado a estos servicios es crucial para la reducción de la mortalidad y morbilidad entre la población menor de cinco años; la disminución de enfermedades de transmisión hídrica (hepatitis viral, fiebre tifoidea, cólera, disentería y otras causantes de diarrea), así como de afecciones resultantes del consumo de componentes químicos patógenos (arsénico, nitratos o flúor) (CONAGUA, 2018).

La Ley General de Salud señala que a la Secretaría de Salud le corresponde emitir las NOM a las que debe sujetarse el tratamiento del agua para consumo humano, es decir, del agua con uso doméstico y público urbano. La NOM-127-SSA1-1994 establece los límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización. Es aplicable a todos los sistemas de abastecimiento públicos y privados y a cualquier persona física o moral

que distribuya agua para uso y consumo humano, en todo el territorio nacional, lo que incluye ejidos, comunidades, asociaciones y sociedades (Zamudio Santos, 2020). La NOM establece los límites permisibles microbiológicos en el agua, específicamente organismos coliformes totales y *Escherichia coli* o coliformes fecales; características físicas y organolépticas, referidas al sabor y el olor del agua; características químicas asociadas a elementos y compuestos químicos que pueden causar efectos nocivos en la salud de las personas; además de características radiactivas referidas a elementos de origen natural.

La NOM no estable alguna restricción respecto a la fuente de abastecimiento de agua potable.

3.2.3 NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

La NOM-127-SSA1-2021 fue publicada el 02 de mayo de 2022. Esta norma tiene la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales. La NOM es de carácter obligatorio para los organismos responsables de los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, estableciendo los límites máximos permisibles de calidad que debe cumplir el agua para uso.

En el apartado 3.1 define al Agua para uso y consumo humano, a toda aquella que no causa efectos nocivos a la salud y que no presenta propiedades objetables o contaminantes en concentraciones fuera de los límites permisibles y que no proviene de aguas residuales tratadas.

Dentro de las especificaciones sanitarias, en el apartado 5.1 menciona que el agua de los sistemas de abastecimiento no debe tener como fuente de abastecimiento agua residual tratada.

La Tabla 41, muestra una comparativa de la NOM-127-SSA1-1994 y la NOM-127-SSA1-2021.

Tabla 41**.** Comparativa de límites máximos permisibles de la calidad para agua potable.

Parámetro	**NOM-127-SSA1-1994, Mod 2000**	**NOM-127-SSA1-2021**
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables	- < 1.1 NPM/100 (ml) o no detectable
E. Coli o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Ausencia o no detectables	< 1 UFC/100 (ml) Ausencia o presencia / 100 (ml)
Giardia lamblia	-	Ausencia Quistes/20(L)
Ph	6.5 a 8.5	6.5 a 8.5
Turbiedad [a]	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.	4.0 NTU
Color Verdadero	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.	15 UC

Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).	-
Aluminio (mg/l)	0.20	0.20
Arsénico [b] (Nota 2) (mg/l)	0.05	0.025
Bario (mg/l)	0.7	1.3
Cadmio [c] (mg/l)	0.005	0.005
Cianuros totales (mg/l)	0.07	0.07
Cloro residual libre (mg/l)	0.2 a 1.50	0.2 a 1.5
Cloruros (como Cl^-) (mg/l)	250.00	-
Cobre (mg/l)	2.00	2.00
Cromo total (mg/l)	0.05	0.05
Dureza total como $CaCO_3$ (mg/l)	500.00	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos (mg/l)	0.3	-
Hierro (mg/l)	0.30	0.30
Fluoruros como F^- [d] (mg/l)	1.50	1.50
Benceno (µg/l)	10.00	10
Estireno (µg/l)	-	20
Etilbenceno (µg/l)	300.00	300
Tolueno (µg/l)	700.00	700
Xilenos (suma de isómeros ortos, meta y para) (µg/l)	500.00	500
Manganeso (mg/l)	0.15	0.15
Mercurio (mg/l)	0.001	0.006
Níquel (mg/l)	-	0.07
Nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_3$) (mg/l)	0.50	0.50
Nitrógeno de nitratos ($N\text{-}NO_3$) (mg/)	10.00	11.00
Nitrógeno de nitritos ($N\text{-}NO_2$) (mg/L)	1.00	0.90
Hexaclorobutadieno (µg/l)	-	0.60
Pentaclorofenol (µg/l)	-	9.0
2,4,6 Triclorofenol (µg/l)	-	200
Epiclorohidrina (µg/l)	-	0.40
Alacloro (µg/l)	-	20
Combinación Aldrín y dieldrín (µg/l)	0.03	0.03
Atrazina (µg/l)	-	100
Clordano (total de isómeros) (µg/l)	0.20	0.20
Cianazina (µg/l)	-	0.60
DDT (total de isómeros) y metabolitos (µg/l)	1.00	1.00
Endrin (µg/l)	-	0.60
Gamma-HCH (lindano) (µg/l)	2.00	2.0
Hexaclorobenceno (µg/l)	1.00	-
Heptacloro y epóxido de heptacloro (µg/l)	0.03	-
Metolacloro (µg/l)	-	10
Metoxicloro (µg/l)	20.00	20
Pendimetalina (µg/l)	-	20
Terbutilazina (µg/l)	-	7.0
Trifluralina (µg/l)	-	20
2,4 -D (µg/l)	30.00	30
2,4,5-T (µg/l)	-	9.0
2,4,5-TP (µg/l)	-	9.0
2,4-DB (µg/l)	-	9.0

Diclorprop (µg/l)	-	100
Mecoprop (µg/l)	-	10
Clorotoluron (µg/l)	-	30
Plata total (µg/l)	-	0.05 a 0.1
Plomo (µg/l)	0.01	0.01
Sodio (µg/l)	200.00	-
Sólidos disueltos totales (mg/l)	1000.00	1000.00
Sulfatos ($SO_4^=$) (mg/l)	400.00	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (mg/l)	0.50	0.50
Selenio (mg/l)	-	0.04
Trihalometanos totales (mg/l)	0.20	-
Yodo residual libre (mg/l)	0.2 a 0.5	0.2 a 1.5
Zinc (mg/l)	5.00	-
Microsistina L-R (µg/l)		1.0
Radiactividad alfa total (Bq/l)	0.56	0.5
Radiactividad beta total (Bq/l)	1.85	1.0
Bromodiclorometano (µg/l)	-	60
Bromoformo (µg/l)	-	100
Cloroformo (µg/l)	-	300
Dibromoclorometano (µg/l)	-	100
Ácido cloroacético (µg/l)	-	20
Ácido dicloroacético (µg/l)	-	50
Ácido tricoloracético (µg/l)	-	200
Bromatos (µg/l)	-	10
Cloratos (µg/l)	-	700
Cloritos (µg/l)	-	700
Formaldehído (µg/l)	-	900
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles fijos (mg/l)	-	0.01
Compuestos orgánicos no halogenados (mg/l) *	-	0.025
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles purgables (mg/l) *	-	0.005

[a] El límite permisible para Turbiedad será de 3.0 UNT a partir del segundo año posterior a la entrada en vigor de la presente Norma.
[b] El límite permisible para arsénico será de 0.025 mg/L para todas las localidades y se ajustará de conformidad con la tabla de cumplimiento gradual Tabla 5 de este inciso 5.4.
[c] El límite permisible para cadmio será de 0.005 mg/L para todas las localidades y se ajustará de conformidad con la tabla de cumplimiento gradual Tabla 5 de este inciso 5.4.
[d] El límite permisible para fluoruros será de 1.50 mg/L para todas las localidades y se ajustará de conformidad con la tabla de cumplimiento gradual Tabla 3 inciso 5.3.
Nota 2. El límite permisible para arsénico se ajustará anualmente, de conformidad con la tabla de cumplimiento gradual del apartado 4.3.1.
*Con detalle en las tablas A2 y A3.

3.2.4 NOM-179-SSA1-2020 sobre agua para uso y consumo humano

La Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios y el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario publican Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-2020, Agua para uso y consumo humano. Control de la calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua. El agua destinada para uso y consumo humano, independientemente de la fuente de origen superficial o subterráneo, debe de someterse a procesos de potabilización con el propósito de evitar riesgos a la salud de la población y prevenir enfermedades infecciosas y parasitarias, así como las derivadas de la ingestión de sustancias tóxicas que puede contener el agua. El control sanitario del agua que se abastece para uso y consumo humano, debe estar basado en un enfoque de riesgos, priorizando un esquema de caracterización y vigilancia de parámetros de

control a partir de la identificación inicial de las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua (Diario Oficial de la Federación, 2020) .

3.2.5 NOM-014-CONAGUA-2003, que establece los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada

La NOM-014-CONAGUA-2003, establece los requisitos que deben cumplir: la calidad del agua, la operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. La NOM, es aplicable a obras planeadas de recarga artificial tanto nuevas como existentes, que descarguen aguas residuales tratadas para este propósito y cuya función sea almacenar e incrementar el volumen de agua en los acuíferos, para su posterior recuperación y reúso. Corresponde a los permisionarios del proyecto su cabal cumplimiento.

En la introducción de la NOM, menciona que en **las fuentes de recarga artificial a considerar se incluyen las aguas residuales de las zonas urbanas-industriales**, pues constituyen un cuantioso recurso potencial para recarga por su permanencia y magnitud creciente.

En el apartado 6.3.1, establece los requisitos que debe cumplir el agua residual tratada utilizada en la recarga de un acuífero superficial, subsuperficial o directa (Tabla 134). Indica los límites permisibles de contaminantes como microorganismos patógenos, regulados por norma NOM-127-SSA1- 1994 Mod. 2000, y agrega otros parámetros adicionales que no están incluidos en dicha norma.

Tabla 42**.** Calidad de agua residual tratada para recarga artificial.

Tipo de Contaminante	**Tipos de Sistemas de Recarga**	
	Superficial / Subsuperficial	**Directo**
Microorganismos Patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos	Remoción o inactivación total de microorganismos entero patógenos
Contaminantes Regulados por Norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1- 1994 Mod 2000	Límites permisibles NOM127-SSA1-1994 Mod 2000
Contaminantes no Regulados por Norma	$DBO_5 \leq 30$ mg/l COT = 16 mg/l	COT ≤ 1 mg/l

En al apartado 6.3.2, se especifican los requisitos a cumplir cuando a distancias menores de 1.0 km del límite exterior del sistema de recarga de acuífero existan captaciones que suministran agua para usos público-urbano o doméstico. Se establecen los requisitos relativos a la **distancia mínima a las captaciones y el tiempo de residencia en el subsuelo del agua de recarga** (Tabla 135).

Tabla 43**.** Distancia mínima a las captaciones y tiempo de residencia en el subsuelo del agua de recarga.

Variable	**Tipos de Sistemas de Recarga**	
	Superficial / Subsuperficial	**Directo**

Distancia horizontal mínima entre el límite exterior del SRA[1] y las captaciones para uso público-urbano o doméstico	150 m	600 m
Tiempo de residencia del agua de recarga antes de su extracción	6 meses	12 meses

[1] sistema de recarga artificial

Así mismo, dicha norma específica **los niveles máximos permisibles de contaminantes no regulados por la norma NOM-127-SSA1-1994**, en aguas residuales destinadas a la recarga artificial de acuíferos, los contaminantes incluyen de tipo microbiológicos, productos de desinfección, desinfectantes, químicos orgánicos, químicos inorgánicos y radiactivos. **Algunos de estos contaminantes son regulados por la normativa internacional con respecto a los esquemas de reúso potable indirecto con un reservorio ambiental**.

3.3 Propuesta sobre lineamientos para reúso indirecto de agua residual en México

Para la gran mayoría de los proyectos de reúso potable planificados, ha existido un impulsor primordial clave, que ha sido la necesidad de ampliar la capacidad de suministro de agua para satisfacer la creciente demanda. En algunos casos, esta necesidad se ha visto exacerbada por cambios a largo plazo en la disponibilidad de suministro de agua convencional, por intensas condiciones de sequía inmediata o una distribución geográfica de los recursos hídricos desigual.

De acuerdo con (Jiménez-Cisneros, 2014) definir un marco legal está relacionado no solo con el conjunto de parámetros utilizados para definir la calidad del agua, sino también con:

- qué procesos están permitidos
- la fiabilidad requerida
- condiciones de seguimiento y elaboración de reportes
- cumplimiento
- responsabilidades
- el tipo de reutilización aceptable.

Con respecto al proceso de tratamiento, es importante tener en cuenta que en muchos casos la selección de una tecnología está predeterminada por los estándares aplicados. Para los países en desarrollo, esto podría ser una fuente de preocupación cuando los estándares nacionales se desarrollan copiando los de las naciones desarrolladas, ya que es probable que se utilicen soluciones de alta tecnología y alto costo (Tabla 44). La mayoría de los casos de estudio que se han mencionado, han seguido los estándares y criterios de normativas internacionales como la OMS, EPA y Australia. De hecho, los criterios de calidad del agua son muy diversos para diferentes reúsos y entre diferentes países, ya que se basan en el conocimiento local, las condiciones socioeconómicas y la percepción de reúso. Todos tienen en común que sus criterios se establezcan en función de los requisitos del próximo uso y usuario, y tienen el objetivo general de proteger la salud (Jiménez-Cisneros, 2014).

Tabla 44. Resumen de procesos: efectividad de remoción de contaminantes y costos. Fuente: (Jiménez-Cisneros, 2014)

COST: Low / Medium / High						1																	
Sophistication/Complexity: Low / Medium / High																							
Process / Pollutant	ONSS	PS	BT	BT + NR	CF	FI	Cl-D	UASB	LmP	UV-D	O-D	NPh	SAT	WT	Cl-O	Oz-O	UV-O	Pp	Ads	MF	UF	NF	RO
Suspended solids							NO			NO	NO	NO			NO	NO	NO		15				
Dissolved solids	NO	NO	NO	NO	NO	NO	3	NO	3	NO	NO	NO	3	NO	NO	NO	NO	3	NO				
BOD										NO		NO											
TOC										NO								NO					
Volatile organics	NO	NO	2			NO				NO			NO										
Heavy metals	NO			2		21	NO			NO	NO				NO	NO	NO		NO				
Nutrients	NO					21	NO		10	NO	NO												
Viruses*	NO					7		NO	11					9					No on AC	NO	NO		
Bacteria*		NO				7		NO	11					9				2	No on AC				
Protozoan*						2, 10		9						9				2					
Helminth eggs							NO	9		NO	NO	?		9				2					
Pesticides	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	11		11				12							
Disinfection by-products							8				8				8								
Emerging chemical pollutants (EC)	NO		3,4,5		5 6		8, 12			11	12	20	19	?	12,13	12	14	5	16	NO	1 7	17	18

BOD:Biochemical oxygen demand TOC: Total organic carbon EC: Emerging chemical pollutants

Abbreviations: AC, activated carbon; Ads, adsorption; BOD, biochemical oxygen demand; BT, biological treatment (any technology); BT + NR, biological treatment with nutrient removal; CF, coagulation–flocculation (any technology); Cl-D, chlorine disinfection; Cl-O, chlorine oxidation; EC, emerging chemical pollutants; FI, filtration; LmP, lime precipitation; MF, microfiltration; NF, nanofiltration; NPh, natural photolysis; O-D, disinfection with ozone; ONSS, onsite sanitation systems; Oz-O, ozone oxidation; Ps, primary sedimentation; Pp, precipitation; RO, reverse osmosis; SAT, soil aquifer treatment and riverbank filtration; TOC, total organic carbon; UASB, upflow anaerobic sludge blanket; UF, ultrafiltration; UV-O, UV-light oxidation; UV-D, UV-light disinfection; WT, wetlands.

Low removal

Medium removal

High removal

NOTAS:
NO – No aplica para el contaminante.
1 – Según el nivel de tratamiento (primario, secundario o terciario).
2 – Dependiendo del tipo de tecnología utilizada.
3 – Podría aumentar el contenido.
4 – Principalmente en plantas de tratamiento secundario biológico; dependiendo de la composición química del contaminante, la remoción puede representar solo la transformación del compuesto o su adsorción en flóculos.
5 – Dependiendo del compuesto específico.
6 – Si se combina con productos químicos.
7 – Aumenta su valor.
8 – Sin fiabilidad.
9 – Fósforo.

10 – En función de las condiciones de operación.
11 – Pueden formarse subproductos nocivos.
12 – Si no hay competencia con materia orgánica (DBO o demanda química de oxígeno).
13 – Las dosis son varios órdenes de magnitud superiores a las utilizadas para la desinfección.
14 – Si se utiliza carbón granular.
15 – Alta para compuestos orgánicos no polares (con log KOW > 2) y cuando no hay competencia con la materia orgánica.
16 – De media a alta, según la presencia de cationes y materia orgánica.
17 – Alto, pero no para compuestos de bajo peso molecular sin carga.
18 – Efectivo para varios contaminantes químicos emergentes (EC), pero no para carbamazepina, primidona y medios de contraste de rayos X yodados.
19 – Alta para algunos (EC), ya que depende de la intensidad de la radiación solar; la eliminación será diferente para diferentes latitudes y aguas.
20 – Se puede mejorar con fotosensibilizadores.
? – Información desconocida o insuficiente.
* – Puede ser removido o inactivado.

En 2002 se puso en marcha una nueva planta de recuperación de agua de Goreangab, en Namibia, la planta se basó en treinta años de experiencia, pero el sistema de tratamiento se amplió mediante ozonización y ultrafiltración. La calidad del agua cruda, intermedia y potable es obviamente de extrema importancia (Van der Bruggen, 2010). Cuando se desarrolló esta planta, aunque las Normativas de Namibia para el agua potable se habían aprobado en 1988, no había ninguna referencia al uso de aguas residuales tratadas. Como resultado, la ciudad de Windhoek aplicó la autorregulación mediante el desarrollo de normas para la nueva planta a partir de normas y directrices internacionales existentes para la calidad del agua potable. Estos incluyeron un conjunto integral de estándares de calidad del agua, incluidos estándares de agua intermedios y finales, cada uno con valores objetivo y absolutos. Se incorporaron múltiples barreras en la nueva planta para eliminar contaminantes o sustancias a niveles específicos y garantizar el cumplimiento de las normas (World Health Organization, 2017). Al diseñar los estándares para la nueva planta, se consideraron los siguientes lineamientos:

- Normativa para la Evaluación del Agua Potable para Consumo Humano (1991), Departamento de Asuntos Hídricos, Namibia (Directrices de Namibia, 1991).
- Criterios de calidad del agua potable (Rand Water, 1994).
- Normativa de la OMS para la calidad del agua potable (OMS, 1993).
- Estándares Nacionales de Agua Potable y Avisos de Salud (EPA, 1996).
- Normativa de la Comunidad Europea para el uso de agua para consumo humano (80/778/EWG) (1980 y 1994 borrador) (CE, 1980).
- Una guía para la planificación, diseño e implementación de un esquema de recuperación de agua (Meiring & Partners, 1982).

El desarrollo de pautas específicas para el reúso potable, es una práctica común que los lineamientos establecidos estén sujetos a normativas para agua potable. En Singapur, el objetivo del esquema NEWater es el cumplimiento de los valores de referencia especificados en la Normativa de la OMS (Reutilización potable: Guía para producir agua potable segura 2017) y los estándares de agua potable de la EPA (2014). En los Estados Unidos, el agua suministrada a partir de esquemas de reúso potable está sujeta a los requisitos de calidad del agua potable especificados en Safe Drinking Water Act, así como a posibles requisitos estatales.

Cada país debe adaptar los lineamientos, en función de las condiciones locales, y derivar los estándares de calidad de agua en función de la normativa nacional e internacional. En los países desarrollados, estos lineamientos fueron el resultado de un largo período de inversión en infraestructura, durante el cual se mejoraron progresivamente los estándares. Se deben tener en cuenta las implicaciones de costos y mantenimiento de estándares demasiado estrictos a corto plazo. Los valores de referencia deben tratarse como valores meta, a alcanzar a corto, mediano o largo plazo, según las condiciones tecnológicas, institucionales o financieras del país (Environmental Protection Agency, 2012). El caso de Namibia es un ejemplo de implementación de un esquema de reúso potable adaptando lineamientos y normativas internacionales y locales para satisfacer la necesidad de suministrar agua potable a la población. **La Normativa de la OMS** (Reutilización potable: Guía para producir agua potable segura 2017), establece cuatro conceptos claves en un esquema de reúso potable a implementar, los cuales son:

Confiabilidad: La redundancia, la robustez y la resiliencia describen las medidas que se pueden tomar para garantizar el suministro de agua potable de calidad a la población cumpliendo con el objetivo principal de protección de la salud pública.

Redundancia: El uso de medidas más allá de los requisitos mínimos establecidos por la normativa para garantizar que los objetivos del tratamiento se cumplan de manera más confiable. Lo anterior es el concepto de barreras múltiples de tratamiento, el Proyecto de Agua Reciclada del Corredor Occidental (Western Corridor Recycled Water Project, WCRWP) en Australia tiene el enfoque de barrera múltiple aplicando 7 barreras.

Barrera 1.- Cubre captaciones de alcantarillado del WCRWP y está diseñado para controlar el ingreso de las aguas residuales a la planta de tratamiento de agua recuperada.

Barrera 2.- Son las plantas de tratamiento de aguas residuales del WCRWP. Es la primera barrera de tratamiento de la planta de agua recuperada y está diseñada para tratar las aguas residuales mediante procesos biológicos produciendo un efluente de alta calidad que se utiliza como influente para la planta de tratamiento avanzado.

Barrera 3-5.- Las barreras 3 a 5 son las plantas de tratamiento avanzado del WCRWP. Los procesos de tratamiento primario de la Barrera 3 son la microfiltración (MF)/ultrafiltración (UF), que están diseñados para producir un efluente adecuado para la barrera 4. La Barrera 4 utiliza el proceso de ósmosis inversa. La Barrera 5 emplea procesos de tratamiento de oxidación avanzada y es el proceso final de la planta de tratamiento avanzado. Esta barrera está diseñada para brindar seguridad adicional al eliminar trazas de contaminantes orgánicos, patógenos, virus y protozoos que puedan quedar después de la ósmosis inversa. La planta de tratamiento avanzado asegura que el agua de salida cumpla con los requisitos de calidad del agua para uso industrial directo y para la descarga en el medio ambiente natural (Barrera 6).

Barrera 6.- Consiste en el entorno natural del WCRWP, el reservorio para captaciones y almacenamiento de agua. Esta barrera proporciona una gran capacidad de amortiguamiento para neutralizar cualquier falla posible en los procesos de tratamiento y se tendría el tiempo suficiente para evitar que el agua que no cumple con la calidad adecuada ingrese a la planta potabilizadora. La función principal del reservorio ambiental en un esquema de reúso potable es promover la confiabilidad en la protección de la salud pública. El reservorio ambiental logra este objetivo por medio de tres funciones principales: la dilución, el tiempo de respuesta en caso de detectar posibles fallas en los procesos de tratamiento y el desacoplamiento de la planta de tratamiento avanzado de la planta de tratamiento de agua potable que permite el control de regular de forma independiente el flujo hacia y desde el reservorio ambiental. Un proyecto que puede proporcionar los tres elementos ofrece una importante protección de la salud pública; estos son los que finalmente distinguen el aumento de agua superficial de otras formas de reúso (Trussell Technologies, Inc., 2016).

Barrera 7.- Es la planta potabilizadora que utiliza como influente agua de la Barrera 6 (reservorio ambiental). El agua tratada en la potabilizadora se suministra directamente a los usuarios finales para su consumo. Las aguas residuales generadas por los usuarios finales se descargan en la Barrera 1 y, al hacerlo, completan el ciclo del agua recuperada.

- **Robustez:** Capacidad del sistema para abordar una amplia variedad de contaminantes (incluyendo los llamados contaminantes emergentes) y responder a posibles fallas en el sistema de tratamiento. El uso de barreras múltiples generalmente hará que un tren de procesos sea más sólido que un proceso unitario, cumpliendo con los objetivos establecidos y permite incluso responder a posibles fallas parciales o simultáneas.

- **Resiliencia:** Consiste en garantizar la confiabilidad cuando la redundancia y la solidez no son suficientes. Un ejemplo es la combinación de medidas de control de monitoreo

dentro de los trenes de tratamiento. Si no se cumplen los criterios operativos, se pueden implementar medidas correctivas inmediatas o se puede desviar el agua a usos alternativos.

3.4 Casos de estudio en el mundo para reúso potable indirecto

Hay un número significativo de proyectos de reúso de agua potable, pioneros, que sustentan el conocimiento y la capacidad para el reúso potable indirecto como se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45. Sistemas en operación de reúso potable indirecto, descarga a cuerpo de agua para posterior potabilización y suministro a la población.

Proyecto	Ubicación	Inicio	Capacidad (L/s)	Sistema de tratamiento	Parámetros monitoreados
Upper Occoquan Service Authority, Fairfax (UOSA)	Virginia, E.U.	1978	2,366	Clarificación con cal > Filtración multimedia > FCA > Intercambio iónico > Cl	DQO, SST, coliformes fecales, amonio, fósforo total, turbiedad y contaminantes emergentes.
Clayton Country	Georgia, E.U.	1985	789	Cl > UV > Sistema natural construido (suelo /humedales)	
Gwinnett County	Georgia, E.U.	1999	2,629	UF > Ozono > FCA	DQO, SST, coliformes fecales, amonio, fósforo total, turbiedad, contaminantes emergentes.
Loudoun County	Virginia, E.U.	2009	482	MBR + FCA + UV	Nitrógeno total, fósforo total, nitrógeno total Kjeldahl, DQO.
Aurora	Colorado, E.U.	2010	2,191	Filtración en suelo a orillas del río > Suavización > UV-OA > MF > FCA	Turbiedad, pH, dureza, alcalinidad, COT, pH, trihalometanos, sulfatos, metales pesados.
NEWater, Changi	Singapur	2010, 2017	5,345	UF> OI >UV	Color, turbiedad, dureza total, pH, conductividad, nitrato, sulfato, trihalometanos totales, fluoruros, aluminio, fierro, manganeso, zinc, coliformes totales, enterovirus.
The Western Corridor Recycled Water	Australia	2007	2,673	UF> OI > OA >UV > Cl	Turbiedad, dureza total, químicos orgánicos, productos de cuidado personal, fármacos,

Scheme	hormonas, pesticidas, herbicidas, microorganismos patógenos, nutrientes.

Cl- Cloración, FCA- Filtro de carbón activado, MF- Microfiltración, UF- Ultrafiltración, OI- Ósmosis inversa, OA- Oxidación avanzada, UV- Radiación ultravioleta.

3.4.1 Gwinnett County, Georgia E.U.

El condado de Gwinnett, ubicado en el área metropolitana de Atlanta, Georgia, en Estados Unidos practica el reúso potable indirecto planificado sin ósmosis inversa (Funk, Bell, & Hooper, 2018). La principal instalación de aguas residuales en el condado de Gwinnett, Georgia, es el Centro de Recursos Hídricos F. Wayne Hill (FWH WRC por sus siglas en inglés). Esta es una de las tres instalaciones de propiedad y operación del condado y brinda servicios de aguas residuales a más del 50 % de la población (Khan & Branch, 2019). La instalación utiliza ultrafiltración, pre-ozono, filtración biológica sobre carbón activado (BAC) y desinfección posterior al ozono para devolver agua recuperada altamente tratada al lago Sidney Lanier, la única fuente de suministro de agua potable del condado para más de 900,000 personas. Las plantas de tratamiento de agua potable del condado (Shoal Creek y Lanier), utilizan trenes con procesos de biofiltración seguidos de ozono para producir agua potable de alta calidad.

Se realizaron pruebas a escala piloto para determinar si el agua obtenida de los tratamientos avanzados del FWH WRC podría usarse como un suministro alternativo de agua potable para la población y si era necesario realizar cambios operativos para este escenario. Se construyeron dos trenes de tratamiento piloto independientes uno para reúso potable indirecto y otro para reúso potable directo, cada uno con 0.38 L/s y se operaron en paralelo durante nueve meses. El sistema piloto de reúso potable indirecto fue alimentado con agua del lago Lanier mientras que el sistema piloto de reúso potable directo recibió agua tratada avanzada del FWH WRC mezclada con agua del lago Lanier (figura 79).

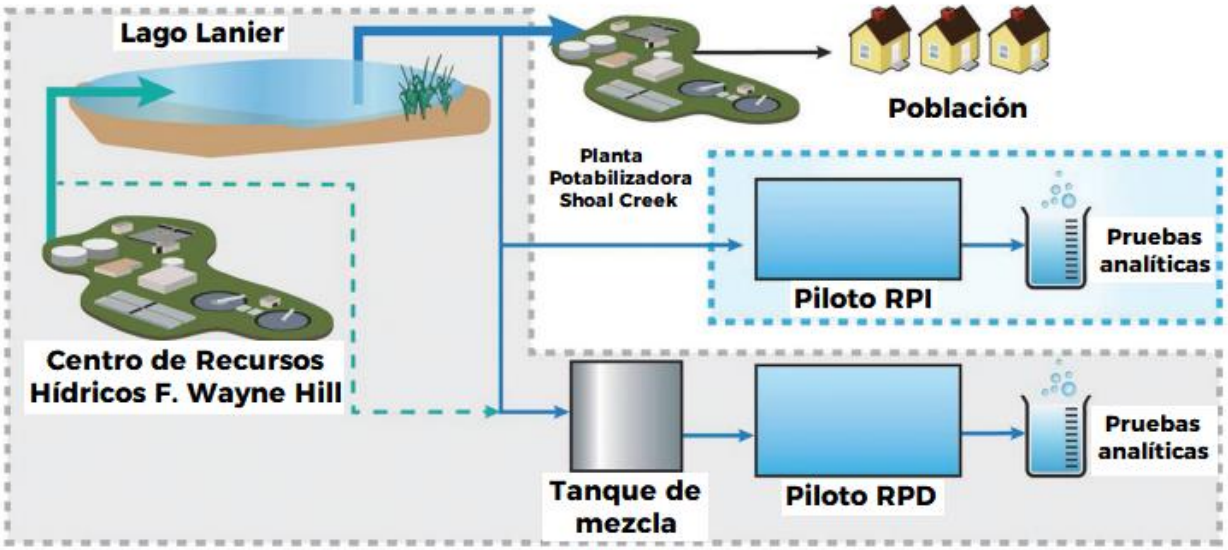


Figura 84. Representación esquemática de pruebas pilotos del sistema de Gwinnett. Modificado de (Funk, Bell, & Hooper, 2018).

El objetivo del estudio a escala piloto fue evaluar si la filtración con carbón biológicamente activo en conjunto con las múltiples etapas de ozono podría usarse para lograr agua de calidad potable en un escenario de reúso potable directo. Los datos obtenidos a escala piloto fueron evaluados para determinar las proporciones de mezcla de agua tratada avanzada del FWH WRC con agua del lago Sidney Lanier podrían cumplir con los estándares primarios y secundarios de agua potable. El desempeño de la planta piloto fue monitoreado para una matriz de condiciones operativas, incluidas varias mezclas de agua tratada avanzada del FWH WRC con agua del lago y pruebas durante períodos de agua fría y tibia para identificar diferencias en el desempeño del tratamiento.

Los resultados obtenidos de las pruebas piloto para reúso potable directo demostraron que la filtración con carbón biológicamente activo y las múltiples etapas de ozono proporcionaron agua de igual o mejor calidad que los suministros de agua potable actuales cuando se mezcló en una proporción del 15 % de agua tratada avanzada del FWH WRC. En mezclas más altas (por ejemplo, 25 %, 50 % y 100 %), se excedieron los niveles máximos de contaminantes primarios y secundarios para ciertos contaminantes químicos (nitrato, bromato y cianuro).

Para el reúso potable indirecto el sistema piloto requería mayores dosis de ozono y de polímeros para mantener la turbidez del agua filtrada por debajo de 0.15 NTU.

En el sistema de tratamiento a escala, las aguas residuales en FWH WRC se someten a cribado, remoción de arena, sedimentación primaria y posteriormente un sistema de lodos activados y clarificación, produciendo un efluente secundario. La planta utiliza tecnologías de torre empacada húmeda para el control de olores en sus sistemas de tratamiento preliminar, primario y secundario. El efluente secundario alimenta a dos trenes paralelos de tratamiento terciario para lograr la confiabilidad utilizando el enfoque de barreras múltiples. El esquema de la Fase 1 utilizó clarificadores químicos y de contacto de sólidos, seguidos de medios filtrantes granulares. La fase 2 conformada por clarificador de placa inclinada y membranas de ultrafiltración. Una razón para la selección de la ultrafiltración fue la calidad que se obtiene en comparación con medios filtrantes. El efluente de ambas fases se mezcla antes de la desinfección con ozono, seguido de filtración con carbón biológicamente activo y la desinfección final con ozono antes de descargar a través de una tubería al lago Lanier y al río Chattahoochee (Environmental Protection Agency, 2017) (Khan & Branch, 2019). El sistema se muestra en la figura 3.2.

La planta potabilizadora Shoal Creek está constituida por un módulo de ozono, floculación con polímero de cloruro férrico seguido de filtración biológica y finalmente cloración.

El sistema de FWH WRC se destaca por la ausencia de un proceso de osmosis inversa. No está claro por qué no se seleccionó osmosis inversa para el tren de tratamiento, sin embargo, hay posibles hipótesis. En un estudio reciente, se informó que los esquemas de osmosis inversa producen una corriente de salmuera concentrada que incurre en costos adicionales de tratamiento, a un proceso que ya es costoso. De hecho, cuando **se comparó el diagrama de flujo del sistema de tratamiento del condado de Gwinnett con el de Oxnard California (UF, OI, UV/OA)** y se escalaron ambos para tratar 1,041.67 L/s de aguas residuales, se predijo que **los costos de capital y operativos del sistema de Gwinnett integrado por ozono y filtración con carbón biológicamente activo eran aproximadamente un 40% más bajos que el de Oxnard.**

Cabe mencionar que el sistema de tratamiento de Oxnard California, es un esquema de reúso potable indirecto con recarga de acuífero.

Otra hipótesis que sugiere el uso de ósmosis inversa en el sistema de Oxnard es el cumplimiento de las regulaciones de agua recuperada o reciclada del estado de California para inyección subsuperficial, especificamente para dos compuestos orgánicos traza (N-nitrosodimetilamina y 1,4-dioxano). La combinación de ósmosis inversa y UV-OA proporciona una excelente eliminación de todas las clases de compuestos orgánicos traza. La calidad de agua de alimentación al sistema de Oxnard y Gwinnett se muestran en la Tabla 138.

Tabla 46**.** Calidad del agua de alimentación para cada una de las plantas. Modificado de (Lozier, Schimmoller, & Curl, 2016)

Parámetros	Oxnard	Gwinnett
DBO (mg/L)	16	-
DQO (mg/L)	-	25
COT (mg/L)	16.6	6
SST (mg/L)	6.4	9
Turbiedad (NTU)	4	2.0
STD (mg/L)	1,750	300
$N\text{-}NH_4^+$ (mg/L)	23.3	0.2
$N\text{-}NO_3^-$ (mg/L)	2.6	6.5
N total(mg/L)	25.9	8
P total (mg/L)	1.24	0.2

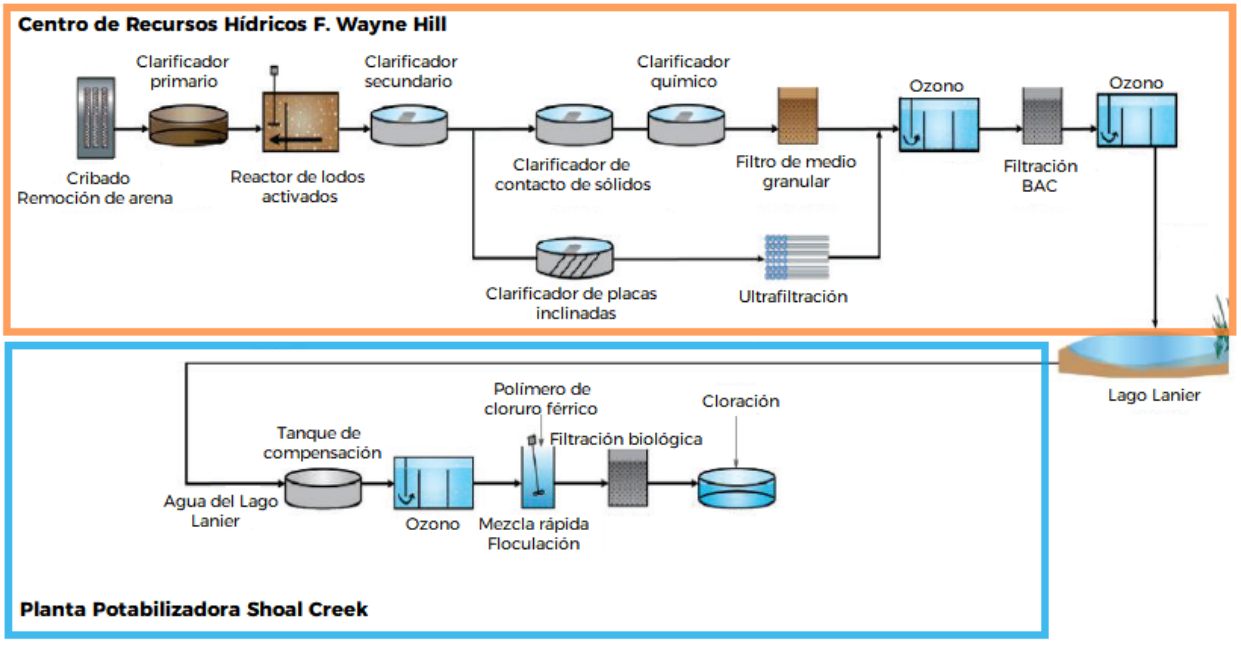


Figura 85. Representación esquemática del sistema de tratamiento de Gwinnett County, Georgia E.U. (Meeker, Funk, Bell, & Hopper, 2018).

Los parámetros de calidad de agua para la descarga al lago Lanier se muestra en la Tabla 47.

Tabla 47. Parámetros monitoreados en Gwinnett County. Modificado de (Environmental Protection Agency, 2017)

Parámetro	Unidades	Límite permisible (promedio mensual)	Anual 2015 (valores

			promedio)
Sólidos Suspendidos totales (SST)	mg/l	3	0.6
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	18	8
Coliformes fecales	conteo/100ml	2	1
Turbidez	NTU	0.5	0.12
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	0.4	0.07
Fósforo total	mg/l	0.08	0.03
Oxígeno Disuelto	mg/l	7.0 (mínimo)	13.2

3.4.2 The Western Corridor Recycled Water Project, Australia

La mayor parte de Australia tiene escasas precipitaciones. La población es pequeña, pero crece al 1.5% al año. Las limitaciones de agua se ven agravadas por el cambio climático. Para 1990, las restricciones impuestas a las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales a las aguas receptoras se convirtieron en un incentivo para el reciclaje de agua. La sequía del milenio (2000-2009) fue un factor adicional para el reciclaje y la desalinización del agua. Las políticas de reforma del agua llevaron a pautas para el agua reciclada, incluidas las aguas pluviales y el aumento del agua potable (Radcliffe, 2020).

Se construyó un gran proyecto de reúso de agua potable en el sureste de Queensland, con la intención de aumentar los suministros de agua superficial para el área, incluida Brisbane (Khan & Branch, 2019). El Proyecto de Agua Reciclada del Corredor Occidental (Western Corridor Recycled Water Project, WCRWP,) se construyó en el sureste de Queensland, Australia, durante 2007-2008. El WCRWP tiene la capacidad de producir hasta 2,673 L/s que representa aproximadamente el 30% del total de las necesidades actuales de suministro de agua para el sureste de Queensland (Edzwald, 2011). El WCRWP fue diseñado para utilizar efluentes tratados de seis plantas de tratamiento de aguas residuales (Bundamba, Goodna, Oxley, Wacol, Luggage Point y Gibson Island) para producir agua recuperada en tres plantas de tratamiento avanzado de agua (Bundamba (2,628.76 L/s), Luggage Point (3,066.88 L/s) y Gibson Island (4,381 L/s) produciendo aguas aptas para usos industriales y potables (Edzwald, 2011) (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013)

Las tres plantas de tratamiento avanzado de agua, consisten en procesos de ultrafiltración, osmosis inversa, UV-oxidación avanzada con peróxido y desinfección con cloro (figura 3.3), complementando de forma parcial el depósito de agua potables más grande del sureste de Queensland, el lago Wivenhoe.

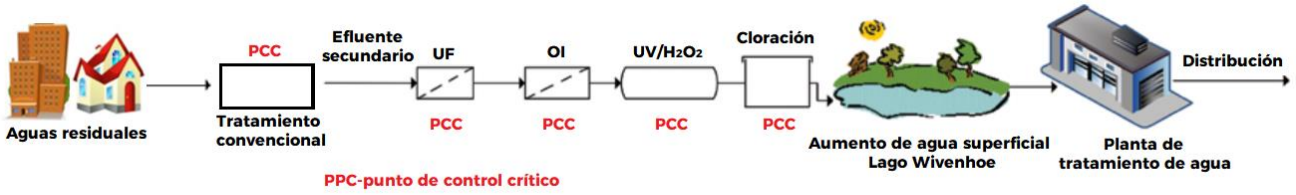


Figura 86. Representación esquemática del sistema de tratamiento de The Western Corridor Recycled Water Scheme, Australia. Modificado de (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013) y (University of New South Wales, 2014).

En el lago Wivenhoe fue construida una presa (presa Wivenhoe), que proporciona un suministro de agua potable segura para Brisbane, Ipswich, Logan, Gold Coast, Beaudesert, Esk, Gatton, Laidley, Kilcoy, Nanango y las áreas circundantes. La presa Wivenhoe fue diseñada y construida como una instalación multifuncional. La presa se construyó aguas

arriba del río Brisbane, a 80 kilómetros de la ciudad de Brisbane. En el nivel de suministro completo, la presa tiene aproximadamente 2,000 veces el consumo de agua diario necesario para Brisbane (Seqwater). En la Tabla 140 se muestran los datos relevantes de este reservorio ambiental.

Tabla 48. Datos importantes de la presa en el lago Wivenhoe

Curso de agua	Río Brisbane
Ubicación	Aguas arriba de Fernvale
Área de captación	7,020 km^2
Compuertas	5
Capacidad total de almacenamiento	3,132 hm^3
Capacidad total de suministro	1,165 hm^3
Mitigación de inundaciones	1,967 hm^3

Antes de construir a escala las tres plantas, se desarrollaron pilotos más pequeños en dos de los sitios (Luggage Point y Gibson Island) para ayudar en la selección del proceso y el desempeño de las pruebas. Se han realizado pruebas exhaustivas de validación y verificación durante el pilotaje y la puesta en marcha de las instalaciones. Estas actividades demostraron que la calidad del agua reciclada cumple, e incluso supera, los requisitos de las Normativas australianas para el reciclaje de agua, así como las Normativas australianas para el agua potable (Khan & Branch, 2019).

Dentro del sistema de tratamiento, se establecieron puntos críticos de control. Cada punto crítico de control fue validado mediante la simulación virtual del proceso antes del arranque en sitio seguida de tres meses de monitoreo intensivo de la fuente (aguas residuales tratadas) y el agua purificada (el agua del producto final). El Plan de Gestión de Agua Reciclada también especifica protocolos de respuesta integrales para las alarmas de punto crítico de control y el incumplimiento de la calidad del agua purificada (University of New South Wales, 2014).

Se monitorean aproximadamente 523 parámetros entre 2011 y 2013. Los parámetros monitoreados fueron claves en el punto de suministro del lago Wivenhoe, los cuales fueron turbidez, dureza total, 1,4-dioxano, fluoreno, EDTA (ácido etilenodiaminatetraacético), octadioxina, cloroformo, bromato, Warfarina, cafeína, estrona, testosterona, tetradifón, atrazina, *Escherichia coli*, esporas de *Clostridium perfringens*, Colifagos somáticos, nitrito, nitrato y carbono orgánico total.

3.4.3 NEWater, Singapur

Singapur, una isla con recursos hídricos naturales limitados, ha convertido su vulnerabilidad en fuerza. Hoy, la nación ha construido un suministro de agua robusto, diversificado y sostenible a partir de cuatro fuentes diferentes conocidas como los Cuatro Grifos Nacionales (1. Agua de áreas de captación locales, 2. Agua importada, 3. Agua recuperada de alta calidad conocida como NEWater y 4. Agua desalinizada). El país también ha gestionado la demanda de agua de manera eficiente a lo largo de los años. Al adoptar una estrategia de gestión sostenible del agua, Singapur ha garantizado un suministro de agua estable y sostenible capaz de satisfacer el crecimiento continuo del país (PUB Singapore´s National Water Agency, 2014). Las plantas NEWater de Singapur son algunos de los sistemas de RPI más conocidos del mundo. El reúso de agua potable puede satisfacer hasta el 40% de la demanda

de agua de Singapur y ha ayudado a la ciudad-estado a perseguir la sostenibilidad del agua. El agua potable producida se destaca constantemente por cumplir con los estándares de agua potable, incluidos los estándares de agua potable de la EPA y las pautas de la Organización Mundial de la Salud (Environmental Protection Agency, 2017).

Singapur comenzó a conceptualizar el reúso de agua potable en la década de 1970 para hacer frente a los desafíos del crecimiento de la población, romper la dependencia de los suministros malayos y complementar sus reservorios existentes. Sin embargo, debido a la falta de tecnología adecuada y los altos costos asociados con los procesos en ese momento, la idea no se llevó a cabo (University of New South Wales, 2014).

El Estudio de Recuperación de Agua de Singapur (Estudio NEWater) se inició en 1998 como una iniciativa conjunta entre la Junta de Servicios Públicos de Singapur (PUB) y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Hídricos para diversificar la cartera de agua de Singapur y disminuir la dependencia del agua importada de Malasia. En 2000, se construyó una planta de demostración de 116 L/s en la Planta de Recuperación de Agua de Bedok. El agua recuperada de esta planta fue monitoreada regularmente durante un período de 2 años, cuando un panel de expertos dio su aprobación en términos de calidad y confiabilidad del agua (Edzwald, 2011).

Para el 2003, se construyeron dos plantas avanzadas de tratamiento de agua: Bedok y Kranji produciendo 833 L/s de agua regenerada de alta calidad. En 2004 se puso en servicio una tercera planta en Seletar con una capacidad de 278 L/s, y en marzo de 2007 se puso en funcionamiento una cuarta planta en Ulu Pandan con una capacidad de 1,678.24 L/s, lo que elevó la capacidad combinada de las plantas de NEWater a 2,778 L/s (Edzwald, 2011). La PUB ha calificado el agua reciclada producida a partir de estas plantas como 'NEWater'. NEWater se suministra principalmente al sector industrial de Singapur, como las plantas de fabricación de obleas de silicio y los edificios comerciales con fines industriales de refrigeración por aire. También se suministra a las industrias de generación de energía y electrónica. Durante los períodos secos, se utilizan unos 1,273 L/s de NEWater para reponer los depósitos de agua superficial antes del tratamiento convencional de agua potable con un promedio anual de 347 a 463 L/s (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013).

El esquema de tratamiento se muestra en la figura 3.4.

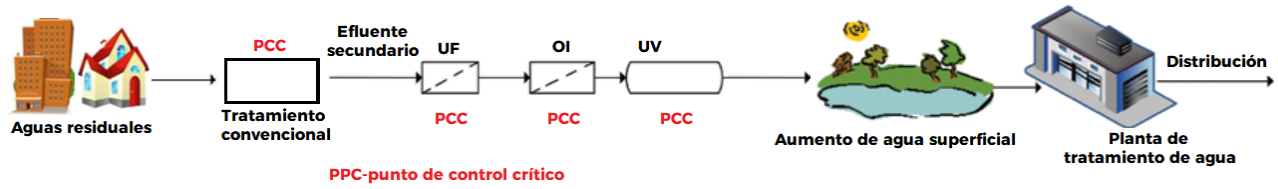


Figura 87. Representación esquemática del sistema de tratamiento NEWater, Singapur. Modificado de (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, 2013) y (University of New South Wales, 2014).

El tren de tratamiento se muestra en la Tabla 49 así como los objetivos de cada uno de los procesos que lo integran.

Tabla 49. Procesos aplicados en el sistema de tratamiento NEWater. Adaptado de (PUB Singapore´s National Water Agency, s.f.) y (WHO, 2017)

Planta	Proceso	Descripción
Planta de recuperación de agua	Clarificación primaria Tratamiento secundario (proceso de lodos activados y clarificación final)	Reducción de sólidos en suspensión, contenido biológico, sustancias orgánicas, etc.
Planta NEWater	Microfiltración/ Ultrafiltración	El agua recuperada pasa a través de membranas para eliminación de sólidos en suspensión, material coloidal, bacterias, quistes protozoarios.
	Ósmosis inversa	Se utiliza una membrana semipermeable. La membrana semipermeable tiene poros muy pequeños que solo permiten el paso de moléculas muy pequeñas, como las moléculas de agua. Eliminación de virus, sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas.
	Desinfección ultravioleta	Este proceso actúa como una medida de seguridad adicional para garantizar la pureza de NEWater, al inactivar microorganismos (bacterias y virus) en el improbable caso de que se rompa la integridad de la membrana de ósmosis inversa.

Para la protección de la salud pública, el agua obtenida del proceso se analiza semanalmente en los puntos críticos de control, algunos parámetros de interés se muestran en la Tabla 50.

Tabla 50. Ejemplos de parámetros clave de monitoreo de la calidad del agua del NEWater
Fuente:. (University of New South Wales, 2014)

Categoría de calidad del agua	Parámetro
Parámetros físicos	Turbidez, color, conductividad, pH, dureza total.
Compuestos químicos	Fluoruro, nitrato, sulfato, trihalometanos totales.
Metales	Aluminio, fierro, manganeso, zinc.
Indicadores bacteriológicos	Coliformes totales, enterovirus, recuento heterotrófico en placas.

3.4.4 Clayton County, E.U.

El condado de Clayton se encuentra en la parte sur del área metropolitana de Atlanta (Thomas, 2005) se encuentra en la parte superior de la cuenca del río Flint (que desemboca en el Golfo de México) y la cuenca del río Ocmulgee (que desemboca en el Océano Atlántico). Los recursos hídricos disponibles en el condado son limitados llevando a la administración y la junta directiva de Clayton County Water Authority (CCWA) a implementar enfoques innovadores para la gestión del agua desde fines de la década de 1950. En la **década de 1970, CCWA seleccionó un sistema de riego por aspersión con aplicación al suelo (Land Application System, LAS) como sistema principal de tratamiento de aguas residuales** (Clayton County Water Authority, 2017). El tratamiento de aguas residuales mediante riego

por aspersión debe ser diseñado y operado de manera que no haya descargas directas a las aguas superficiales. Las aguas residuales irrigadas se evaporan y transpiran a la atmósfera o ingresan al agua subterránea a través de la percolación. Los contaminantes orgánicos en las aguas residuales son estabilizados por las bacterias del suelo. El nitrógeno orgánico y el amoníaco son absorbidos por las plantas, nitrificados por las bacterias del suelo, a través de la desnitrificación se integran a la atmósfera y una cantidad mínima se filtran a las aguas subterráneas. El fósforo y otros contaminantes son adsorbidos en el perfil del suelo y absorbidos por las plantas. Los sistemas de tratamiento de suelos correctamente diseñados y operados producen un agua filtrada de alta calidad y, por lo tanto, protegen los recursos hídricos subterráneos y superficiales (Department of Natural Resources of Georgia, 2010).

La tecnología de humedales construidos fue atractiva para CCWA por varias razones, incluido el hecho de que se habían basado en sistemas naturales para el tratamiento y recuperación de aguas residuales mediante la utilización de riego por aspersión con aplicación al suelo (LAS) durante más de 20 años. El LAS Huie recibía efluentes secundarios (854 L/s) que posteriormente se regaban por aspersión en 1,052 hectáreas de tierras boscosas. El sitio tenía 483 kilómetros de tubería de distribución y aproximadamente 18,000 rociadores, lo que hace que el mantenimiento del sistema sea con un costo mayor. Este sitio forma la cuenca del embalse Blalock del CCWA y se encuentra en la cabecera de la cuenca del embalse Hooper. El LAS Huie se estaba acercando a su capacidad de diseño y cuando se consideraron las alternativas de expansión, la disponibilidad limitada y el costo de terrenos boscosos adicionales hicieron que la expansión de LAS fuera inviable (Thomas, 2002).

CCWA operó LAS durante casi 30 años. Durante la última década con el desarrollo del Plan Maestro 2000 (Clayton County Water Authority, 2017), el enfoque del Plan Maestro 2000 para la recuperación de agua creó la oportunidad de aumentar el reúso potable indirecto. Esta es una alternativa especialmente valiosa debido a la probabilidad de que sea muy difícil obtener futuros aumentos en las extracciones de agua. El enfoque de CCWA para evaluar y desarrollar un plan para la reutilización potable indirecta incluyó los siguientes pasos (Thomas, 2005):

1) Identificar tecnologías apropiadas de recuperación de agua para el reúso potable indirecto.
2) Revisión de planes por expertos independientes de la industria y agencias reguladoras.
3) Mejorar las instalaciones de tratamiento de agua potable.
4) Desarrollar planes para proteger los suministros de agua cruda existentes a través de la protección de cuencas hidrográficas.
5) Desarrollar e implementar programas apropiados de monitoreo de la calidad del agua.
6) Desarrollar e implementar relaciones públicas y programas educativos.

LAS se convirtieron en una serie de humedales y la planta de tratamiento existente se actualizó a una planta de tratamiento biológico avanzado (Environmental Protection Agency, 2017). Los humedales consisten en una serie de estanques poco profundos interconectados con vegetación nativa. Las celdas siguen la topografía del sitio para permitir que el agua fluya pasivamente por gravedad a través de los humedales. Aunque se espera que una parte del agua de los humedales se infiltre en el suministro de agua subterránea, la gran mayoría fluye hacia dos de los embalses de suministro de agua de CCWA, Shoal Creek y Blalock (figura 3.5). El agua suele tardar 2 años en condiciones normales en filtrarse a través de humedales y embalses antes de ser reutilizada; el tiempo de retención es inferior a un año en condiciones de sequía (Environmental Protection Agency, 2012).

Los humedales construidos ofrecen un sistema de tratamiento natural que requería menos tierra y costos de operación y mantenimiento menores. Requiere aproximadamente 40.45

hectáreas de tierra para regar por aspersión 43.81 L/s de aguas residuales tratadas, mientras que los humedales artificiales de flujo superficial pueden tratar 43.81 L/s en 6.07 a 10.12 hectáreas de tierra dependiendo de la calidad deseada del efluente (Thomas, 2005).

En la Tabla 51, se describen las características de los humedales para el sistema de Clayton.

Tabla 51. Humedales del sistema CCWA. Modificado de Environmental Protection Agency (2012).

Humedales	Descripción	Año	Área (ha)	Capacidad (L/s)	Capacidad total (L/s)
The Panhandle Road	Tres trenes de tratamiento de celdas múltiples, en paralelo	2002	21.45	192.78	192.78
E.L. Huie[1]	Consiste en nueve trenes de tratamiento de celdas múltiples en paralelo	2005	21.85	153.34	762.34
		2006	16.19	113.91	
		2007	19.02	140.20	
		2010	49.74	354.88	

[1] El humedal fue construido en 4 fases, los años indican cada fase.

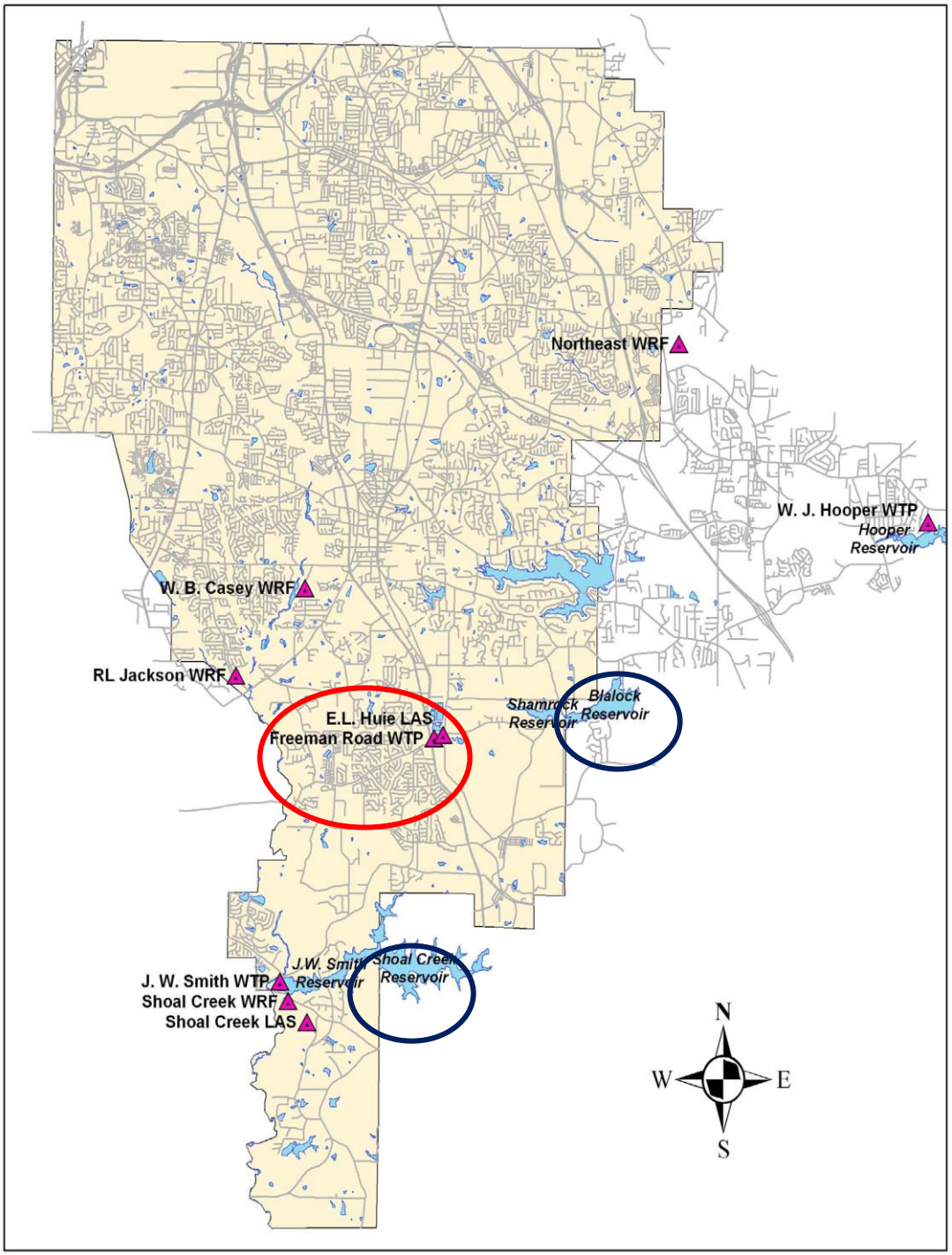


Figura 88. Ubicación del sistema LAS Huie (posteriormente se convirtió en humedales) y los embalses Shoal Creek y Blalock que reciben el agua tratada por los humedales. Modificado de (Thomas, 2002).

Ambos sistemas de humedales pulen los efluentes altamente tratados de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales primarias y secundarias que incluyen la eliminación de nutrientes seguida de desinfección. Estos procesos de tratamiento brindan un enfoque de barrera múltiple para la recuperación de agua y mejoran la eliminación de nutrientes, contaminantes microbianos y otros compuestos orgánicos traza, proporcionando un

suministro de agua seguro. Además, los humedales artificiales amortiguan los embalses en el improbable caso de que se rompa una planta de tratamiento (Environmental Protection Agency, 2012).

La EPA en coordinación con el Departamento de Recursos Naturales de Georgia establecieron concentraciones máximas de descarga para los humedales de E.L. Huie, los cuales se muestran en la Tabla 52.

Tabla 52. Estándares de calidad del agua tratada por E.L. Huie. Modificado de (Austin & Yu, 2016).

Parámetro	NPDES[1] Límite mg/l Promedio mensual-semanal	Valores Promedio del año 2011 mg/l
DBO_5	10-15	3
SST	30-45	5
$N\text{-}NH_4$	1.4-2.1	0.06
PT[2]	0.6	0.24

[1] National Pollutant Discharge Elimination System
[2] Promedio anual descarga al lago

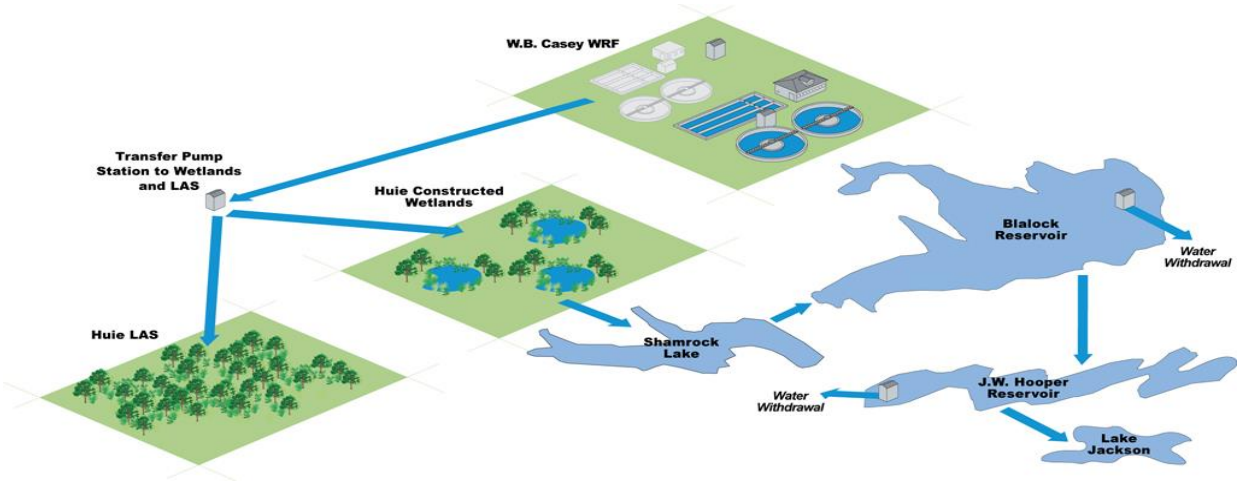


Figura 89. Esquema de humedales E.L. Huie. Fuente: (American Academy of Environmental Engineers&Scientists, 2011)

Con la finalización de la fase más grande de humedales construidos en el otoño de 2010, CCWA puede reciclar hasta el 65% del agua de uso diario en sus embalses. Durante la segunda peor sequía registrada en Georgia, este sistema mantuvo reservas de agua al 77 por ciento de su capacidad. CCWA también ha documentado reducciones en microcontaminantes como productos farmacéuticos, hormonas y pesticidas.

- Los humedales artificiales fueron la opción adecuada para CCWA porque anteriormente usaban un sistema de tratamiento y recuperación de aguas residuales mediante riego por aspersión con aplicación al suelo, ambas tecnologías basadas en sistemas naturales de tratamiento para aguas residuales, lo cual era una tendencia para CCWA.

- **Tiempo de retención** para reutilizar el agua tratada por humedales artificiales en el caso de Clayton en condiciones **normales es de 2 años y de 1 año en sequías**.

- El agua tratada en el humedal artificial de E.L. Huie fluye hacia dos de los embalses de suministro de agua de CCWA, Shoal Creek y Blalock. Si observamos en el mapa la ubicación del humedal artificial con respecto a los embalses tiene una distancia considerable, podemos concluir que hay un factor de dilución, así como un tiempo adicional para que el agua tratada por el humedal llegue al reservorio ambiental.

- Los humedales de flujo superficial libre requieren áreas de tierra bastante grandes, pero logran efluentes secundarios de calidad. La celda de tratamiento inicial debe estar cercada y aislada del público.

Para los esquemas de RPI, la selección de procesos de tratamiento está recomendada en las normativas internacionales, siendo procesos avanzados que garanticen la calidad del agua para la población. Algunos esquemas de RPI como en el caso de Clayton incorporan sistemas de tratamiento naturales como los humedales construidos, sin embargo, esta selección está justificada como se mencionó anteriormente.
Los sistemas de humedales son ecosistemas vivos en los cuales los ciclos de vida y muerte de la biota produce residuos que pueden ser medidos en función de DBO, SST, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales. Como resultado, y en forma independiente del tamaño del humedal o las características del influente, en estos sistemas siempre existen concentraciones naturales de esos materiales. La Tabla 53 resume esas concentraciones naturales en humedales de flujo subsuperficial (Environmental Protection Agency, 2000).

Tabla 53. Concentraciones “naturales” en humedales de flujo subsuperficial. Fuente: (Environmental Protection Agency, 2000).

Contaminante	Rango de concentración
DBO_5 (mg/l)	1 a 10
SST (mg/l)	1 a 6
Nitrógeno total (mg/l)	1 a 3
Nitrógeno como NH_3/NH_4 (mg/l)	Menos de 0.1
Nitrógeno como NO_3 (mg/l)	Menos de 0.1
Fósforo total (mg/l)	Menos de 0.2
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	50-500

Los humedales construidos han demostrado una buena idoneidad para la remoción de contaminantes emergentes, ya que pueden transformar a muchos de los contaminantes en subproductos inofensivos o nutrientes esenciales. Sin embargo, la eficiencia de remoción de contaminantes emergentes puede afectarse por el régimen de caudal, TRH, variaciones estacionales y tipo de vegetación. La transformación de los contaminantes específicos implica diferentes mecanismos de eliminación, como la biodegradación, la foto degradación, la volatilización, la fotólisis, la absorción por la planta y la sorción en medios sólidos (Saidulu , Gupta , Kumar Gupta , & Sarathi Ghosal , 2021).
Los humedales se pueden construir en diferentes modos hidrológicos como flujo horizontal (HF) o flujo vertical (VF) y flujo superficial (SF) o flujo subterráneo (SSF). El cambio en la configuración de los humedales puede afectar significativamente la eficiencia de remoción

de contaminantes. De la literatura, se ha observado que el ácido salicílico y el 2,4-D se eliminaron de manera efectiva en los humedales artificiales de flujo subterráneo en comparación con los otros tipos. Mientras que, en los compuestos disruptores endócrinos, la mayor remoción se observó para el nonilfenol en los de flujo vertical. Debido a que en la configuración de FV, los medios no saturados promueven mayores tasas de transferencia de oxígeno y mejoran las mayores eficiencias de remoción. Por el contrario, se observaron remociones negativas para compuestos disruptores endócrinos en humedales de flujo horizontal. La razón podría ser la formación de compuestos a partir de la biodegradación de etoxilatos de nonilfenol precursores.

La eficiencia de remoción para contaminantes emergentes está en función de los parámetros de diseño de los HC (Tabla 54) Por ejemplo, el tamaño de los humedales de flujo superficial es determinado por el contaminante de interés, el cual requiere la mayor área para su remoción. Esta es la superficie del fondo de las celdas del humedal, y para que sea efectiva, la distribución del flujo de agua residual debe ser uniforme en toda la superficie. Esto es posible con un gradiente de fondo cuidadosamente seleccionado y el uso de estructuras apropiadas de entrada y descarga (Environmental Protection Agency, 2000).

Tabla 54. Eficiencia de remoción de contaminantes emergentes en humedales construidos a escala. Modificado de (Boshir Ahmed, y otros, 2017).

Contaminante emergente	Flujo horizontal		Flujo vertical		Flujo subsuperficial /superficial	
	Influente (µg/l)	% Remoción	Influente (µg/l)	% Remoción	Influente (µg/l)	% Remoción
Bisfenol A	1.8	89	4.06	47.78	-	-
Mecoprop	-	-	-	-	0.04-2.89	79-91
Ácido 2-metil-4-clorofenoxiacético (MCPA)	-	-	-	-	0.04-2.89	79-83
Terbutilazina	-	-	-	-	0.04-2.89	1-80
Triclosán	-	-	0.05	66.67	-	-
Galoxilina	-	-	-	-	0.04-2.89	85-88
Ácido hidrocinámico	0.09-70.8	95	0.09-70.8	98	-	-
Dihidrojasmonato de metilo	0.09-70.8	99	0.09-70.8	99	-	-
Ácido salicílico	0.09-70.8	95	0.09-70.8	87	-	-
Oxibenzona	0.09-70.8	98	0.09-70.8	90	-	-
Tonalida	3.0	91	0.54	5.56	0.04-2.86	88-90
Paracetamol	35	99	-	-	-	-
Carbamazepina	0.09-70.8	38	-	-	0.04-2.86	30-47
Diclofenaco	2.5	72.50	0.77	35.06	0.04-2.86	73-96
Ibuprofeno	75	83.3	0.09-70.8	89	0.04-2.86	95

Naproxeno	0.09-70.8	45	0.09-70.8	92	0.04-2.86	52-92
Ketoprofeno	0.09-70.8	90	-	-	0.04-2.86	97-99
Flunixina	-	-	-	-	0.04-2.86	0-64
Ácido clofíbrico	-	-	-	-	0.04-2.86	32-36
Furosemida	0.09-70.8	71	-	-	-	-
Cafeína	0.09-70.8	97	0.09-70.8	99	-	-

El TRH es uno de los principales parámetros de diseño que influyen en el tamaño de la unidad y la eficiencia de remoción. Los investigadores han encontrado que el rango óptimo de TRH para la remoción eficiente de contaminantes en el sistema humedales construidos está en el rango de **2 a 5 días**. Hijosa-Valsero et al. informaron la remoción de contaminantes emergentes seleccionados con diferentes TRH (2 a 6.1 días) y encontraron que el ibuprofeno, el naproxeno y el ácido salicílico se eliminaron de manera efectiva cuando la TRH es igual a 5.1 días. Sin embargo, con el mismo TRH, **la remoción de diclofenaco no fue significativa debido a su naturaleza recalcitrante**. Mientras que la eficiencia de eliminación de estrona-1 aumentó significativamente (40–84,3 %), con un aumento en la TRH de 27.5 h a 137.5 h. Zhang et al. estudiaron la eliminación de compuestos farmacéuticos en diferentes TRH que oscilaron entre 1 y 8.5 días y observaron que el ibuprofeno y el naproxeno mostraban una correlación casi lineal con la TRH. Por el contrario, el ácido salicílico no se correlacionó significativamente con el TRH (Saidulu , Gupta , Kumar Gupta , & Sarathi Ghosal , 2021).La variación estacional es el aspecto principal en los humedales construidos que influye en la foto degradación y las actividades microbianas. De la literatura, se ha encontrado que el rendimiento de los HC está muy influenciado por la variación de temperatura. Hijosa-Valsero et al. han observado mayores eficiencias de remoción de ibuprofeno, diclofenaco y naproxeno en climas cálidos. Por el contrario, pocos autores no encontraron un efecto significativo de las variaciones estacionales en la eliminación de contaminantes emergentes a escala de campo. Los autores también explicaron que los mecanismos de absorción de la planta y sorción de la rizosfera no son sensibles a las variaciones de temperatura. Los macrófitos que se utilizan en los HC tienen propiedades únicas en relación con el proceso de tratamiento que los convierte en un componente esencial en el diseño. Los diferentes tipos de vegetación tienen diferentes eficiencias de eliminación dependiendo de su capacidad de absorción y acumulación de plantas. Las raíces de las plantas tienen más influencia en la acumulación de materia orgánica y la capacidad de sorción. Varios estudios han demostrado la remoción de contaminantes emergentes utilizando diferentes macrófitos, que concluyeron que la selección de especies de macrófitos es uno de los factores rectores para la eliminación efectiva de contaminantes específicos en HC. Según Matamoros et al. y Ávila et al, Phragmites australis eliminó eficazmente los compuestos farmacéuticos, como ibuprofeno, naproxeno y diclofenaco, en comparación con Typha angustifolia. Un tipo similar de resultados también fue informado por Hijosa-Valsero et al., pero en este proceso se adoptó un TRH más alto que Liu et al., quienes probaron la concentración de triclosán en las raíces de diferentes plantas acuáticas, como la Lemna minor flotante, el antoceros sumergido y la totora emergente, y observaron concentraciones más altas en la Lemna minor flotante (Saidulu , Gupta , Kumar Gupta , & Sarathi Ghosal , 2021).

3.5 Situación nacional en cuanto a reúso potable de agua

A la fecha, se cuenta con propuestas de proyectos que consideran el reúso potable indirecto, entre ellos:

- Proyecto sustentable para incrementar la oferta de agua potable al Valle de México. Macro plantas de Toluca – Presa Villa Victoria.
  La propuesta consiste en tratar el agua de las macroplantas de Toluca a nivel terciario, conducirla a la presa Villa Victoria, potabilizarla e incorporarla al Sistema Cutzamala.
- Proyecto de la PTAR Centro, Guanajuato, para asegurar la disponibilidad del agua para la ciudad de Guanajuato.
  La propuesta considera la implementación de un postratamiento del efluente secundario de la PTAR Centro, bombear el agua a la presa “la Soledad” y potabilizar el agua.
- PTAR Cadereyta y PTAR Dulces Nombres, Monterrey, Nuevo León.
  La propuesta considera enviar el agua residual tratada de la PTAR Cadereyta y PTAR Dulces Nombres (ambas con proceso terciario) al río Santa Catarina, extraerla del subálveo y conducirla la Planta Potabilizadora de San Roque, para posteriormente incorporación a la red de distribución.
- PTAR Las Joyas y El Avelín, León, Gto.
- Estudio de factibilidad del uso indirecto de agua residual tratada con fines de potabilización en la Presa el Palote.

Por otra parte, en México de manera no planificada se práctica el reúso indirecto de agua residual ya que existen ríos que reciben descargas de agua residual sin tratar y que a la vez sirven de fuente de abastecimiento de una planta potabilizadora.

3.6 Medición de la calidad en los cuerpos de agua

La disponibilidad del agua, es solo una de las aristas más importantes de la problemática del agua tanto en México como en el mundo (SEMARNAT, 2018). El agua, al ser utilizada, incorpora diversas sustancias en forma suspendida, coloidal o disuelta que contaminan y degradan su calidad o pureza original. Un agua contaminada necesariamente tendrá restricciones en cuanto a sus posibles usos y podrá provocar cambios importantes en el equilibrio ecológico del cuerpo receptor, además de daños a la salud (Noyola, 2016).

La calidad del líquido, es decir, agua libre de contaminantes que pueda consumirse sin riesgos para la salud y además ser útil para las actividades económicas, es el otro tema de gran relevancia. Tener agua de calidad no solo significa contar con ella para los distintos usos consuntivos, sino también mantenerla libre de contaminantes en los cuerpos de agua del país de tal manera que permita la continuidad de los procesos biológicos de los ecosistemas y la preservación de su biodiversidad (SEMARNAT, 2018).

Una de las actividades más importantes para la gestión del recurso hídrico es el monitoreo periódico de los cuerpos de agua. Esta actividad permite la detección temprana de cambios en la calidad del recurso (Castro, Almeida, Ferrer, & Díaz, 2014). La calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado; por ejemplo: el consumo humano o el ambiente, y en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos. El deterioro de la calidad del agua ocurre por procesos naturales o antropogénicos (CONAGUA, 2018).

Por ejemplo, los cambios en la calidad de las aguas superficiales son consecuencia tanto de factores naturales (precipitaciones, clima, fisiografía de la cuenca, erosión del suelo, etc.), como antropogénicos (la urbanización, actividades industriales y agrícolas). Los cuerpos de agua superficiales son los ríos, lagos y presas. Estos cuerpos aportan cerca de 30% del total de agua para consumo humano (uso municipal). Por su característica de estar expuestos, y en especial por el modo en que se ha concebido la disposición de desechos líquidos y sólidos -que consiste en descargar el agua residual y la basura en ellos-, estos cuerpos son altamente propensos a sufrir problemas de contaminación (CONAGUA, 2010).

Las aguas superficiales no son las únicas afectadas por la contaminación. Los acuíferos también se contaminan por las descargas de contaminantes y la sobreexplotación. Estas descargas pueden ocurrir no sólo por el vertido de aguas residuales al suelo o directamente en los mantos freáticos, sino también por fuentes difusas, como son los lixiviados provenientes de los numerosos basureros lícitos mal diseñados o clandestinos a lo largo del país. Así como por las fugas de aguas residuales domésticas e industriales que existen en los sistemas de drenaje como por el mal manejo. A ellas debemos añadir las aguas contaminadas con fertilizantes y plaguicidas que se infiltran al subsuelo directamente desde los campos agrícolas. En cuanto a los problemas de calidad del agua producidos por la sobreexplotación, el más estudiado es sin duda el de la intrusión salina, lo que ocurre por la introducción del agua de mar en acuíferos costeros o por el lavado de suelos salinos en zonas áridas y semiáridas (CONAGUA, 2010).

La relevancia del concepto de calidad del agua queda manifiesta si consideramos que la cantidad de agua en nuestro planeta es constante, pero su calidad es muy variable, y puede

verse seriamente deteriorada por la actividad humana. De manera que la disponibilidad de agua actual y futura depende no solo del manejo adecuado en términos de cantidad (volúmenes de extracción y recarga), sino también del cuidado que se dé a la calidad del agua. Por tanto, la seguridad hídrica, la salud de los ecosistemas y la sostenibilidad de todas las formas de vida que hay en nuestro planeta, incluidos los seres humanos, dependerán del cuidado que le demos al agua que tenemos disponible en nuestras fuentes superficiales y subterráneas, así como en nuestros mares y océanos (Prince Flores & Espinosa Bouchot, 2021).

Para la valoración y evaluación de la calidad del agua, se han empleado diversas metodologías entre las que se incluyen: comparación de las variables con la normatividad vigente; los indicadores ICA (Índice de la Calidad del Agua) donde, a partir de un grupo de variables medidas, se genera un valor que califica y cualifica la fuente, y metodologías más elaboradas como la modelación. La calidad del agua se mide de acuerdo con distintos parámetros mediante los cuales se cuantifica el grado de alteración de las cualidades naturales y se la clasifica para un uso determinado (Castro, Almeida, Ferrer, & Díaz, 2014).

La Organización de Cooperación de Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés) ha trabajado “en la elaboración y uso de la información ambiental reunida en indicadores ambientales y articulada a aspectos económicos y sociales”. De acuerdo con la OECD, los indicadores ambientales tienen dos funciones principales:

1. Reducen el número de mediciones y los parámetros que normalmente se requieran para hacer una representación exacta de una situación y
2. Simplifican el proceso de comunicación de los resultados de la medición.

La Tabla 55 muestra diferentes metodologías para determinar índices de calidad del agua en diferentes partes del mundo.

Los ICAs del agua pretenden resumir numerosos parámetros físicos, químicos y biológicos del agua en un solo valor (figura 4.1). El ICA presenta una medida de la calidad del agua para una fácil interpretación de los datos de monitoreo para el público en general. En esencia, estimar un ICA implica la transformación de datos de múltiples parámetros de calidad del agua en un solo valor comprensible mediante la aplicación de ecuaciones matemáticas. La población en general, las autoridades competentes del agua, tanto técnicos como no técnicos, y los responsables de la toma de decisiones políticas pueden comprender fácilmente los niveles de calidad del agua cuando el ICA indica la calificación de un valor que va de muy malo a excelente. El ICA también se utiliza ampliamente en la gestión de datos de agua y para calificar la eficacia de las estrategias de gestión para mejorar la calidad del agua (Abba, y otros, 2022).

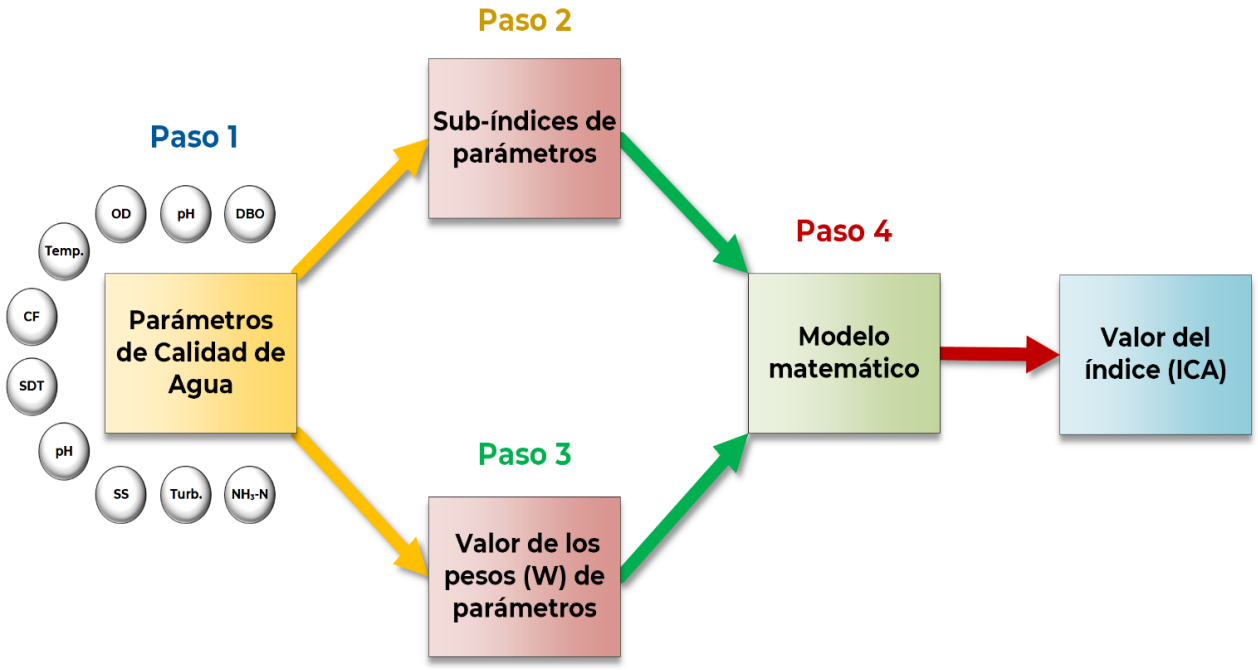


Figura 90. Estructura general de modelo de ICA. Modificado de (Uddin, Nash, & I. Olbert, 2021).

Tabla 55**.** Metodologías para determinación de índices de calidad del agua. Modificada de (Uddin, Nash, & I. Olbert, 2021) y (Castro, Almeida, Ferrer, & Díaz, 2014).

Modelo de ICA	Componentes del modelo			
	N° de parámetros y proceso de selección	**Ponderación de parámetros**	**Escala de valoración**	**Comentarios**
Índice de Horton [a] (1960)	8 parámetros sugeridos Importancia de los parámetros y disponibilidad de datos	Sistema fijo (4 para OD y 1 para otros parámetros) sugerido	Cinco categorías - Muy bueno (91–100) - Bueno (71–90) - Pobre (51–70) - Malo (31–50) - Muy malo (0–30)	El objetivo del índice es revelar los cambios físicos y químicos ocurridos a nivel de la calidad de las corrientes de agua.
Índice NSF [b] (1965) (National Sanitation Foundation, E.U.)	11 parámetros Método Delphi	A juicio del panel de expertos, y la suma del valor del peso es igual a 1, mayor peso a OD y coliformes.	Cinco categorías - excelente (90–100) - bueno (70–89) - medio (50–69) - malo (25–49) - muy malo (0–24)	La NSF cita: "La clasificación consideró las características que debe presentar la fuente de captación para su destino en consumo humano"
Índice SRDD [c] (1970) Scottish Research Development Department,	10 parámetros Método Delphi	Basado en panel de expertos y suma de valor de peso igual a 1 recomendado por SRDD	Siete clasificaciones - limpio (90–100) - bueno (80–89) - bueno con tratamiento (70–79) - tolerable (40–69) - contaminado (30–39) - contaminado (20–29) - muy contaminado (0–19)	El Bascaron Index (1979), House Index (1986) y Dalmatian Index son derivados posteriores del Índice SRDD.
Índice de Ross [d] (1977)	4 parámetros de calidad del agua Método Delphi	Basado en expertos y la suma del valor de peso es igual a 1	No especificado	SS, OD, DBO y NH_3-N
Índice EQ [e] (1982)	9 parámetros Método Delphi	Para físicos, químicos y parámetros biológicos valor 0.1 Para parámetros orgánicos e inorgánicos valor 0.15	Cinco categorías - excelente (90–100) - muy bueno (80–89) - bueno (70–79) - regular (55–69) - pobre (<55)	Color, SS, Cl^-, CF, PT, Cd, Cu, Hg, Pb.
Índice House [f] (1986) Versión del índice SRDD	9 parámetros Entrevista con el personal clave Juicio del panel de expertos	Juicio del panel de expertos, y la suma del valor del peso es igual a 1	Cuatro categorías - alta calidad (71–100) - calidad razonable (51–70) - calidad moderada (31–50) - contaminado (10–30)	Temperatura, SS, OD, DBO, pH, Cl^-, NH_3-N, CT, SO_4.
Índice British Columbia [g] (1995)	Sistema de elección abierta Mínimo 10 parámetros	Basado en expertos, desigual	Cinco clases - excelente (0–3) - bueno (4–17) - regular (18–43) - límite (44–59) - pobre (60–100)	
Índice Dalmatian [h]	8 parámetros	Peso fijo y desigual fijado por	No especificada	Versión modificada del índice

(1999)	Método Delphi	panel de expertos		SRDD
Índice Liou [i] (2004)	13 parámetros Los parámetros fueron seleccionados de acuerdo a la importancia ambiental y de salud	Sistema de ponderación igual Los factores de ponderación se generaron mediante el uso de curvas de calificación que se ilustraron con base en la guía estándar de las variables de calidad del agua	No especificada	Temperatura, turbiedad, ST, pH, OD, DBO, NH_3-N, CF, Cd, Zn, Cu, Pb, Cr.
Índice de Malasia [j] (2007)	6 parámetros	Sistema desigual Basado en expertos La suma del peso es 1	Escala de calificación individual basada en parámetros utilizados	SS, pH, OD, DBO, DQO, NH_3-N
Índice Hanh [k] (2010)	8 parámetros Basado en la disponibilidad de datos de monitoreo	Estándares vietnamitas de calidad de agua superficial	Cinco clasificaciones - excelente (91–100) - bueno (76–90) - normal (51–75) - marginal (26–50) - pobre (<25)	Turbiedad, SS, OD, DBO, DQO, NH_3-N, CT, ortofosfatos
Índice Almeida [l] (2012)	10 parámetros Método Delphi	Factores de ponderación fijados por panel de expertos La suma del valor del peso es 1	Cuatro categorías - Excelente (91–100) - bueno (81–90) - medio (71–80) - pobre (<70)	Turbiedad, pH, DQO, CF, CT, enterococos

[a] Enfoque basado en América del Norte
[b] Dominio de aplicación en E.U.
[c] Agua superficial, Escocia
[d] Evaluación general de la calidad del agua
[e] La zona costera de los Grandes Lagos, América del Norte
[f] Directivas comunitarias europeas de fines de usos específicos
[g] Cuerpos de agua superficial
[h] Ríos, sur de Croacia
[i] Río Keya, Taiwán
[j] Río en Malasia
[k] Agua superficial en Vietnam
[l] Río Potrero de los Funes, Argentina

SS: sólidos suspendidos
ST: sólidos totales
OD: oxígeno disuelto
DBO: demanda bioquímica de oxígeno
CF: coliformes fecales
PT: fósforo total
CT: coliformes totales
SO_4: sulfatos totales
DQO: demanda química de oxígeno

En la Tabla 55, varios de los modelos de ICA emplean el método Delphi para definir los parámetros a considerar en el modelo. El método Delphi consiste en una técnica de obtención de información, basada en la consulta a expertos de un área, con el fin de obtener la opinión de consenso más fiable del grupo consultado (figura 4.2). Estos expertos son sometidos individualmente a una serie de entrevistas y/o encuestas que se intercalan con retroalimentación de lo expresado por el grupo y que, partiendo de una exploración abierta, tras las sucesivas devoluciones, producen una opinión que representa al grupo. Esta técnica, de carácter cualitativo, es recomendable cuando no se dispone de información suficiente para la toma de decisiones o es necesario, para nuestra investigación, recoger opiniones consensuadas y representativas de un colectivo de individuos (Reguant-Álvarez & Torrado-Fonseca , 2016).

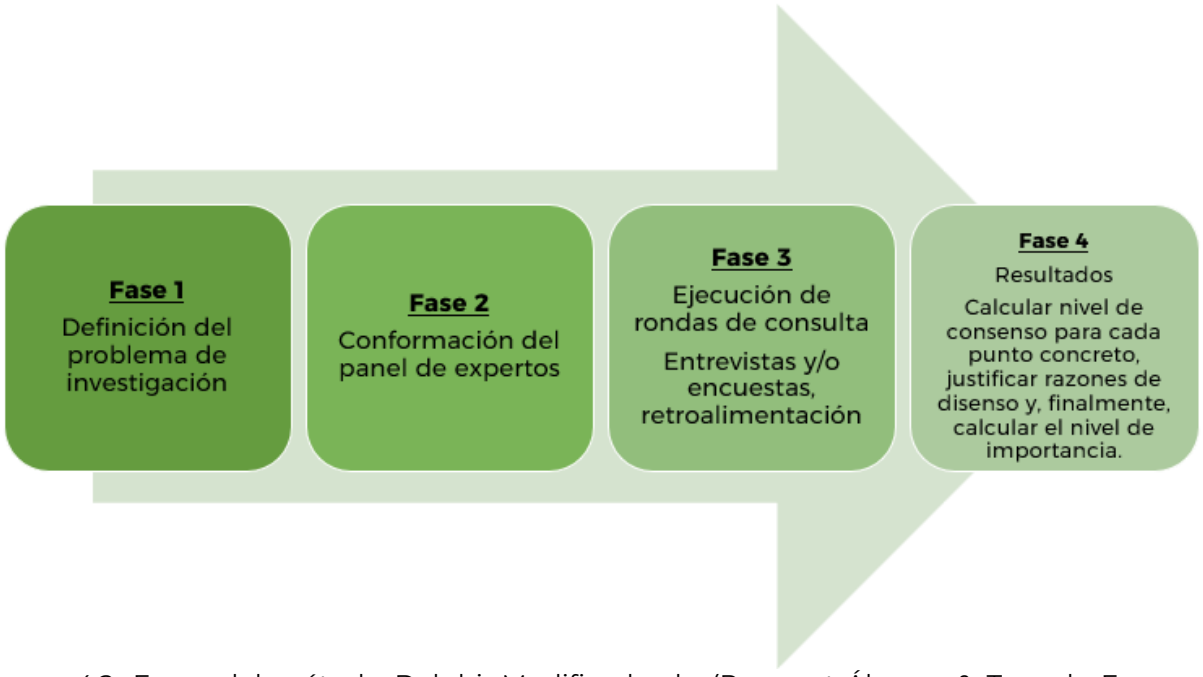


Figura 4.2. Fases del método Delphi. Modificado de (Reguant-Álvarez & Torrado-Fonseca , 2016).

En general, no existen reglas o pautas específicas para seleccionar el parámetro de calidad del agua para su inclusión en el modelo del ICA. El modelo ICA tradicional no sigue ninguna técnica sistemática para establecer sus parámetros. Algunos de los parámetros del modelo ICA generalmente se eligieron en función de algunos problemas comunes de calidad del agua, como la disponibilidad de oxígeno, eutrofización, consideraciones de salud, fenómenos físicos y químicos y componentes disueltos. Incluso para varios modelos nuevos de ICA se encontró que solo aplicaban criterios generales (Uddin, Nash, & I. Olbert, 2021).

3.6.1 Medición de la calidad del agua en México

La Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA), de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), mide la calidad de los recursos hídricos en diversos cuerpos de agua superficiales y subterráneos en el país, con énfasis en zonas con alta influencia antropogénica (SEMARNAT, 2018). En 2020, se contaba con 5,034 sitios de monitoreo de la calidad del agua operados por la CONAGUA (CONAGUA, 2021). La Tabla 56 muestran los parámetros monitoreados en agua superficial, así como el número de sitios monitoreados.

Tabla 56**.** Monitoreo de agua superficial en 2020. Modificado de (CONAGUA, 2021).

Agua superficial 3,493 sitios	
Parámetro	**% de cuerpos con calificación excelente**
Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5)	51.5%
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	21.7%
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	51.0%
Coliformes Fecales (CF)	15.4%
Escherichia coli, (E_COLI),	37.6%
Enterococos (ENTEROC)	78.4%
Porcentaje de Saturación de Oxigeno (OD%)	42.4%
Toxicidad (TOX).	93.7 no presentaron toxicidad

A continuación, se presentan dos ejemplos de cuerpos de agua contaminados:

3.6.1.1 Lago de Pátzcuaro

El lago de Pátzcuaro, es uno de los lagos más importantes y emblemáticos del país para efectuar un monitoreo de su calidad del agua. Este lago recibe múltiples descargas de aguas residuales, tratadas y no tratadas, por lo que se seleccionaron las más importantes para su monitoreo y conocer el nivel de cumplimiento de la normatividad mexicana para aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-1996). Las descargas seleccionadas se muestran en la figura 4.3: Janítzio DM-1, Tzintzuntzan DM-2, Pátzcuaro DM-3 y Erongarícuaro DM-4, Río Guani DM-5, Dren Tzurumútaro DM6, Cuchuchucho DM-7, Santa Fe de la Laguna DM-8 y San Jerónimo DM-9 l período de estudio comprendió del 2006 al 2011. El incumplimiento de los parámetros de calidad del agua fijados en la norma respectiva impacta al lago causando problemas, tales como: florecimientos algales, particularmente de cianobacterias, con hasta un 99.30% de su presencia con relación a otros grupos del plancton presentes en el lago. Los florecimientos de cianobacterias causan problemas como: disminución de la transparencia del agua, mal olor, disminución del oxígeno disuelto e incrementan la probabilidad de mortandad de peces. Por otra parte, una alta concentración de nutrientes también ocasiona el crecimiento de ciertas hidrófitas, como: lirio acuático y tule. Como está ampliamente documentado, todos estos cambios se deben a la acelerada eutrofización del lago. Por el alto número de células por mililitro (cel/mL) de cianobacterias y las concentraciones de Microcistina-LR (MC-LR), el agua del lago siempre se mantuvo en una probabilidad de presentar efectos de daño agudo a la salud. En una clasificación de alto a muy alto daño, las estaciones de Quiroga, Espíritu y Pacanda fueron las zonas más afectadas. De estos trabajos se concluye que en general las aguas del lago no son aptas para la recreación o consumo humano (Tomasini Ortiz, Bravo-Inclán, Sánchez Chávez , & Moeller Chávez, 2016).

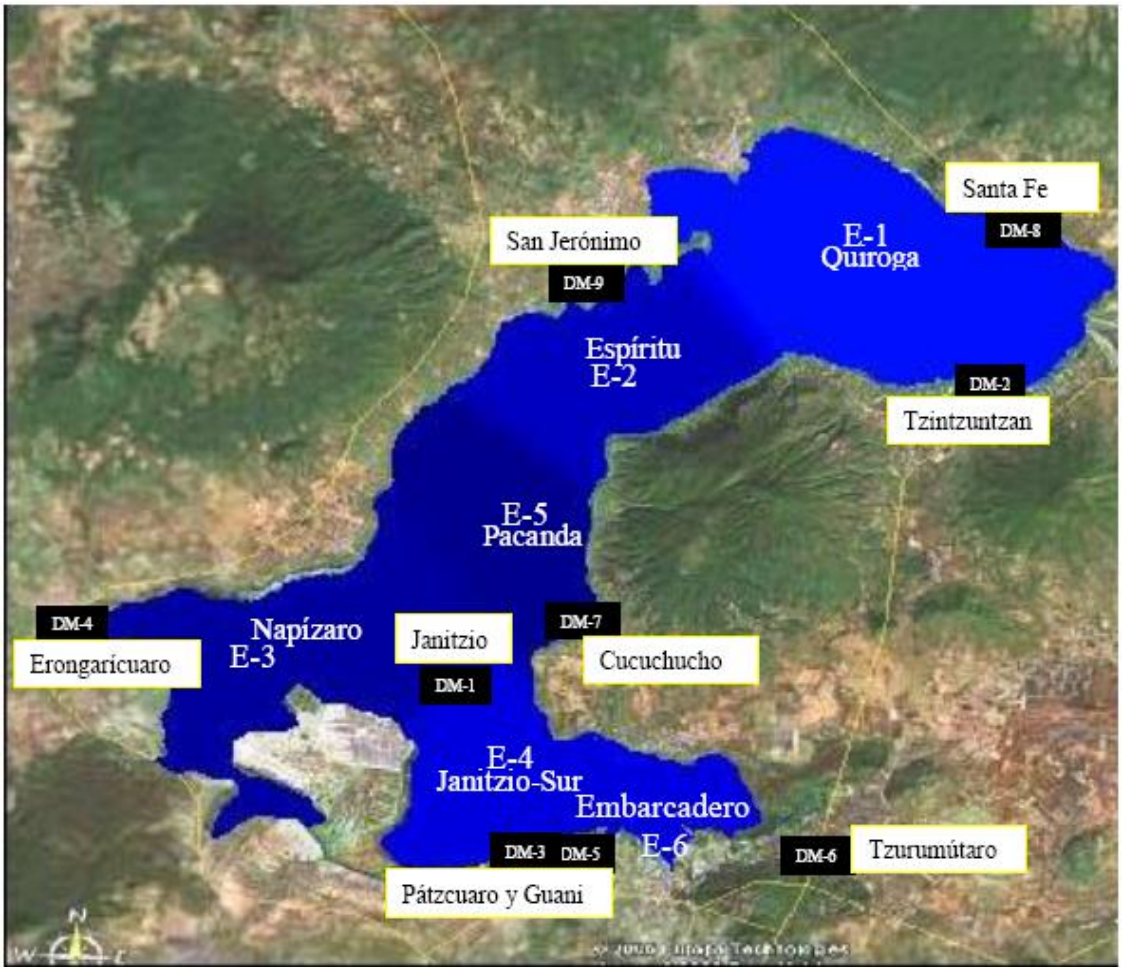


Figura 91. Ubicación de las descargas y las estaciones monitoreadas en el Lago de Pátzcuaro.

3.6.1.2Lago de Chapala

La Ciénega de Chapala es una zona especialmente vulnerable a los procesos de contaminación hídrica, lo que hace necesario evaluar la calidad del agua (Chávez-Alcántar, y otros, 2010).

En 2018 las comunidades indígenas Mezcala de la Asunción y San Pedro Itzican manifiestan problemas de salud, específicamente relacionados con brotes de enfermedades renales, daños cerebrales, cáncer y malformaciones que afectan especialmente a niños, niñas y jóvenes de la región. Se menciona que tal situación puede estar asociada a que consumen agua directamente del lago o de pozos cercanos, así como de fuentes de agua termal que no reciben tratamiento especial. El problema de salud pública es grave, sin embargo, no existen datos oficiales certeros sobre los factores que conllevan la predisposición o que potencian el desarrollo de las enfermedades (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2018).

El diagnóstico de la calidad del agua del Lago de Chapala, considerando los sitios de muestreo de la RENAMECA (figura 4.4) es:

- Se presentan problemas de contaminación microbiológica, en siete sitios el agua resulta moderadamente tóxica para la prueba con V. fischeri.

- Con respecto a los criterios de la norma NOM-127-SSA1-1994 Mod 2000, se observa para algunos de los metales como níquel total, arsénico y mercurio totales, que se han rebasado los valores límites máximos permisibles (LMP) en uno o dos de los muestreos realizados. La frecuencia con que el níquel total, arsénico y mercurio rebasan los LMP, es menor al 10% en la mayoría de los sitios, por lo que esta condición no permite determinar que el agua del lago este afectando la salud de la población que la utiliza como fuente de abastecimiento.

- Para aprovechar el agua como fuente de abastecimiento de agua potable, estas deben ser potabilizadas para su distribución, considerando para ello las condiciones de calidad que presenta el lago y conforme a lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 Mod.2000.

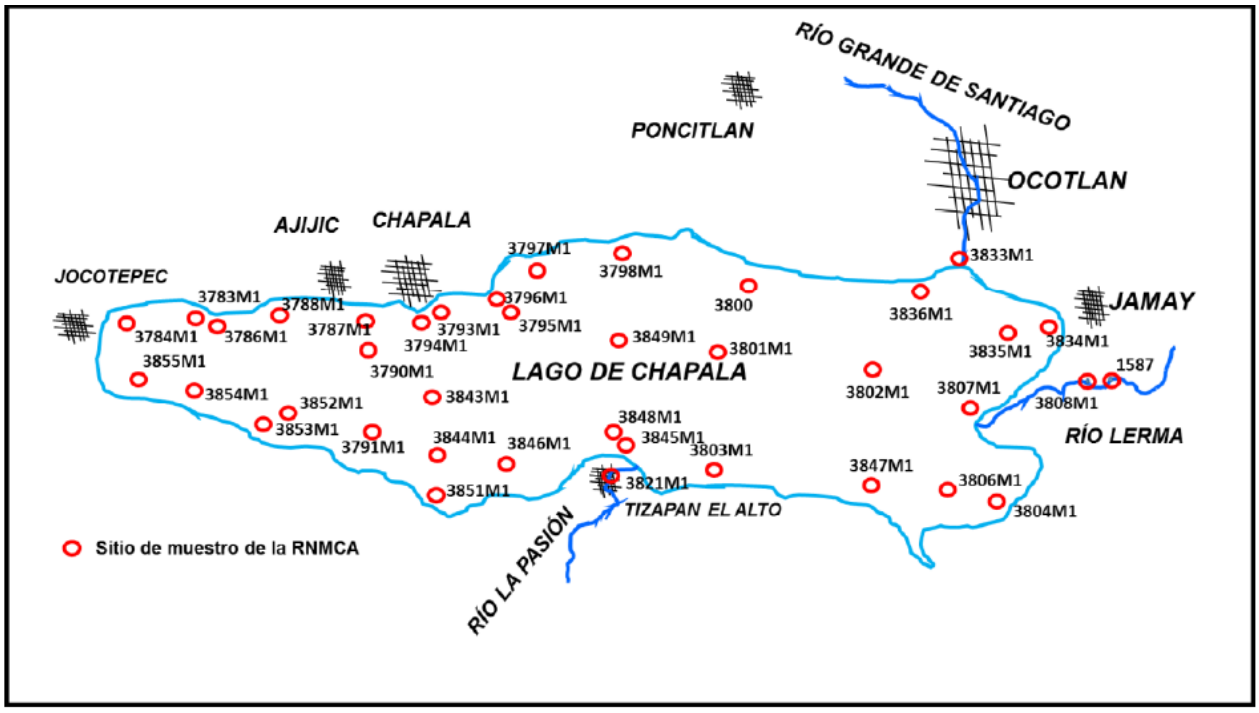


Figura 92. Ubicación de los sitios de muestreo de la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA) en el Lago de Chapala.

3.6.1.2.1 Lago Tláhuac-Xico

De agosto a septiembre de año 2019, se realizó una campaña de muestro por parte de SACMEX, en las diferentes zonas que conforman el lago y a diferentes profundidades (superficiales, 0.5 metros de profundidad y 1.5 metros de profundidad). Se determinaron parámetros de campo, físicos, minerales, sólidos, nutrientes, metales alcalinos y alcalinos térreos, metales pesados, biológicos, materia orgánica, grasas y aceites y detergentes.

De acuerdo con los criterios de la RENAMECA, se utilizan 8 criterios para determinar la calidad del agua de un cuerpo superficial, que son: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Coliformes Fecales (CF), *E. coli*, (E_COLI), Enterococos (ENTEROC), Porcentaje de Saturación de Oxigeno (OD%) y Toxicidad (TX). Sin embargo, para el presente análisis de datos del 2019, , se utilizará laDemanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Fecales (CF)

A continuación en las Tabla 57, Tabla 58, Tabla 59 y Tabla 61, se definen los criterios de cada uno de los indicadores.

Tabla 57. Criterios de calidad del agua de acuerdo al indicador DBO5.

Calidad del agua	Criterio	Descripción
Excelente	DBO_5 menor o igual a 3	Agua no contaminada.
Buena calidad	DBO_5 mayor de 3 y menor o igual a 6	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable.
Aceptable	DBO_5 mayor de 6 y menor o igual a 30	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descarga de aguas residuales tratadas biológicamente.
Contaminada	DBO_5 mayor de 30 y menor o igual a 120	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales cruda, principalmente de origen municipal.
Fuertemente contaminada	DBO_5 mayor de 120	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.

Tabla 58**.** Criterios de calidad del agua de acuerdo con el indicador DQO.

Calidad del agua	Criterio	Descripción
Excelente	DQO menor o igual a 10	Agua no contaminada.
Buena calidad	DQO mayor de 10 y menor o igual a 20	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.
Aceptable	DQO mayor de 20 y menor o igual a 40	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descarga de aguas residuales tratadas biológicamente.

Contaminada	DQO mayor de 40 y menor o igual a 200	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales cruda, principalmente de origen municipal.
Fuertemente contaminada	DQO mayor de 200	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.

Tabla 59**.** Criterios de calidad del agua de acuerdo con el indicador SST.

Calidad del agua	Criterio	Descripción
Excelente	SST menor o igual a 25	Clase de excepción, muy buena calidad.
Buena calidad	SST mayor de 25 y menor o igual a 75	Aguas superficiales con bajo contenido de solidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto.
Aceptable	SST mayor de 75 y menor o igual a 150	Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido.
Contaminada	SST mayor de 150 y menor o igual a 400	Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Agua con alto contenido de material suspendido.
Fuertemente contaminada	SST mayor de 400	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.

Tabla 60**.** Criterios de calidad del agua de acuerdo con el indicador CF.

Calidad del agua	Criterio	Descripción
Excelente	CF menor o igual a 100	Agua no contaminada o condición normal. No hay evidencia de alteración en los valores de la calidad bacteriológica para el cuerpo de agua superficial.

Buena calidad	CF mayor de 100 y menor o igual a 200	Aguas superficiales con calidad satisfactoria para la vida acuática y para el uso recreativo con contacto primario, así como para otros usos. Indicios de alteración de la calidad bacteriológica.
Aceptable	CF mayor de 200 y menor o igual a 1000	Aguas superficiales con calidad admisible como fuente de abastecimiento de agua potable y para riego agrícola. Muestra bajos niveles de alteración como resultado de la actividad humana.
Contaminada	CF mayor de 1000y menor o igual a 10000	Aguas superficiales con contaminación bacteriológica. Indica alteración substancial con respecto a la condición normal.
Fuertemente contaminada	CF mayor de 10000	Aguas superficiales con fuerte contaminación bacteriológica. Alteración severa.

Tabla 61**.** Criterios de calidad del agua de acuerdo al indicador %OD.

Calidad del agua	Criterio		Descripción
Excelente	OD mayor de 70 y menor o igual a 110		Excelente o rica en oxígeno.
Buena calidad	OD mayor de 50 y menor o igual 70	OD mayor a 110 y menor o igual 120	Buena o moderada cantidad de oxígeno.
Aceptable	OD mayor de 30 y menor o igual 50	OD mayor a 120 y menor o igual 130	Aceptable o de moderada deficiencia de oxígeno.
Contaminada	OD mayor de 10 y menor o igual 30	OD mayor a 130 y menor o igual 150	Contaminada o con deficiencia de oxígeno.
Fuertemente contaminada	OD menor o igual a 10	OD mayor de 150	Fuertemente contaminada o anóxica.

En las figuras siguientes, se presentan los resultados obtenidos de la campaña de muestreo.

Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO_5)

En las zonas 1, 2 3 y 4 se presentaron concentraciones promedio de 42 a 74 mg/L., por lo que todas se clasificarían como “contaminadas”

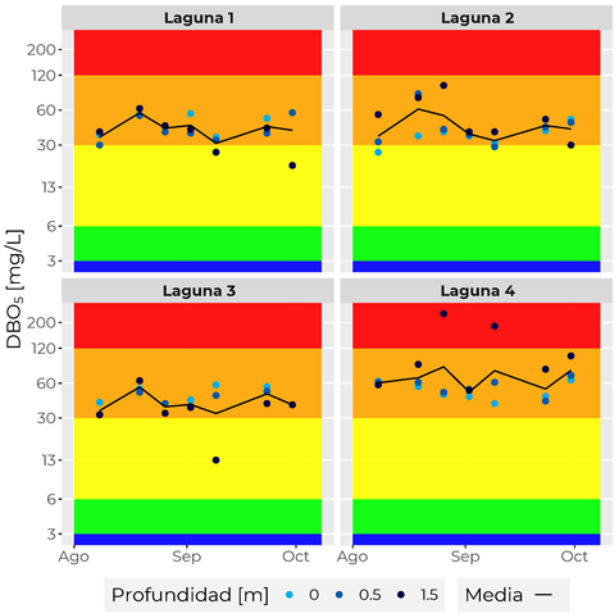


Figura 93. Calidad del agua: DBO5 (mg/L), agosto-septiembre 2019.

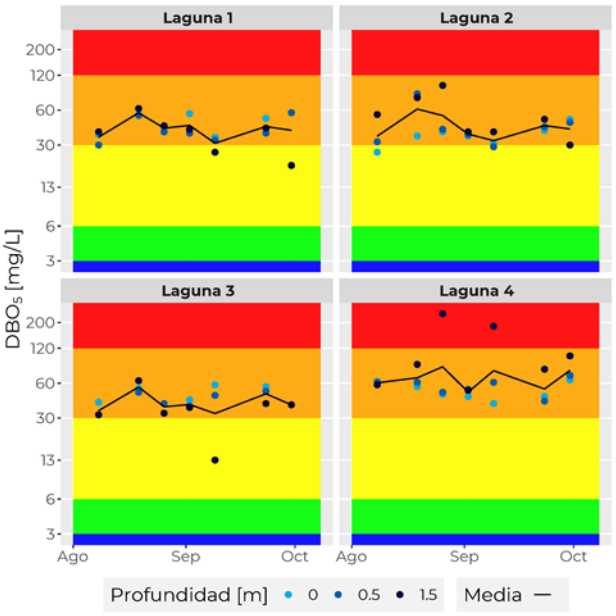


Figura 94.. Calidad del agua: DBO5 (mg/L), agosto-septiembre 2019, promedio.

Demanda Química de Oxigeno

En las zonas 1, 2 3 y 4 se presentaron concentraciones promedio de 575 a 3504 mg/L., por lo que todas se clasificarían como “fuertemente contaminadas”.

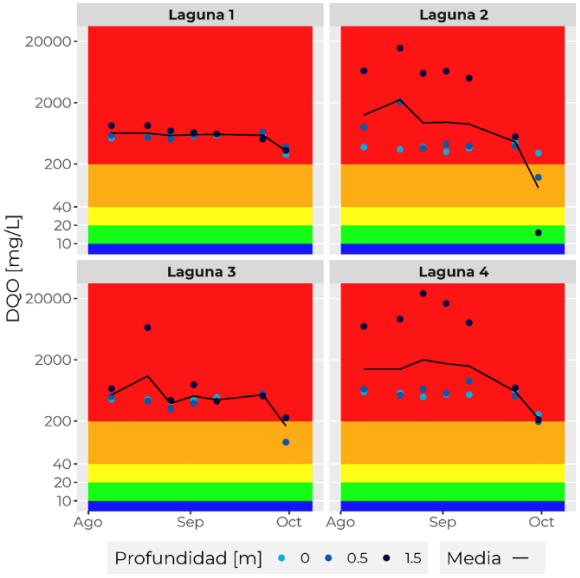


Figura 95. Calidad del agua: DQO (mg/L), agosto-

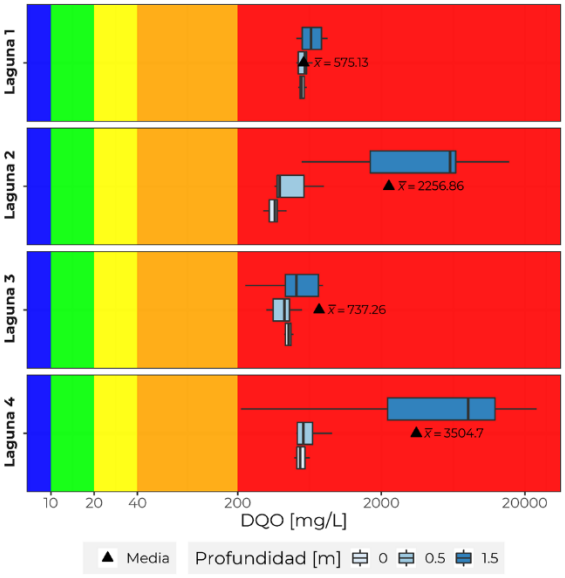


Figura 96. Calidad del agua: DQO (mg/L), agosto-

septiembre 2019.

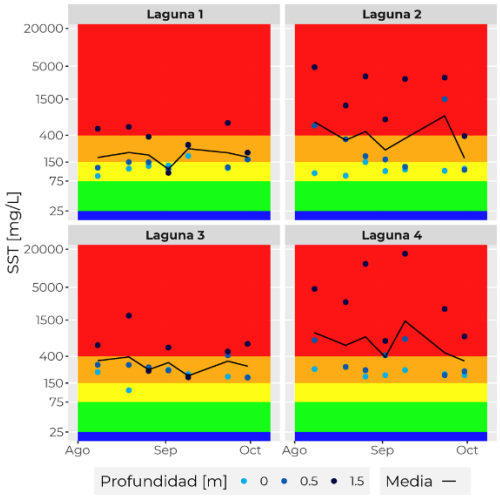


Figura 97. Calidad del agua: SST (mg/L), agosto-septiembre 2019.

septiembre 2019, promedio

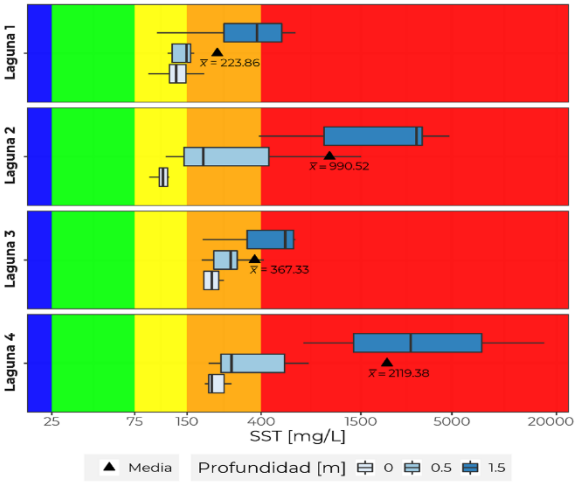


Figura 98. Calidad del agua: SST (mg/L), agosto-septiembre 2019, promedio.

En la zona 2 se presentó una concentración promedio de 652 UFC/100mL, por lo que se clasificaría como “contaminada” y en la. zona 1, 3 y 4 se tuvieron concentraciones mínimo de 1146 y máximo de 2140 UFC/100Ml, clasificándose como “fuertemente contaminadas”.

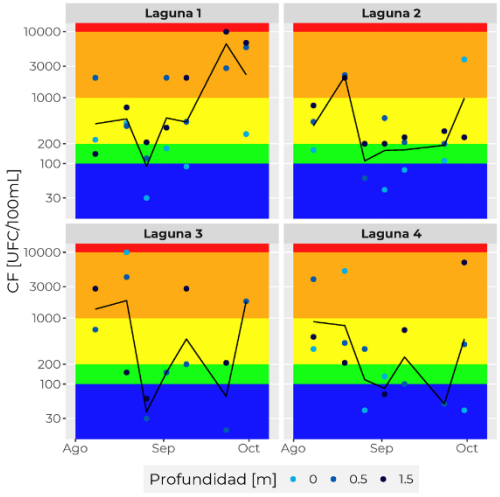


Figura 99. Calidad del agua: CF (UFC/100 ml), agosto-septiembre 2019.

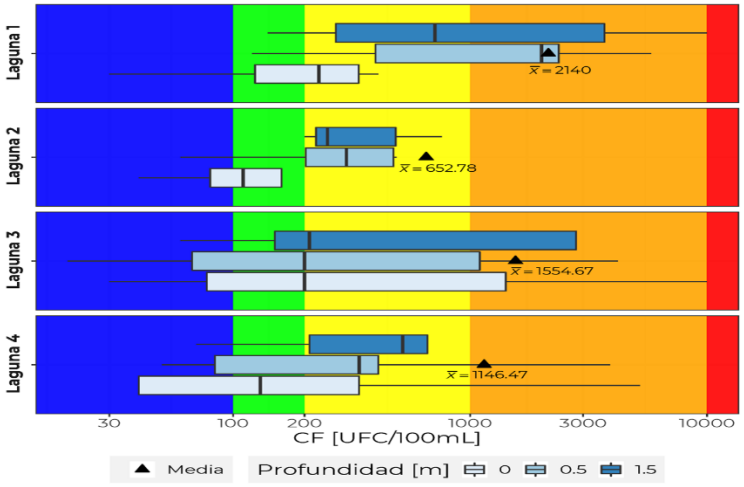


Figura 100. Calidad del agua: CF (UFC/100 ml), agosto-septiembre 2019, promedio.

Oxígeno Disuelto (OD)

En las zonas más profundas, que corresponden a 1.5 m, se observan porcentajes menores a 10% de OD, indicando un agua fuertemente contaminada, no así en la parte superficial que predominan concentraciones superiores a 50 %, es decir que la calidad del agua es aceptable.

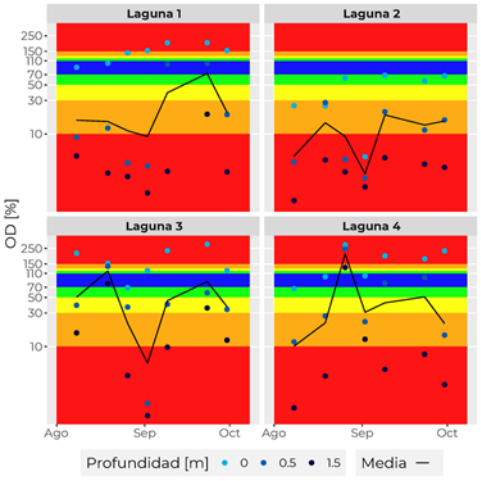


Figura 101. Calidad del agua: OD (%), agosto-septiembre 2019.

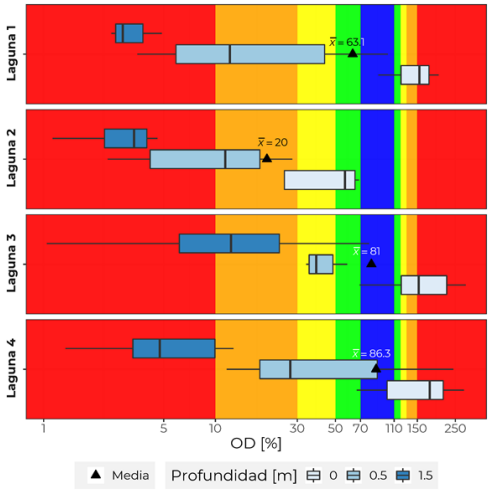


Figura 102. Calidad del agua: OD (%), agosto-septiembre 2019, promedio.

Por otra parte, considerando los LMP establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, es de observarse que, los valores en rojo (Tabla 62) no cumplen con los límites de descarga en embalses naturales y artificiales con uso público urbano y con respecto a la NOM-003-SEMARNAT-1997 con contacto directo, no se cumplen los límites respecto de grasas y aceites, SST y DBO_5 (Tabla 63).

Tabla 62**.** Calidad del agua de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

Laguna	Profundidad	Promedio mensual agosto 2019						
		Temperatura	* Grasas y aceites	SS	* SST	* DBO_5	P_t	N_t
		°C	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Zona 1	Superficial	22.87	4.99	0.13	112.67	45.00	4.11	20.01
	0.5 m	22.73	4.99	0.13	140.33	41.00	4.11	38.44
	1.5 m	23.40	4.99	5.33	477.00	48.33	4.11	101.62
Zona 2	Superficial	20.63	4.99	0.09	113.67	33.67	4.09	20.26
	0.5 m	19.97	12.34	18.43	366.67	52.00	2.44	25.46
	1.5 m	19.67	30.27	116.67	3157.00	76.67	2.43	133.94
Zona 3	Superficial	17.10	5.39	0.09	190.33	45.00	2.42	21.76
	0.5 m	22.90	5.15	0.53	283.33	40.67	2.74	21.23
	1.5 m	16.83	7.24	35.86	866.67	42.67	3.65	67.86
Zona 4	Superficial	23.87	4.99	0.09	236.67	55.33	2.83	18.39
	0.5 m	23.73	3.93	0.78	410.00	57.33	3.65	18.99
	1.5 m	23.27	23.81	250.00	6450.00	127.67	3.67	172.29

Tabla 63. Calidad del agua de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997. Continuación.

Zona	Profundidad	Promedio mensual septiembre 2019						
		Temperatura	Grasas y aceites	SS	SST	DBO5	Pt	Nt
		°C	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Zona 1	Superficial	22.38	4.99	0.32	151.50	49.75	3.47	26.98
	0.5 m	19.35	4.99	0.30	170.50	41.50	3.33	25.05
	1.5 m	19.83	5.34	1.98	306.00	32.25	3.52	28.27
Zona 2	Superficial	19.60	5.00	0.10	112.25	39.25	3.05	17.45
	0.5 m	18.75	5.00	16.03	170.25	39.00	3.31	42.51
	1.5 m	19.05	5.00	66.00	306.00	32.25	3.06	110.76
Zona 3	Superficial	21.83	5.48	0.10	206.75	49.00	2.82	21.40
	0.5 m	21.60	5.00	1.18	256.75	43.75	3.04	20.77
	1.5 m	21.40	5.25	6.53	459.75	32.25	2.88	26.80
Zona 4	Superficial	21.33	5.00	0.10	212.00	49.00	2.72	21.29
	0.5 m	20.55	5.00	2.10	398.50	56.50	3.04	25.64
	1.5 m	21.15	12.63	145.00	1884.00	105.00	1.20	152.74

SS: Sólidos Sedimentables
SST: Sólidos Suspendidos Totales
DBO_5: Demanda Química de Oxígeno
P_t: Fósforo total
N_t: Nitrógeno total

La DBO_5 es un parámetro básico que no se cumple en todas las zonas del lago a diferentes profundidades La DBO_5 es un indicador de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en los cuerpos de agua, proveniente principalmente de las descargas de aguas residuales tanto de origen municipal como no municipal, lo cual coincide con los puntos identificados de descargas directas continuas (fuentes puntuales) de aguas residuales del Riachuelo Serpentino, Rafael Castillo y San Juan Ixtayopan, así como el ingreso de

emergencia de aguas combinadas del Canal General al Lago Tláhuac-Xico. Las fuentes difusas que no se tienen identificadas contribuyen a un incremento en este parámetro que incumple la normativa. El incremento de la concentración de la DBO_5 incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos (CONAGUA, 2018).

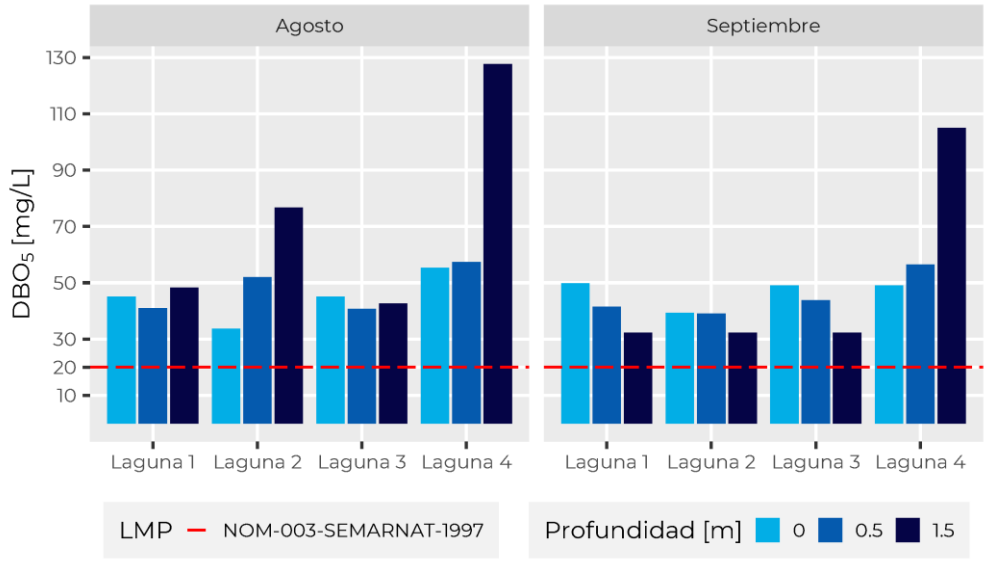


Figura 103. LMP para demanda bioquímica de oxígeno promedio mensual de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Otro de los parámetros que no se cumple en todas las zonas, son los SST, estos miden la cantidad de sólidos sedimentables y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, los cuales tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática (CONAGUA, 2018).

Las descargas puntuales identificadas y difusas impactan con el continuo ingreso de nutrientes, en especial el nitrógeno, parámetro que rebaso los LMP establecidos en la normatividad. El nitrógeno favorece el florecimiento de algas (por ejemplo, las cianobacterias) o el crecimiento de ciertas hidrófitas (lirio acuático y tule) que provocan problemas de eutrofización, causando aspectos estéticos desagradable, disminuyendo la transparencia del agua y del oxígeno disuelto, provocando mortandad de la vida acuática.

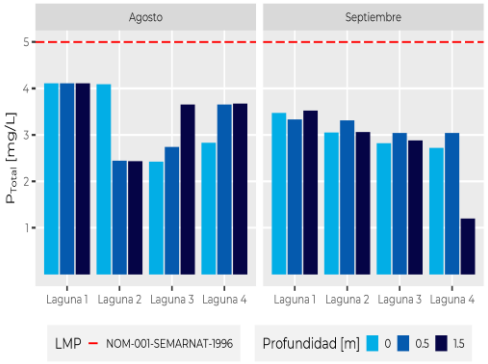


Figura 104. LMP para fósforo total promedio mensual de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

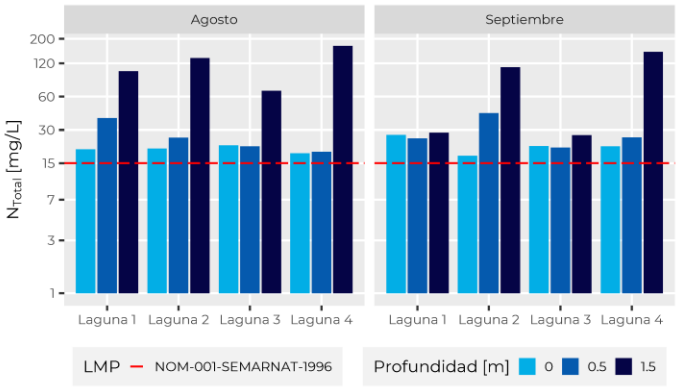


Figura 105**.** LMP para nitrógeno total promedio mensual de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Con respecto a los metales pesados, los promedios mensuales de agosto 2019 comparados con los LMP establecidos en la tabla 3 de la NOM-001-SEMARNAT-1996, no se cumplen para plomo en la zona 4 a profundidad de 1.5 metros, atribuyéndose que al norte de esta zona, se presentan tiraderos de basura y cascajos.

Tabla 64. Calidad del agua de acuerdo límites máximos permisibles para metales pesados (NOM-001-SEMARNAT-1996).

Laguna	Profundidad	Promedio mensual agosto 2019					
		Cadmio	Cobre	Cromo	Níquel	Plomo	Zinc
		mg/L					
Zona 1	Superficial	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.100
	0.5 m	0.050	0.104	0.200	0.100	0.200	0.164
	1.5 m	0.050	0.112	0.200	0.100	0.200	0.141
Zona 2	Superficial	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.100
	0.5 m	0.050	0.119	0.200	0.100	0.200	0.100
	1.5 m	0.050	0.107	0.200	0.100	0.200	0.138
Zona 3	Superficial	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.234
	0.5 m	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.100
	1.5 m	0.050	0.100	0.200	0.075	0.200	0.100
Zona 4	Superficial	0.050	0.100	0.200	0.100	0.140	0.100
	0.5 m	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.100
	1.5 m	0.050	0.172	0.200	0.100	0.223	0.262

Laguna	Profundidad	Promedio mensual septiembre 2019					
		Cadmio	Cobre	Cromo	Níquel	Plomo	Zinc
		mg/L					
Zona 1	Superficial	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.100
	0.5 m	0.050	0.165	0.200	0.100	0.200	0.248
	1.5 m	0.050	0.115	0.200	0.101	0.200	0.125
Zona 2	Superficial	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.100
	0.5 m	0.050	0.109	0.200	0.100	0.200	0.146
	1.5 m	0.050	0.148	0.200	0.100	0.200	0.144
Zona 3	Superficial	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.100
	0.5 m	0.050	0.114	0.200	0.100	0.200	0.233

	1.5 m	0.050	0.123	0.200	0.100	0.200	0.102
Zona 4	Superficial	0.050	0.100	0.200	0.100	0.200	0.140
	0.5 m	0.050	0.114	0.200	0.100	0.200	0.101
	1.5 m	0.050	0.155	0.200	0.100	0.200	0.235

3.6.1.2.2 Muestreo 2022

Durante enero y febrero se realizaron muestreos de calidad del agua en 14 sitios dentro de las distintas zonas del lago, así como de las descargas de aguas residuales que ingresan al lago.

Tabla 65. Sitios de muestreo.

Sitio	Descripción	Tipo de muestreo
1	Centro de la zona 5 del lago (frente al Pozo 7 Santa Catarina)	1 Muestra simple (profundidad media)
2	Centro de la zona 3	1 Muestra simple (profundidad media)
3	Área más profunda de la zona 3 (2.90 m)	1 Muestra simple (profundidad media)
4	Centro de la zona 4-Sur, Pozo 11 Santa Catarina, con conexión entre zonas 3 y 4	1 Muestra simple (profundidad media)
5	Centro de la zona 2	1 Muestra simple (profundidad media)
6	Canal Serpentino (inicio)	1 Muestra simple (profundidad media)
7	Canal Serpentino (después de humedal)	1 Muestra simple.
8	Descarga del canal Serpentino en la zona 3	Compuesto.
9	Descarga del canal proveniente de San Juan Ixtayopan a la zona 2	Compuesto.
10	Canal General (Previo al rebombeo Paso del Toro)	Compuesto.
11	Lumbrera 4	Compuesto
12	PB La Caldera	Compuesto
13	Planta de bombeo 7	Compuesto
14	Lumbrera 2	Compuesto

Las muestras compuestas se conformarán a partir de tres (3) muestras simples obtenidas cada 4 horas, llevándose a cabo a las 7, 11 y 15hrs.
Las muestras simples obtenidas en el lago se realizarán a una profundidad media.
Las muestras compuestas se conformarán a partir de tres (3) muestras simples obtenidas cada 4 horas, llevándose a cabo a las 7, 11 y 15hrs.
Las muestras simples obtenidas en el lago se realizarán a una profundidad media.



Figura 106. Localización geográfica de los sitios de muestreo, Lago Tláhuac-Xico.

De acuerdo con los resultados de los muestreos, no se cumplen con los LMP establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 Mod.2000, de los parámetros de: coliformes fecales, color, turbiedad, aluminio, cadmio, cromo total, nitrógeno amoniacal, pH, plomo, sodio, sólidos disueltos totales y sustancias activas al azul de metileno. Los cloruros, dureza total y sulfatos solo no se cumplen en las zonas 5, 3 (centro), 3 (profundo) y la zona 4. Respecto Hierro solo no se cumple en la zona 3 (centro) y los fluoruros en la zona 5.



Figura 107. Zona 5 (sitio 1), contaminación por residuos sólidos urbanos principalmente de construcción.

La zona 5 (sitio 1), presenta los valores promedios mensuales más elevados para coliformes fecales, color, cloruros, dureza, fluoruros, pH, sodio, sólidos disueltos totales y sulfatos en comparación con las otras zonas. Esta zona es la de menor profundidad por lo que la evaporación hace que algunos contaminantes se concentren. Esta zona se caracterizó por ser la más contaminada, visualmente se apreciaron residuos sólidos urbanos en la zona del lago como en sus alrededores (Figura 107), cabe mencionar que en esta zona se ha ubicado un tiradero de residuos sólidos urbanos y cascajo sobre Calzada de los Pozos y en un canal del mismo. El cascajo ha sido usado para rellenar la ciénega y obtener terrenos para edificar viviendas, ocasionando el cambio de uso de suelo y la desecación de Tláhuac (De la Lanza Espino & Hernández Pulido, 2018). Por otra parte, no se tienen identificadas descargas puntuales directas de aguas residuales a la zona, por lo que su contaminación principalmente se debería a los escurrimientos de los asentamientos cercanos a la zona y a los lixiviados provenientes de los tiraderos cercanos a la zona.

Tabla 66. Calidad del agua: límites permisibles NOM-127-SSA1-1994 Mod. 2000.

Zona de muestreo			**Zona 5**	**Zona 3 (CENTRO)**	**Zona 3 (PROFUNDO)**	**Zona 4**	**Zona 2**
Sitio			**Sitio 1**	**Sitio 2**	**Sitio 3**	**Sitio 4**	**Sitio 5**
Parámetro	Unidades	LP					
Coliformes totales	UFC/100mL	N/D - Ausencia	8.05E+02	1.00E+01	5.40E+02	1.00E+01	2.00E+02
Color	UPt/Co	20.00	500.00	137.50	162.50	125.00	150.00
Turbiedad	UTN	5.00	92.35	185.50	274.00	128.50	118.50
Aluminio	mg/L	0.2	1.00	1.00	2.83	1.00	1.00
Cadmio	mg/L	0.005	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
Cloruros (como Cl^-)	mg/L	250.00	3523	285.38	303.4	527.605	183.575
Cobre	mg/L	2.00	0.100	0.100	0.235	0.100	0.100

Cromo total	mg/L	0.05	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
Dureza total (como $CaCO_3$)	mg/L	500.00	885.84	509.58	681.88	618.85	493.32
Fierro	mg/L	0.3	0.117	1.625	0.100	0.137	0.178
Fluoruros (como F^-)	mg/L	1.5	10.70	1.09	0.89	0.50	1.48
Manganeso	mg/L	0.250	0.100	0.100	0.126	0.100	0.100
Nitratos (como N)	mg/L	10.00	0.70	3.74	3.42	0.70	3.48
Nitritos (como N)	mg/L	1.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/L	0.50	2.46	1.52	1.50	1.50	7.46
pH (potencial de hidrógeno)	6.5	8.5	9.50	9.05	8.90	9.40	8.60
Plomo	mg/L	0.01	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
Sodio	mg/L	200	4797.95	218.40	464.05	662.10	269.00
Sólidos disueltos totales	mg/L	1000.00	18843.50	1884.00	1848.50	2893.00	1495.00
Sulfatos (como $SO4^=$)	mg/L	400.00	7388.00	488.20	508.62	810.82	351.11
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	0.5	1.29	0.61	0.83	0.59	3.70
Zinc	mg/L	5	0.100	0.130	0.149	0.100	0.100

A continuación, se presenta un análisis de algunos de los parámetros analizados

pH

Lo valores promedio obtenidos en todas las zonas del lago no cumplen con la normativa de agua potable vigente, teniendo valores entre 8.60 a 9.50. Estos resultados obtenidos, coinciden con los resultados reportados por (De la Lanza Espino & Hernández Pulido, 2018) en un muestreo realizado de junio 2008 a mayo 2009, reportando un pH 8.81 a 9.63. Asimismo, como ya se mencionó anteriormente, en el año 2019 se realizó un muestreo a cargo del gobierno de la Ciudad de México los resultados obtenidos también mostraron valores entre 8.70 a 10.23, concluyendo que el pH alcalino es una constante en el tiempo y para cada una de las zonas, lo cual puede atribuirse a dos factores.

El primer factor son las características geológicas de la zona, ya que como la Cuenca de México se conformó tras un largo periodo de actividad volcánica, cuándo se formó la Sierra

Chichinautzin al sur de la Cuenca de México, ésta se convirtió en una cuenca cerrada o endorreica, en consecuencia, empezó a retener las aguas que drenaban hacia el sur (océano Pacífico), dando lugar a la aparición de la zona lacustre (Lema Labadie , y otros, 2009). Esta zona lacustre fue acumulando una gruesa capa de arcillas (Camarillo Sarabia, Maurer Walls, & Ulacia Balmaceda, 2012), compuesta de la materia fina acarreada por las aguas de las lluvias precipitadas en los cerros que circundan la Cuenca., la cual se conoce como “acuitardo”, por ser casi impermeable. Las arcillas de la Cuenca de México tienen entre 8 y 10 partes de agua por cada porción sólida, lo cual se considera como excepcionalmente poroso, esta propiedad hace que el acuitardo quede especialmente susceptible a compactarse y agrietarse ante la pérdida de humedad (Lema Labadie , y otros, 2009). De acuerdo con la caracterización ambiental en lo que respecta a la degradación del suelo realizada por el Gobierno de la Ciudad de México, se observaron suelos secos, agrietados, costras de salitre y estratificados, por lo cual, el pH alcalino se caracterizó por la presencia de carbonatos.

El segundo factor es la presencia de altas densidades de microorganismos como Cianobacterias y Bacillariophyta (fitoplancton), que al fotosintetizar asimilan el bióxido de carbono (CO_2) procedente de la atmósfera (efecto biológico), al mismo tiempo forma ácido carbónico (H_2CO_3) que es inestable, desplazando la reacción hacia la formación de los bicarbonatos o carbonatos que imprimen la condición alcalina (efecto químico), como se ha visto en otros cuerpos de agua en México (Lema Labadie , y otros, 2009). En los resultados de calidad del SACMEX del 2022, se anotaron como observaciones de las zonas 3 (centro), 3 (profundo) y 2 un olor a alga. Así mismo se observa la coloración verde en estas zonas.

Sulfatos

El valor más alto de sulfatos se presentó en la zona 5 (sitio 1) seguida de la zona 4 (sitio 4) con 7388 mg/L y 810.32 mg/L respectivamente. Ambas zonas se caracterizan por ser someras por lo que la desecación de las mismas provoca la concentración de este ion. En las zonas 3 los valores son muy similares, 488.20 mg/L para la zona 3 (centro) y 508.62 mg/L para la zona 3 (profunda). Estas zonas, se caracterizan por tener tierras ejidales alrededor de donde se cultivan algunas hortalizas, lo que se infiere que una concentración elevada de sulfatos puede deberse al uso de fertilizantes y/o pesticidas en los cultivos, sin embargo, no se tienen datos disponibles de este muestreo y anteriores para corroborar. A pesar de la descarga puntual directa identificada de agua residual del Canal Serpentino a la zona 3 (centro), esta no aporta una cantidad significativa de sulfatos, ya que la concentración promedio fue de 64.52 mg/L, caso contrario los plaguicidas organoclorados, como por ejemplo hexaclorobenceno, metoxicloro y heptacloro epóxido, los cuales no fueron detectados.

Dureza

La dureza representa la concentración de cationes metálicos multivalentes presentes en el agua, la cual es causada principalmente por las sales de Ca y Mg (en ese orden) y en menor grado por Al, Fe, Mn, Sr y Zn (Comisión Nacional del Agua, 2007). Los resultados obtenidos en la zona 5, zona 3 (centro), zona 3 (profundo) y zona 4 indican que no se cumple el LMP marcado en la normatividad vigente (NOM-127-SSA1-1994 Mod.2000), ya que los valores presentados son del orden de 500 a 600 mg/L respectivamente, clasificándose como un agua extremadamente dura (>300 mg/L).

En la figura 4.23 se muestran los porcentajes (%) de calcio y magnesio que constituye la dureza total.

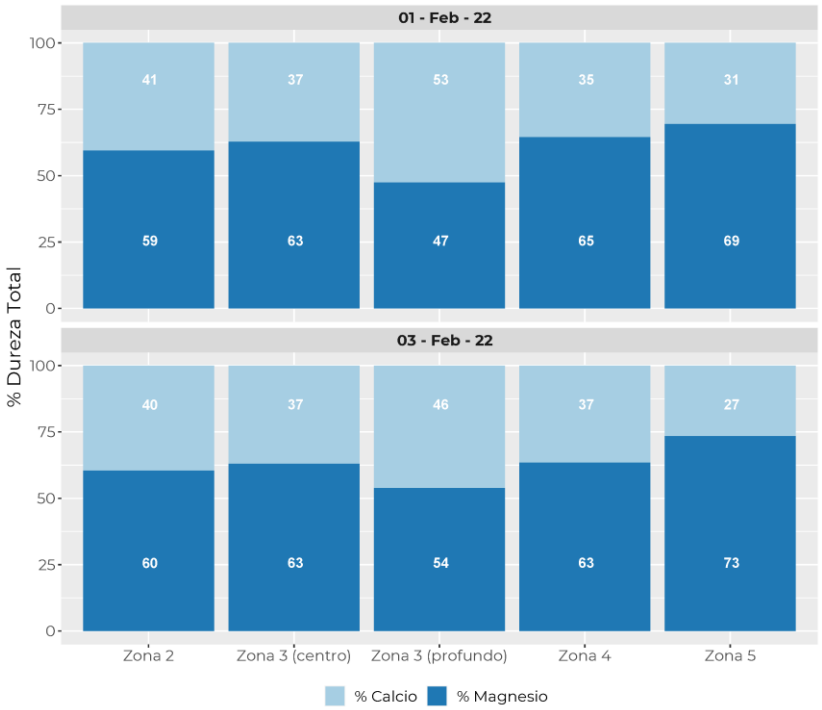


Figura 108. Dureza total (%) para cada zona de laguna.

Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO5)

Con base los indicadores de la RENAMECA, en la zona 2, 3 (centro), 4 y 5 se calificada como un agua de aceptable y la zona 3 (profundo) como aceptable a contaminada, no obstante se tienen indicios de contaminación, lo cual está relacionado con las descargas de aguas residuales provenientes del Canal Serpentino en la zona 3 (centro), y la descarga de San Juan Ixtayopan en la zona 2. Para la zona 5 como se mencionó anteriormente se encuentra contaminada por un tiradero de residuos sólidos urbanos y cascajo sobre Calzada de los Pozos y en un canal del mismo. Si a esto se le adiciona que en las zonas mencionadas se tiene la presencia de fauna principalmente aves, que contribuyen a la problemática de contaminación.

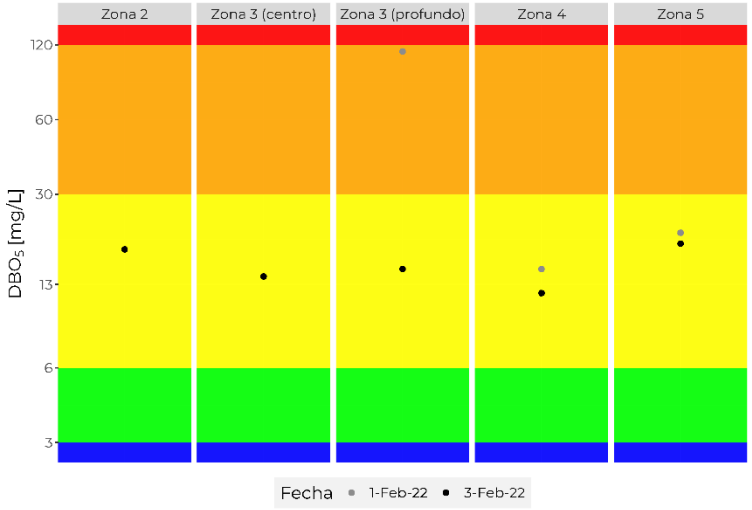


Figura 109. Calidad del agua: DBO_5 (mg/L), febrero 2022.

Demanda Química de Oxigeno (DQO)

Dado que la DQO cuantifica la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica, tiene importancia desde el punto de vista ecológico, ya que altos niveles de la DQO manifiestan indirectamente condiciones tendientes a la hipoxia o anoxia, que representa un riesgo para la fauna acuática (De la Lanza Espino & Hernández Pulido, 2018).

En la figura 4.25 se muestra que la calidad del agua relacionada al parámetro DQO, es clasificada como fuertemente contaminada (indicador RENAMECA), para todas las zonas de las lagunas. Factores como el crecimiento demográfico, asentamiento irregulares, presencia de fauna así como tiraderos en algunas zonas del lago agudizan la contaminación.

De acuerdo a (De la Lanza Espino & Hernández Pulido, 2018), la variación de los valores de DQO en los meses de lluvia (junio a septiembre 2008) fueron concentraciones calificadas como bajas, sin embargo para los meses de octubre 2008 a mayo 2009 los valores fueron mayores. Los muestreos de ese momento se emplearon para estimar la carga orgánica degradable, procedente de fuentes naturales (fitoplancton, vegetación sumergida, excretas de aves y peces), a pesar de que se haya incluido también la carga orgánica de los asentamientos humanos y sus actividades agropecuarias periféricas.

Los resultados del muestreo de agosto- septiembre 2019, con respecto al indicador RENAMECA, mostraron una calidad del agua fuertemente contaminada, con valores promedio desde 575.13 hasta 3504.7 mg/L.

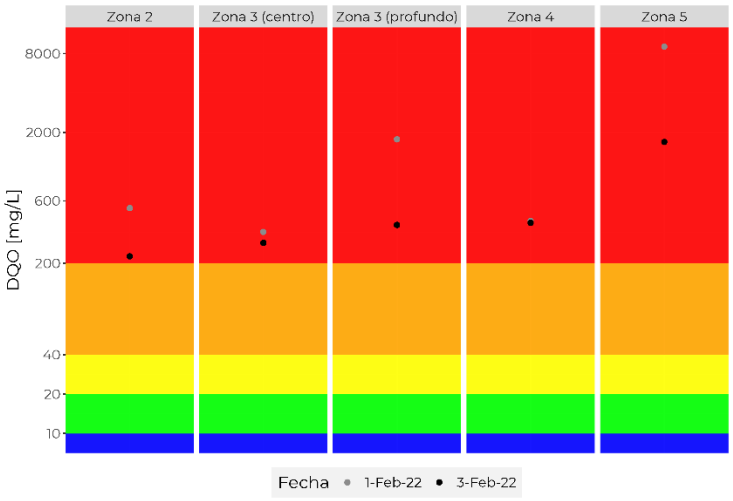


Figura 110. Calidad del agua: DQO (mg/L), febrero 2022.

Solidos Suspendidos Totales (SST)

En las zonas 3 (profundo), 4 y 5, los valores son aceptables para una fuente de abastecimiento, mientras que para las zonas 2 y 3 (centro) el valor va de aceptable a contaminada.

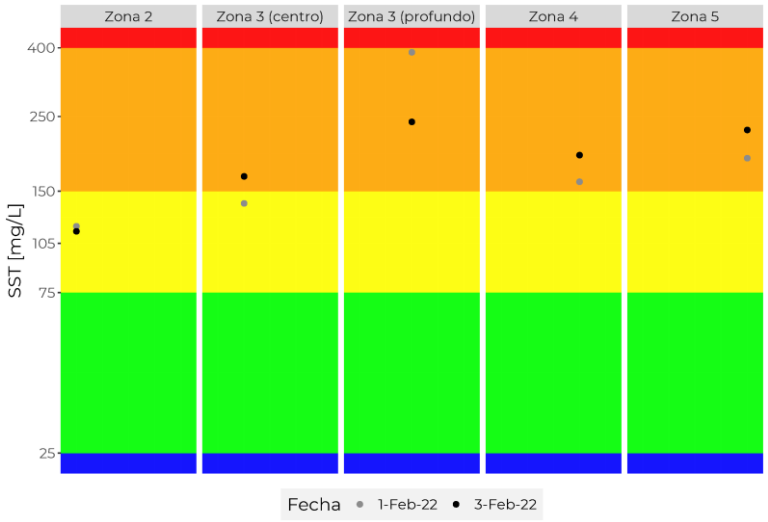


Figura 111. Calidad del agua: SST (mg/L), febrero 2022.

Coliformes Fecales (CF)

Los coliformes fecales no se encuentran en aguas y suelos que no han estado sujetos a contaminación fecal. Por ello desde el punto de vista de la salud, el grupo coliforme fecal es mucho más útil que el total, pues se relaciona con la probabilidad de encontrar patógenos excretados. Las ventajas de este grupo como indicador son: pueden estar ausentes, si la contaminación no es de origen fecal, sobreviven menos tiempo en la naturaleza que los totales por lo que permiten suponer contaminación reciente si se encuentran en altas concentraciones, son más exigentes que los coliformes totales para reproducirse en el ambiente extraintestinal y tienen la capacidad de reproducirse en aguas ricas en nutrimentos, en sedimentos y aún en aguas poco contaminadas (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Para la zona 2 y 3 (profundo), la calidad presenta valores de buena calidad a fuertemente contaminada (indicador RENAMECA), lo cual está relacionado con la influencia de las descargas directas de aguas residuales del Canal San Juan Ixtayopan y el Canal Serpentino.

Los CF en la zona 3 (profundo), se han incrementado con respecto al tiempo, de acuerdo con (De la Lanza Espino & Hernández Pulido, 2018), relacionándose directamente al crecimiento demográfico de la zona, ya que actualmente el Lago Tláhuac-Xico se encuentra rodeado por la mancha urbana, en donde también se encuentran asentamientos irregulares, que demandan servicio e infraestructura de agua potable y saneamiento, así como a la presencia de fauna, principalmente de aves. De acuerdo con la Caracterización Ambiental realizada por el Gobierno de la Ciudad de México a través de la SEDEMA, en la zona 3 (centro y profundo) existe una gran diversidad de especies de aves acuáticas y terrestres.



Figura 112. Calidad del del agua: CF (UFC/100 ml), febrero 2022.

Oxígeno Disuelto (OD)

Los resultados obtenidos para el porcentaje (%) de saturación de OD son heterogéneos en tiempo y espacio para cada una de las zonas (Figura 113). Para la zona 2 y 3 (centro y profundo) se tuvieron valores de buena calidad a fuertemente contaminada, la zona 4 aceptable a contaminada y la zona 5 como excelente.

Para la calidad del agua en la zona 2 y 3 (centro y profundo) se tuvieron valores mayores al 150% de saturación, lo cual puede deberse a factores como una alta actividad fotosintética en donde microorganismos como el fitoplancton (Bacillariophyta) y Cianobacterias están distribuidos en parches o manchas, relacionándose con valores de pH alcalino que se presenta en las mismas zonas. Otro factor es la influencia de la circulación del agua, durante la visita de campo se observó que el agua de los lagos permanece en calma prácticamente estática, incluso este cuerpo de agua es clasificado como léntico. También se debe considerar una difusión química que, aunque lenta, ha sido continua por los asentamientos periféricos y puede superar a la influencia de los factores temperatura y salinidad en la concentración del gas.

Este efecto de sobresaturación de oxígeno en el agua puede ser comparado y corroborado con el Lago Zimbabwe donde Marshall y Falconer (1973) calcularon hasta 180%, el cual justificaron por una alta productividad primaria. Zambrano et al., (2009) con base en sus registros de temperatura y salinidad calcularon 135% de saturación en Xochimilco. Montaño Salazar (2010) en las esclusas de 1.5 m de profundidad del parque de la Alameda Oriente al este de la Ciudad de México estimó 150% de saturación con 265 mg/m3 de clorofila. Lagunas Sánchez (2018) calculó en el lago de Chapultepec en la segunda sección poco más de 300% de saturación de oxígeno. Olguín Flores (2018), por su parte, en los lagos del Bosque de Chapultepec estimó hasta 293% en abril, resultado de una alta productividad primaria neta de 1,781 mg Cm^3/h. En el lago viejo de Chapultepec Alcocer et al. (1988) señalan una elevada concentración de clorofila por encima de 800 mg/m^3 debido al aporte externo de nutrientes, condición hipertrófica.

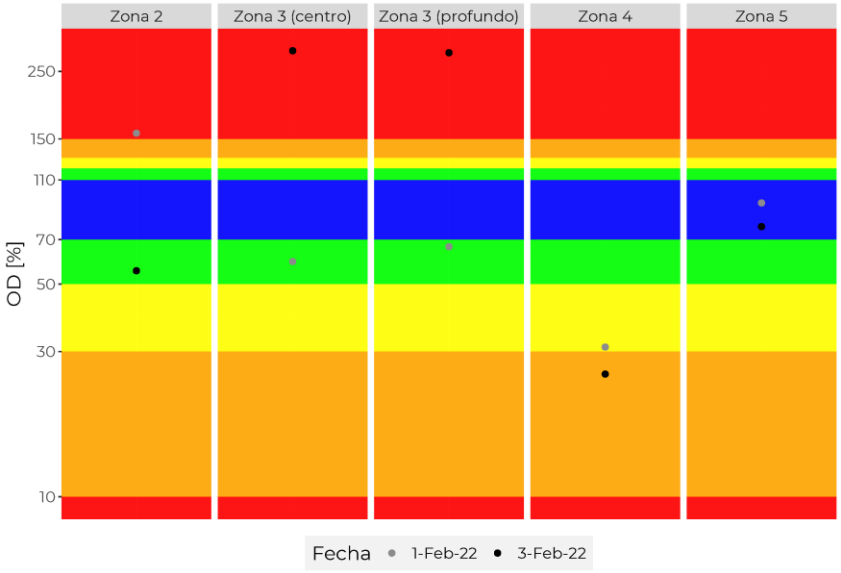


Figura 113. Calidad del agua: OD (%), febrero 2022.

Por otra parte, como se mencionó párrafos anteriores, también se analizaron sitios de descargas de agua residual, a continuación, se presentan los resultados.
En la Tabla 67 se muestra un resumen de los resultados del muestreo.

La concentración de contaminantes en el Canal General fueron equivalentes al agua residual que se está recibiendo en la Lumbrera 2 (L2), Planta de bombeo 7 (PB7), y Lumbrera 4 (L4), esto se debe a la falta de lluvia durante la semana de muestreo.

La concentración de contaminantes de L2, PB7 y L4, las cuales serían las fuentes de agua residual para la PTAR Chalco en la primera parte del proyecto, son muy parecidas, alrededor de 445mg/L de DQO, 217 mg/L de DBO y 158 mg/L de SST. Sin embargo, la concentración de contaminantes en la Planta de Bombeo La Caldera (PB LC), la cual será una de las fuentes de agua residual en una fase futura del proyecto, es significativamente mayor a todas las anteriores (702 mg/L) de DQO, 360 mg/L de DBO y 356 mg/L de SST). La concentración de nutrientes es más alta en el Canal General que en el agua residual, lo cual indica que probablemente éste tiene aportes de escurrimientos agrícolas.

Tabla 67. Resumen y comparativa de los contaminantes orgánicos y nutrientes en las descargas

		Canal General	Lumbrera 2 (L2)	Planta de bombeo 7 (PB 7)	Lumbrera 4 (L4)	Planta de bombeo La Caldera (PB LC)
Sitio		**10**	**14**	**13**	**11**	**12**
Parámetros		**PROM**	**04/02/2022**	**04/02/2022**	**PROM.**	**PROM.**
Físicos						
pH	UpH	7.43	7.30	7.20	7.50	7.30
DBO_5 Total	mg/L	269.00	138.00	218.00	236.67	360.33
DQO Total	mg/L	412.87	422.20	497.60	438.63	702.47
DQO Soluble	mg/L	231.43	279.00	316.70	294.80	256.87
Grasas y aceites	mg/L	13.32	26.10	22.53	17.36	52.55
Sólidos						
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	141.67	180.00	147.00	155.33	356.33
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	101.33	110.00	116.00	96.00	221.33
SSV/SST		0.72	0.61	0.79	0.62	0.62
Sólidos Sedimentables	mL/L-h	0.43	0.70	1.50	0.57	1.67
Nutrientes						
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	54.40	39.68	45.83	40.62	40.54
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	70.94	55.27	60.15	54.26	57.02
Nitrógeno Total	mg/L	71.65	61.36	66.38	58.75	61.37
Fósforo total	mg/L	13.66	7.16	6.48	6.24	5.85

La concentración de nutrientes es más alta en el canal general que en el agua residual, lo cual indica que probablemente éste tiene aportes de escurrimientos agrícolas. Sin embargo, para cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997 no se requiere remoción de nutrientes.

3.6.1.2.3 Zona de humedal natural

Los humedales de tratamiento son una tecnología atractiva: presentan los menores costos de tratamiento con respecto a los sistemas electromecánicos que requieren energía eléctrica para su funcionamiento; son eficientes en la depuración de las aguas residuales —siempre y cuando el diseño sea correcto y se apliquen las mejores prácticas de ingeniería—; su operación es sencilla y su mantenimiento fácil y económico, ya que no demandan mano de obra calificada ni suelen tener gastos asociados con insumos para su funcionamiento, y generan espacios de belleza natural, dado que mediante la correcta selección de plantas se pueden crear procesos productivos, como la siembra y venta de flores de ornato o de especies vegetales que puedan ser aprovechadas por la comunidad para la manufactura de artesanías, y se propicia el reciclaje de elementos en la naturaleza (Rivas Hernández, 2021). Algunos inconvenientes son que la remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales es un proceso continuo renovable. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo (Environmental Protection Agency, 2000). Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de carbono orgánico total, SST, nitrógeno o coliformes que se ven reflejados en el efluente haciendo que el tratamiento sea mucho más desafiante.

El 50% de los humedales naturales presentan algún grado de alteración o se le considera en riesgo de desaparecer, esto a pesar de los acuerdos internacionales y políticas nacionales generadas para la conservación de estos ecosistemas (Leal Nares, 2016). La función principal del humedal, además de ser un rico ecosistema y un importante hábitat para muchos seres vivos, es que actúan como filtradores naturales de agua debido a que sus plantas hidrófitas, gracias a sus tejidos, almacenan y liberan agua, y de esta forma hacen un proceso de filtración (Camarillo Sarabia, Maurer Walls, & Ulacia Balmaceda, 2012). Sin embargo, la degradación de los humedales y sus especies impacta directamente en los servicios ambientales que estos desempeñan, como la recarga de acuíferos, el reciclaje de nutrientes, la retención de metales pesados y la prevención de inundaciones (Leal Nares, 2016).

En la Tabla 68 se muestra la comparativa de los LMP establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al público con contacto directo, la comparación con esta norma es porque se considera la posibilidad de dotar de agua para riego agrícola, observándose que se rebasan los LMP de los parámetros con excepción de las grasas y aceites. Comparando las diferentes zonas del humedal, el sitio 8 correspondiente al efluente del humedal, con respecto a los coliformes fecales se tiene una remoción del 76.77% y para DBO_5 del 58.33%. Sin embargo, con respecto a los SST se presenta un incremento en el valor, inicialmente se tienen 44 mg/L en el influente, aumentando en la parte media a 246 mg/L y en el efluente disminuye a 134 mg/L, por lo que no se tiene una remoción de este parámetro.

Tabla 68. Límites máximos permisibles establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997, contacto directo.

Parámetros	LP	Sitio de muestreo		
		C. Serp. (inicio) 6	C. Serp. (medio) 7	C. Serp. (final) 8
Coliformes fecales (NMP/100 Ml)	100	3300000	55000	766673
Grasas y Aceites (mg/L)	15	6.99	7.71	7.09
DBO_5 (mg/L)	20	168	78	70
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	20	44	246	134

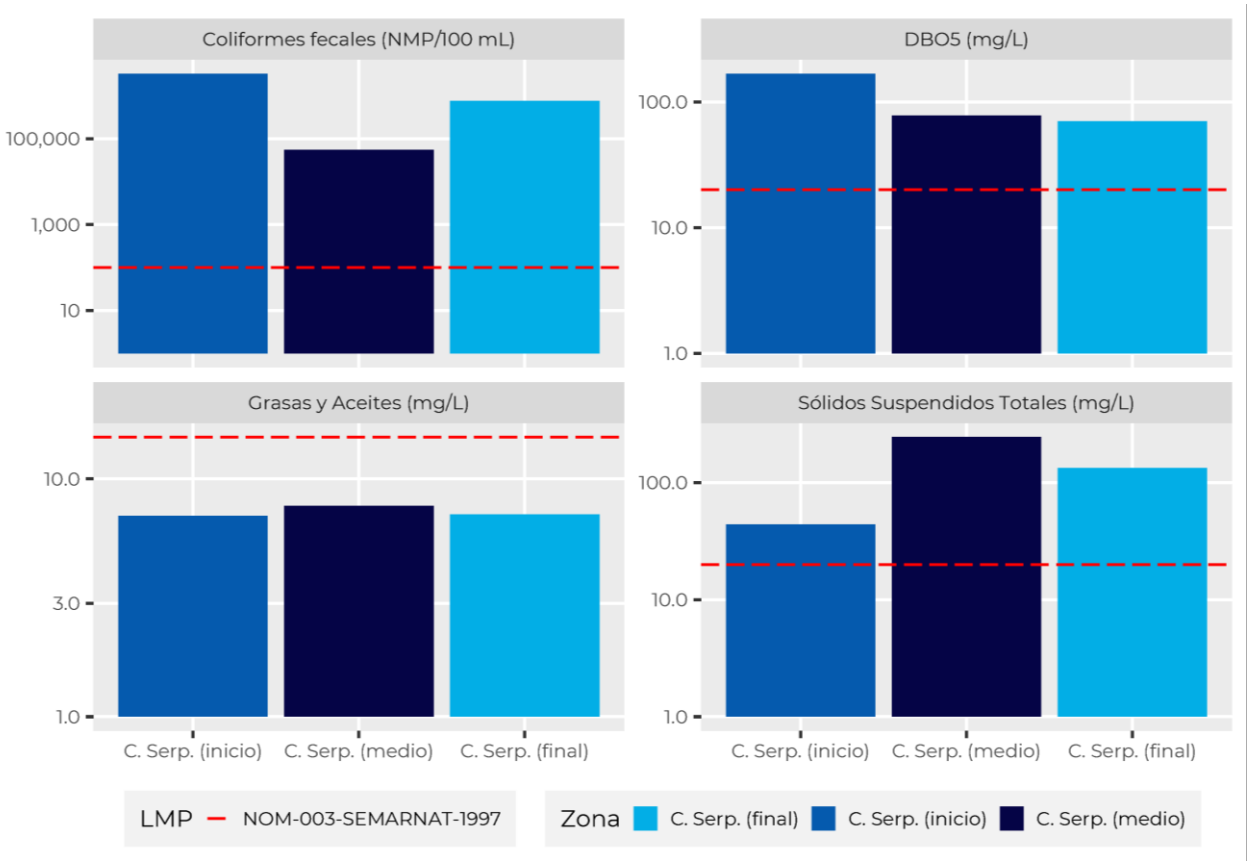


Figura 114. Límite máximo permisible de acuerdo a NOM-003-SEMARNAT-1997 con contacto directo, febrero 2022.

En el caso de los metales pesados, de acuerdo con los límites permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021 solo se rebasan los LMP del aluminio en el sitio d7, que corresponde a la parte intermedia del humedal natural.

Tabla 69. Límites permisibles de metales pesados establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Parámetros (mg/L)	LMP	Sitio de muestreo		
		C. Serp. (inicio) 6	C. Serp. (medio) 7	C. Serp. (final) 8

Níquel	2	0.010000	0.010000	0.010000
Aluminio	0.1	0.078150	1.093200	0.083200
Arsénico	0.1	0.010000	0.010000	0.010000
Cadmio	0.5	0.005000	0.005000	0.005000
Cromo	4	0.010000	0.010000	0.010000
Manganeso	0.2	0.062600	0.172200	0.062750
Plomo	10	0.011300	0.013500	0.012450
Zinc	1	0.050000	0.052750	0.050000
Cianuros totales	0.07	0.0200	0.0200	0.0200

3.7 Introducción

3.7.1 Descargas existentes al Lago Tláhuac-Xico

Tal y como se discutió en el Capítulo 4 del presente informe, el Lago Tláhuac-Xico se clasifica como contaminado a fuertemente contaminado de acuerdo con los indicadores de la RENAMECA. Con respecto a la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994, el agua del lago incumple con diversos parámetros como sólidos disueltos totales, sodio, entre otros.

Alrededor del Lago Tláhuac-Xico se encuentran varias fuentes de aguas residuales que pueden ingresar al vaso, principalmente por escorrentías derivadas del riego agrícola en los ejidos circundantes, actividades ganaderas en la ribera del lago, descargas no contenidas de asentamientos urbanos irregulares y el ingreso de agua contaminada a través del riachuelo Serpentino.

Si bien algunas de estas fuentes pueden ser contenidas en canales que posteriormente son bombeadas al Canal General, en época de lluvias pueden ser rebasados e ingresan al lago sin mayores restricciones.

Aunado a lo anterior, el Lago Tláhuac-Xico no presenta una salida natural constante de agua. Aunque existe una salida del Lagoal Canal General por medio de unos tornillos, estos sólo funcionan en eventualidades. En consecuencia, la única salida de agua es la evaporación en el sitio, el cual se reporta de 1,564 mm al año, mientras que la precipitación es de 571 mm anual, lo que da como resultado una evaporación neta de 993 mm al año en el lago (promedio de las Normales Climatológicas de Tláhuac y Chalco en el periodo de 1951 a 2010 (Sistema Metereológico Nacional, 2022)).

En resumen, la elevada concentración de contaminantes en el lago se debe a:
a) Escurrimientos de zonas agrícolas aledañas, rica en nutrientes que ha provocado eutrofización,
b) Descargas de agua residual cruda del Canal Serpentino y planta de Ixtayopan, y
c) A la concentración de los anteriores por la evaporación en el sitio, la cual es 2.7 mayor que la precipitación.

El estudio de profundización del lago Tláhuac-Xico deberá incluir en su análisis una forma de contener y canalizar los escurrimientos fuera del lago, tanto los existentes como los que se generen a futuro por la construcción del borde.

3.7.2 Características del agua residual esperada.

Se plantea la construcción de dos PTARs. La primera PTAR se ubicaría en la zona de Chalco, su flujo sería de 1000 L/s, construyéndose una primera etapa de 800 L/s y en ella se aprovecharía agua residual del drenaje combinado en Chalco (colectado por el Túnel Canal General), así como aguas pluviales conducidas por el Canal General. La segunda PTAR se ubicaría en la zona de Tláhuac, su flujo sería de 400 L/s, y en ella se aprovecharía agua residual de Tláhuac, Liconsa y otras que actualmente entran a las zonas 1 y 2 del lago Xico-Tláhuac (CONAGUA, 2022).

La mayor aportación de agua residual provendría del Valle de Chalco-Solidaridad, el cual se espera que tenga importantes contribuciones industriales. De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2022), en esta zona se ubican 3415 unidades económicas ligadas con la industria manufacturera, servicios de salud, construcción, entre otros. Cincuenta y dos (52) de estos establecimientos, por su tamaño y giro, pudieran impactar en la calidad de agua influente a la PTAR y en los contaminantes emergentes presentes (ver Tabla 123):

Tabla 70. Actividades económicas más importantes en el Valle de Chalco-Solidaridad que pueden impactar en la calidad de agua y presencia de CEs.

	Número de empleados					
Tipo de actividad económica	**11 a 30**	**31 a 50**	**51 a 100**	**101 a 250**	**Más de 250**	**TOTAL**
Industria textil	6	1	0	0	0	7
Industria alimentaria	4	0	0	0	0	4
Industria de madera, papel e impresión	4	0	0	0	0	4
Fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo	10	1	0	0	0	11
Servicios de reparación y mantenimiento para automóviles y camiones	1	1	0	0	0	2
Centros de salud y hospitales	14	2	5	2	1	24
TOTAL	39	5	5	2	1	52

3.7.3 Tipo de reúso potable

La construcción de las dos PTAR que descarguen al lago para que posteriormente se utilice el agua del reservorio para su potabilización permitirá la habilitación de un sistema de reúso potable indirecto.

Tabla 71. Comparación de sistemas RPD y RPI con el Proyecto Integral Tláhuac-Xico.

	Reúso potable directo (RPD)	**Reúso potable indirecto (RPI)**	**Proyecto Integral Lago Tláhuac-Xico**
Almacenamiento de agua previo a la potabilización	Opcional (Sí/No). En caso de tenerlo, es un reservorio diseñado	**Sí, siempre**. Es un **reservorio ambiental** (río, lago, embalse o acuífero) en el cual existe un proceso de **biorremediación** dentro del cuerpo de agua que constituyen una barrera adicional.	Es un reservorio "ambiental", originado por el hundimiento del suelo en el sitio, que será diseñado para albergar humedales que funcionen como barrera para el sistema (similar a **RPI**).

Para fines de este proyecto, se considerará para el Proyecto Integral Tláhuac-Xico un sistema de reúso potable indirecto (RPI), dado que el almacenamiento en el lago representará una barrera en el sistema (intensificado con la instalación de los humedales construidos).

3.7.4 Consideraciones técnicas en el Proyecto Integral Tláhuac-Xico

A continuación, se enlistan los principales aspectos analizados en la propuesta de solución para el proyecto RPI en el Lago Tláhuac-Xico, considerando la normatividad nacional, internacional y el estado del arte (ver secciones previas del presente capítulo).

Tabla 72. Aspectos analizados en la propuesta de solución para el proyecto RPI en el Lago Tláhuac-Xico

Concepto	Criterios Internacionales	Recomendación
Calidad del efluente de la PTAR	En la EPA (2012) se recomienda: pH 6.5-8.5 ≤ 2 NTU Materia fecal E. coli No detectable/100 mL ≤ 1mg/L Cl2 residual ≤ 2mg/L COT ≤ 0.2 mg/L TOX	Se analizarán y compararán dos escenarios: A) La PTAR descarga agua de excelente calidad como se recomienda en los lineamientos internacionales, por lo que se incluye tratamiento avanzado, y B) La PTAR sólo cumple con la normativa mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021).
Control de microorganismos patógenos	En la PTAR se deberá reducir virus entérico 9-log 10, quistes de Giardia 8-log10, y Cryptosporidium 9-log 10 (CSWRCB, 2018)	La PTAR incluirá MBR/UF, UV/Ozono y desinfección en el Escenario A.
Salinidad	Se recomienda ósmosis inversa en el tratamiento avanzado de la PTAR (DDW, 2018). En México, la NOM-127-SSA1-1994 Mod. 2000, establece un límite para agua potable de: Sólidos disueltos 1000 mg/L Sodio 200 mg/L	Es necesario confirmar la calidad esperada en el LTX con un estudio de sedimentos e hidrodinámica del lago que simule la interacción del agua residual tratada con los sedimentos, la flora y la fauna del lago en las condiciones futuras del Proyecto Integral LTX.
Tiempo de residencia	Mínimo 2 meses (EPA, 2012 y WHO, 2017) Al inicio de operación tiene que ser al menos de 6 meses (DDW, 2018)	Se deberá asegurar un volumen de agua en los lagos 3 y 4S de al menos 6.2 hm^3 en la Etapa 1 y de 17.8 hm^3 en la etapa final, cuando se alcance una producción de agua potable de 1000 L/s.
Factor de dilución	Puede variar del 1% hasta el 30% del volumen disponible (Rodriguez et al., 2009).	Se recomienda ingresar una fuente natural de agua de excelente calidad al lago, para diluir el agua recuperada de la PTAR. En caso de no ser posible, se deberá mantener un TRH en el lago cercano a 6 meses.

Concepto	Criterios Internacionales	Recomendación
Funcionamiento y monitoreo del embalse	El monitoreo de la calidad del embalse y la planta potabilizadora deberá ser continuo (contar con un monitoreo en línea).	Se propone arrancar la PTAR y monitorear la calidad del agua del lago.

3.7.5 Tecnologías recomendadas

Conforme a lo indicado en secciones previas de este capítulo, los proyectos de reúso indirecto en potabilización que han sido planeados consideran las siguientes premisas para el establecimiento de los trenes de tratamiento:

- El reservorio utilizado como buffer ambiental cuenta con agua de alta calidad que requiere tratamientos menos intensivos para su potabilización.
- El reservorio natural recibe escurrimientos naturales de alta calidad.
- El reservorio se encuentra protegido de escorrentías que puedan contaminarlo.
- Las descargas que llegan a la planta de agua residual son controladas por un régimen estricto de permisos.

Las premisas anteriores obligan a que el agua utilizada como fuente de aumento tengan una calidad controlada que puede ser incluso superior a la encontrada en el reservorio (Singh, 2015).

Como ha sido indicado en la sección 3.4 de este capítulo, el reúso potable indirecto se ha aplicado en algunas localidades de Estados Unidos de América desde hace ya varias décadas, de forma similar en Singapur, Australia y buena parte de Europa (Rodriguez, Buynder, Lugg, & Blair, 2009).

El aporte de agua residual tratada como fuente de abastecimiento, aumento o mantenimiento del reservorio o acuífero va del 1 hasta el 30% del volumen disponible (Rodriguez, Buynder, Lugg, & Blair, 2009).

Por medio de la PTAR se cubren las barreras 2 a 5 descritas en la Figura 115 y se prepara el agua para ser descargada en la séptima barrera que será el buffer ambiental, en este caso conformado por el lago Tláhuac-Xico.

La figura 5.1 ilustra las tecnologías disponibles para el tratamiento utilizadas en las principales plantas instaladas para el reúso indirecto recopilado en el Compendio de Reúso Potable de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (EPA, 2017).

Las tecnologías mencionadas en la Figura 116 logran el cometido de asegurar agua con calidad que incluso puede ser mejor que la del acuífero o fuente superficial natural utilizada como buffer ambiental.

También se han realizado estudios que permiten identificar la efectividad de los diferentes tratamientos en la remoción de contaminantes emergentes como subproductos de desinfección, disruptores endócrinos y trazas de farmacéuticos (Snyder, Wert, & Hongxia,

2007) que están contenidas en las aguas residuales pero no se encuentran aún reguladas bajo normas nacionales o internacionales y, sin embargo, son de interés por sus posibles efectos adversos sobre la salud pública (Rodriguez, Buynder, Lugg, & Blair, 2009).

Se confirma que para alcanzar remociones de estos contaminantes emergentes mayores al 90%, los tratamientos con membranas que llegan hasta Ósmosis Inversa son muy efectivos (Wintgens, Salehi, Hochstrat, & Melin, 2008). Sin embargo, tratamientos como la ozonación y adsorción en filtros de carbón activado biológicos (BAC) puede tener una eficiencia similar (Snyder, Wert, & Hongxia, 2007).

En las siguientes secciones del capítulo se revisarán diferentes opciones de procesos de tratamiento que pueden ser aplicables al proyecto de habilitación del lago Tláhuac-Xico basados en las experiencias internacionales, para el aprovechamiento de las aguas residuales como fuente de agua para recarga del lago y su reúso indirecto en potabilización, de tal forma que se convierta en una fuente sustentable de agua para la región.

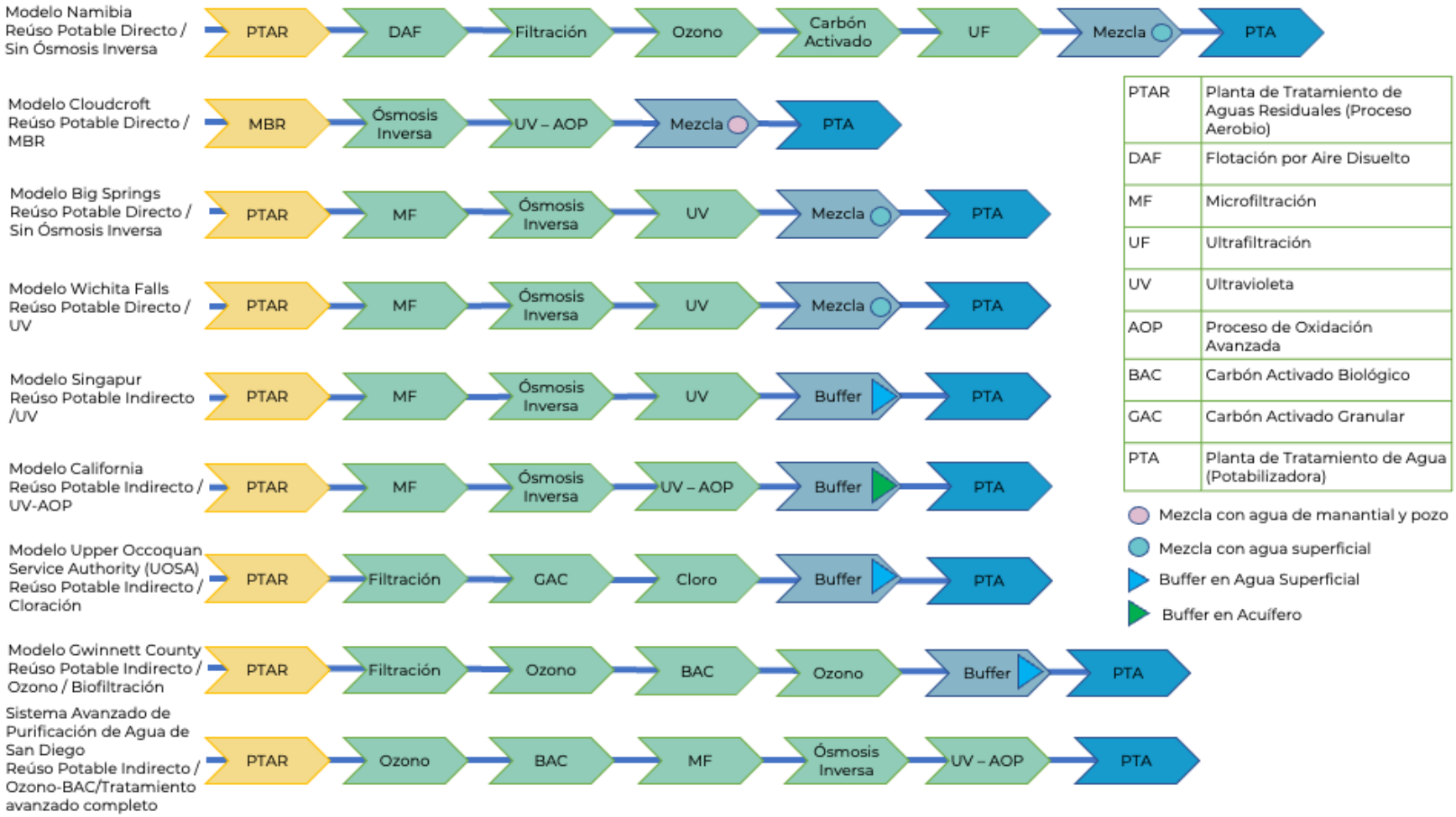


Figura 115. Ejemplos de trenes de tratamiento existentes a 2015

3.7.6 Adaptación de experiencias internacionales a México, Caso Lago Tláhuac-Xico

Considerando las experiencias internacionales previamente descritas, se identifica que la mayoría de las PTARs actualmente en operación para el reúso indirecto en potabilización cuentan con tratamiento secundario de tipo únicamente aerobio, no se considera un primer tratamiento anaerobio dado que la temperatura en los países desarrollados es menor y no favorece dicha tecnología. También se identificó que se encuentran instaladas en amplias extensiones de terreno y en la mayoría de los casos fuera de áreas urbanas, lo que facilita su construcción con menores limitantes de terreno disponible.

En el caso del lago TláhuacXico se considera relevante que la presente evaluación incluya el uso de tecnologías anaerobias acopladas al uso de tecnologías aerobias compactas que permitan optimizar el uso de terrenos y validar sus aportes respecto a la calidad de agua obtenida y sus costos de construcción y operación, además del posible beneficio adicional de generación de energía eléctrica derivada de la generación de metano en el proceso anaerobio.

La figura 111 muestra de forma general las operaciones que podrían incluirse en los trenes de tratamiento para las PTAR del lago Tláhuac-Xico. Dichas operaciones unitarias pueden combinarse de diferentes formas para establecer diferentes opciones de trenes de tratamiento que permitan obtener una alta calidad de agua residual tratada que sea apta para su reúso indirecto en potabilización.

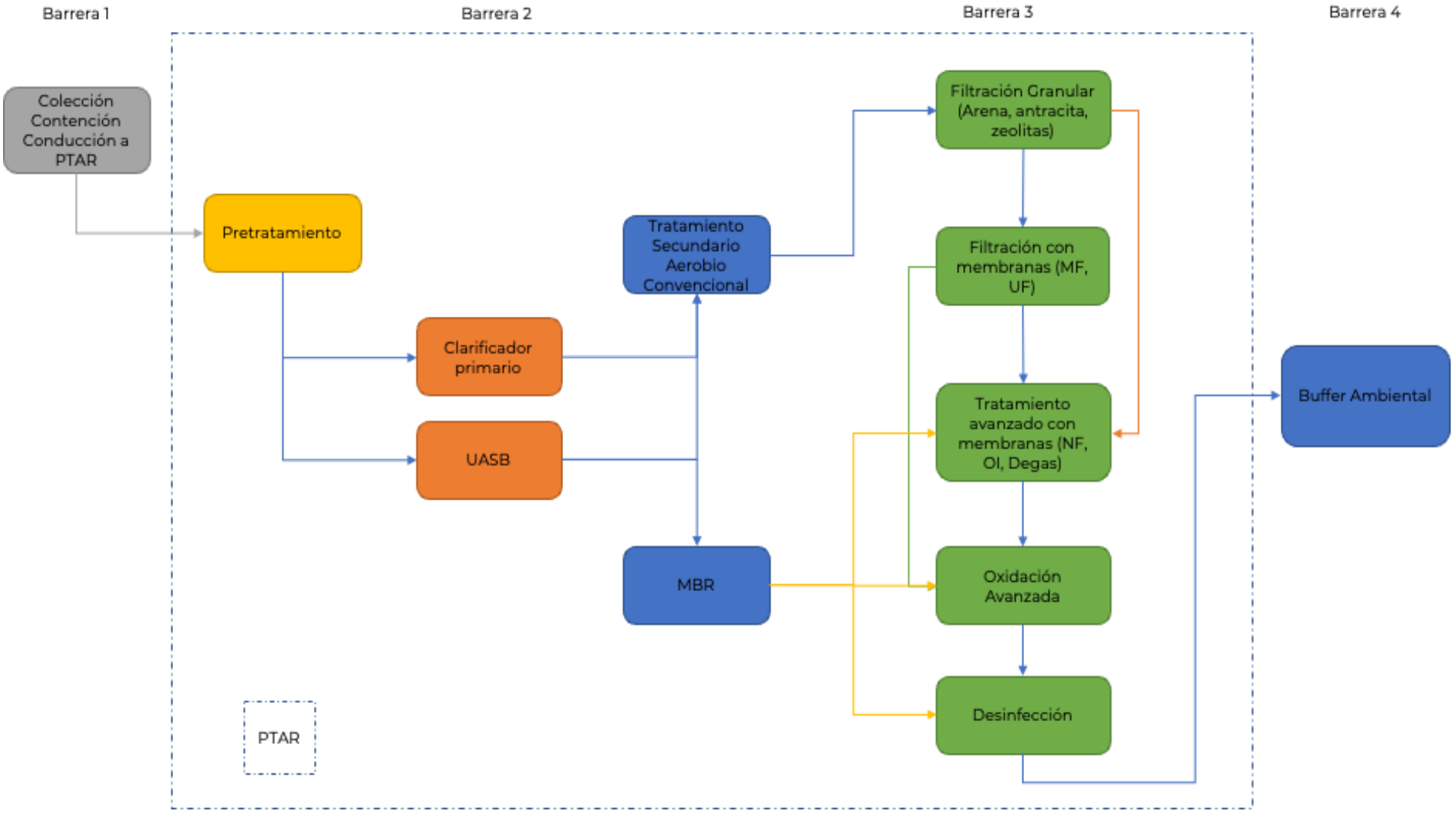


Figura 116. Diagrama de Bloques de Posibles Esquemas Generales de Tratamiento para Reúso en Potabilización

3.7.7 Riesgos del proyecto

Como parte de la ruta de decisión hacia la definición del tren de tratamiento se plantean los riesgos que deben ser considerados para establecer las condiciones sobre las que se espera la operación del lago Tláhuac-Xico y que permitirán habilitarlo como una fuente de reúso indirecto para potabilización.

Entre los riesgos identificados en la región para la integración de sistemas avanzados de tratamiento para el aumento de reserva utilizando el lago Tláhuac-Xico como buffer ambiental se encuentran los siguientes descritos en la Tabla 73. Riesgos del proyecto y propuestas de solución.

Tabla 73. Riesgos del proyecto y propuestas de solución

Riesgo Identificado	Descripción	Solución Propuesta
Riesgos a la Salud Pública por contacto con agua contaminada	Las aguas residuales no tratadas o tratadas con calidad inadecuada pueden generar enfermedades si entran en contacto con la población	Análisis de la PTAR bajo un escenario (A) que es conservador, donde la calidad del efluente es mucho mejor que lo que especifica la normativa nacional para descarga a cuerpos de agua, y donde los humedales construidos como barrera de seguridad adicional ante escorrentías y posibles desestabilizaciones en la PTAR.
Descargas no controladas entrando a la PTAR	Potencialmente podrían recibirse descargas eventuales de instalaciones industriales ubicadas en la zona de Chalco o Tláhuac, lo que puede afectar el desempeño de las PTARs.	Reforzar la verificación de generadores de aguas residuales industriales y establecer parámetros de control regulares para su monitoreo y corrección. Lo cual se puede llevar a cabo instalando muestreadores automáticos, en dichas descargas, que permitan la verificación y el control de las mismas.
Fuente de agua residual no constante	El caudal y calidad del agua residual disponible para tratamiento puede ser muy variable, especialmente dependiendo de la época del año (presencia o no de lluvia).	Se deberá analizar la mejor solución para garantizar el caudal de aguas residuales tratadas hacia las plantas de tratamiento de aguas residuales (por otros). La PTAR deberá ser diseñada de manera flexible para tratar aguas más o menos concentradas, dependiendo de la época del año. Se recomienda realizar nuestros muestreos para confirmar bases de diseño.
Problemas operativos en la PTAR	Durante la operación de la PTAR se pueden presentar eventos que generen mala calidad den el agua tratada como: falla en alguno de los sistemas de tratamiento y sus equipos auxiliares, dosificaciones inadecuadas de productos químicos, fallas en los sistemas de monitoreo o en el suministro eléctrico	La PTAR deberá ser operada por personal calificado y deberá contar con planes de contingencia que minimicen los eventos indeseables y la emisión de agua sin la calidad suficiente al lago Tláhuac-Xico. Así como un monitoreo contante de las variables del proceso, que incluso puedan verificarse a control remoto.

Re-contaminación del agua tratada	Algunas fuentes de re-contaminación del agua tratada en el lago son: escurrimientos derivados del riego agrícola, actividad ganadera en las orillas del lago sin barreras de contención y descargas clandestinas por asentamientos poblacionales nuevos no regulados.	El PLTX debe contemplar el correcto aislamiento de las lagunas que se usarán como reservorios. Los asentamientos clandestinos y actividades que puedan contaminar el lago deberán ser prohibidos. La zona de humedales compondrá una barrera adicional para el tratamiento de estos escurrimientos.
Pérdida de área	Actualmente, en la zona 4 Norte del lago se realiza el relleno del terreno con cascajo para el desarrollo de asentamientos urbanos no regulados, esto no sólo causa pérdida de área disponible para el almacenamiento de agua (aún con la profundización de las demás secciones del lago) sino también el potencial de aumentar las posibles descargas de aguas residuales no tratadas al reservorio.	El PILTX debe incluir un plan social, técnico y económico para impedir los asentamientos irregulares.

3.8 Datos básicos de diseño de las PTAR en el PITLX

Para el establecimiento de los datos básicos de diseño preliminar para la evaluación de alternativas de tratamiento y la estimación del área requerida para la PTAR se toman las siguientes suposiciones:

3.8.1 Caudal

El caudal total de agua a tratar se ha establecido en hasta 1400 L/s; dividido en dos plantas, la primera planta denominada PTAR Tláhuac, ubicada al Suroeste, colindando con la Zona 3 consistirá en una planta de 400 L/s y la segunda planta denominada PTAR Chalco, de 800 L/s en una primera etapa con una posible extensión de 200 L/s adicionales en el futuro y ubicada en el Noreste, colindando con la Zona 4N, contará con cuatro módulos de 200 L/s cada uno más un módulo proyectado a futuro para 200 L/s. De la PTAR Chalco se derivará hasta 400 L/s de agua para riego; este caudal podrá variar dependiendo la época del año. Los flujos anteriores se resumen en la Figura 112.

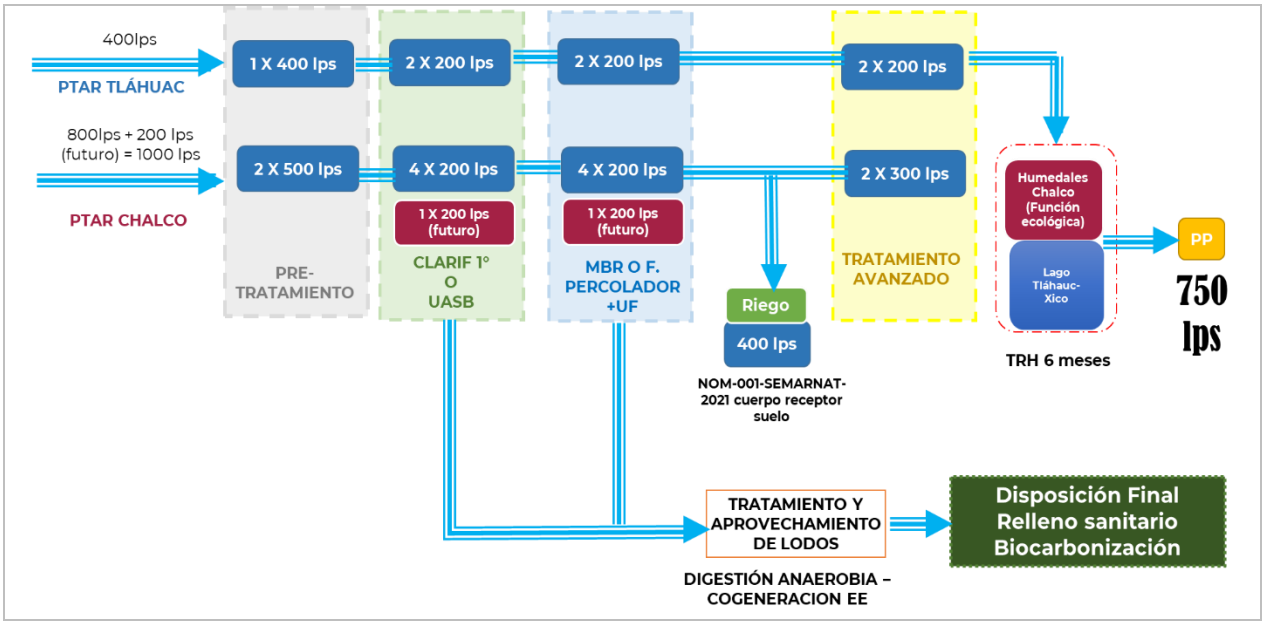


Figura 117. Balance del caudal generado en las PTAR

3.8.2 Fuentes de agua residual

El análisis de la colección y conducción del agua residual hasta las PTARs está fuera del alcance de este informe. Sin embargo, es importante considerar que **el agua residual que ingrese a las PTARs provendrán de canales de recolección de agua pluvial** (como el Canal General (CG)), **así como de drenajes combinados de agua residual y lluvias**, que convergen en las diversas plantas de bombeo y lumbreras, algunas de las cuales se muestrearon, como: Lumbrera 2 (L2), Lumbrera 4 (L4), Planta de Bombeo 7 (PB7) y Planta de Bombeo La Caldera (PB C), todas ellas ubicadas del lado de la PTAR Chalco. **No se realizaron muestreos de las aguas del lado del Valle de Tláhuac,** pero se sabe que la fuente de agua también provendrá de un drenaje combinado, la Planta de Bombeo El Serpentino**.** Se recomienda realizar una caracterización de la misma. De manera tentativa, se asume que las aguas residuales del Valle de Chalco y Tláhuac tienen características similares.

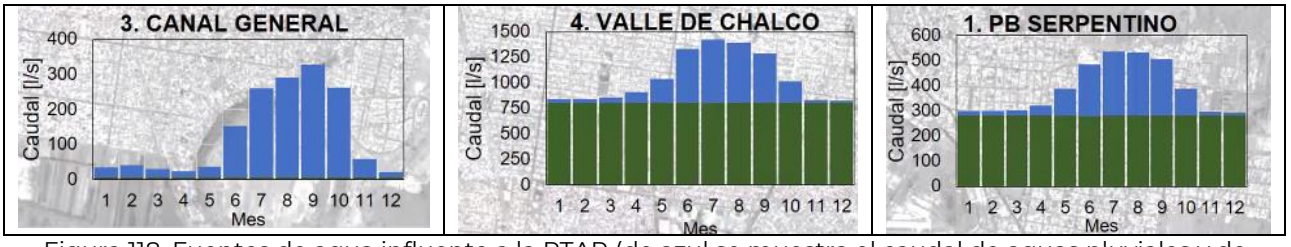


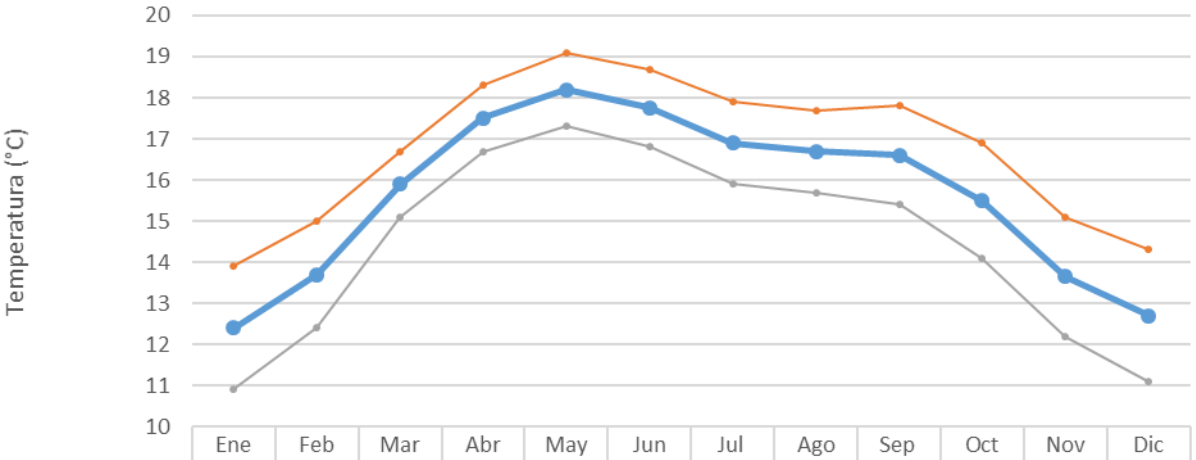
Figura 118. Fuentes de agua influente a la PTAR (de azul se muestra el caudal de aguas pluviales y de verde las aguas residuales que reciben). Fuente: (CONAGUA, 2022).

3.8.3 Temperatura del sitio y del agua residual.

Para estimar la temperatura ambiental en el Lago Tláhuac-Xico se realizó un promedio de las temperaturas históricas de las localidades de Tláhuac y Chalco (de 1951 a 2010), obtenido del

SMN (Sistema Metereológico Nacional, 2022). De acuerdo con los datos aquí obtenidos, se encontró que la temperatura del sitio es la siguiente:

- Temperatura ambiental normal en invierno: 12.9°C
- Temperatura ambiental normal en verano: 17.8 °C
- Temperatura ambiental normal promedio: 15.6°C



	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PROMEDIO	12.4	13.7	15.9	17.5	18.2	17.75	16.9	16.7	16.6	15.5	13.65	12.7
Tláhuac	13.9	15	16.7	18.3	19.1	18.7	17.9	17.7	17.8	16.9	15.1	14.3
Chalco	10.9	12.4	15.1	16.7	17.3	16.8	15.9	15.7	15.4	14.1	12.2	11.1

Figura 119. Temperatura media normal en LTX (promedio de Tláhua y Chalco)

Para el cálculo de reactores biológicos se recomienda emplear la temperatura del agua residual en invierno (Metcalf & Eddy, 2014), la cual suele ser de 2 a 4 °C por encima de la temperatura ambiental, aunque puede variar significativamente, dependiendo del horario, tipo de actividades económicas, y cercanía de la PTAR a los puntos de descarga de agua residual.

Como se describió en la sección 3.6.1., el 31 de enero, así como 2 y 4 de febrero de 2022 se realizaron análisis en campo (temperatura, pH, etc.) de muestras puntuales -tomadas a las 7, 11 y 15 h, de posibles fuentes de agua residual como el Canal General (CG), Lumbrera 2 (L2), Lumbrera 4 (L4), Planta de Bombeo La Caldera (PB C) y Planta de Bombeo 7 (PB7). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.5, donde se observa que la temperatura del agua osciló entre 14.4°C y 27.9°C; sin embargo, las muestras puntuales no se tomaron en horarios nocturnos, la cual es la condición más desfavorable en cuanto a la temperatura del agua residual.

Con base en lo anterior y para realizar un diseño conservador de la PTAR, se asumió una temperatura de diseño del agua residual de 15°C.

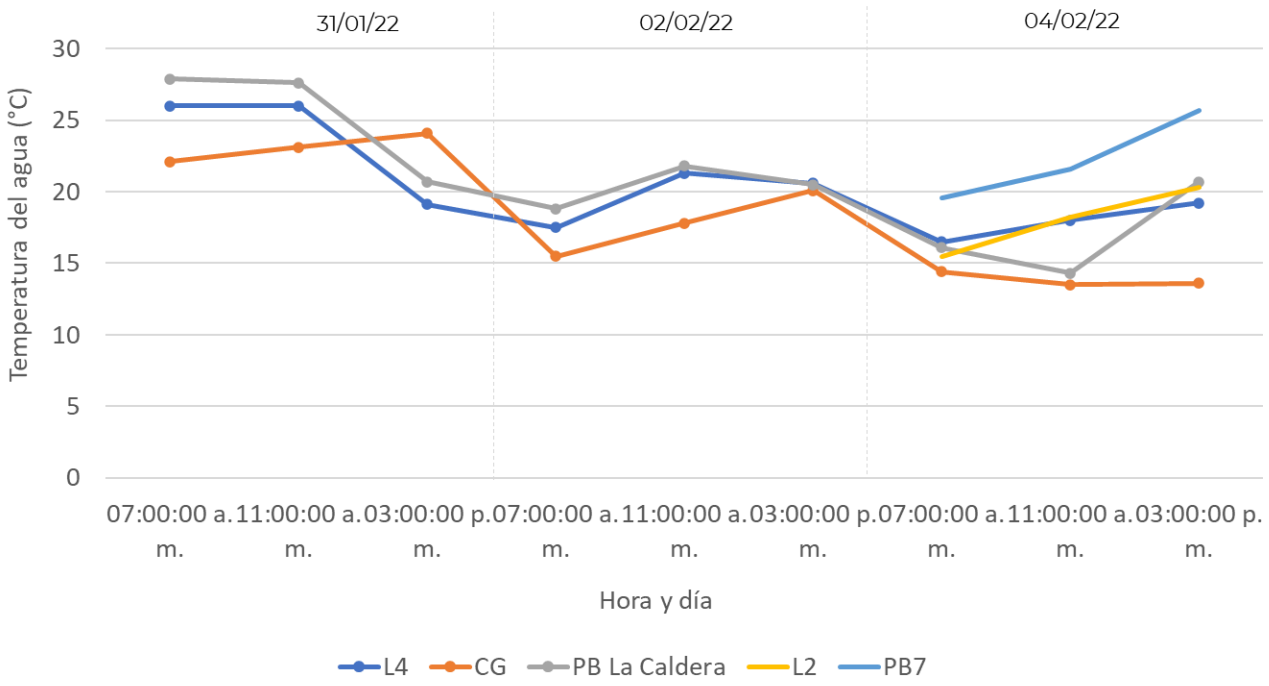


Figura 120. . Temperatura del agua durante campaña de muestreo

3.8.4 Calidad del Agua Influente

Para establecer la calidad del agua influente de la PTAR se realizó un análisis estadístico de los resultados del muestreo realizado y descrito en el Capítulo 4.2 de este informe. Se asumió que el agua residual que se recibirá de Tláhuac será similar a la que se muestreó en Chalco. Para calcular los valores de diseño, se consideró un 85% de probabilidad en las concentraciones.

Las bases de diseño en cuanto a concentraciones de materia orgánica y nutrientes en el influente a la PTAR se muestran en la Tabla 74.

Tabla 74. Bases de diseño propuestas para TDRs de PTAR Chalco y Tláhuac

		Mínimo en lluvias Promedio, con dilución 1:2 por lluvia	**Promedio L2/PB7/L4**	**Diseño (85% probabilidad)**	**Máximo diario**
Parámetros	Fecha	0.50		Z= 1.03	
Físicos					
pH	UpH	6.80	7.40	7.64	7.70
DBO5 TOTAL	mg/L	106.60	213.20	291.02	414.00
DQO TOTAL	mg/L	223.57	447.14	550.76	865.00
DQO SOLUBLE	mg/L	148.01	296.02	330.26	392.10
GRASAS Y ACEITES	mg/L	10.07	20.14	26.71	86.66
SÓLIDOS					

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/L	79.30	158.60	171.96	625.00
SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES	mg/L	51.40	102.80	114.21	350.00
SSV/SST		0.33	0.65	0.73	0.73
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	mL/L-h	0.39	0.78	1.28	2.50
NUTRIENTES					
NITRÓGENO AMONIACAL	mg/L	20.74	41.47	44.36	57.41
NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL	mg/L	27.82	55.64	58.46	73.34
NITRÓGENO TOTAL	mg/L	30.40	60.80	65.38	74.05
FOSFORO TOTAL	mg/L	3.24	6.47	7.16	25.63
DUREZA Y ALCALINIDAD					
ALCALINIDAD TOTAL	mg/L ($CaCO_3$)	311.12	622.24	672.12	690.00
DUREZA TOTAL	mg/L ($CaCO_3$)	140.43	280.85	306.18	306.18
CALCIO TOTAL	mg/L	22.68	45.36	51.51	53.80
MAGNESIO TOTAL	mg/L	20.47	40.94	44.43	45.80
OTROS					
SULFATOS	mg/L	60.19	120.84	151.14	164.8
SULFUROS	mg/L	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04

Notas:

- Se asume que el valor típico de las aguas residuales que llegarían a la PTAR Chalco es equivalente al promedio del agua en L2, PB7 y L4.
- Se calculó la desviación estándar de los resultados en los puntos L2, PB7 y L4. Al valor promedio se le sumó la desviación estándar multiplicada por un factor Z de 1.03 (ver figura 2). El resultado representa un valor en la campaña de Gauss en el cual se espera (por probabilidad) que el 85% de las concentraciones del agua residual tengan un valor igual o menor a dicho valor, el cual sería la concentración de diseño.
- Se asume que en época de lluvia, las concentraciones de materia orgánica y nutrientes en el agua residual podría disminuir en un 50%, esto debido a que el drenaje de Chalco es combinado y, adicionalmente, el Canal General (mayormente pluvial) será fuente de abastecimiento de agua durante la temporada de lluvia. Ver Figura 3.
- Se asume que la concentración máxima de las muestras compuestas será aquella proveniente de PB La Caldera.

3.8.5 Calidad del Agua Efluente

3.8.5.1 ESCENARIO A

El objetivo de la PTAR es generar agua residual tratada de excelente calidad de acuerdo con la clasificación ICA para cuerpos superficiales, tal y como se recomienda en los lineamientos internacionales, por lo que se incluye tratamiento avanzado para reducir riesgos sanitarios asociados a la presencia de contaminantes emergentes (CEs). El agua para riego (cumpliendo NOM-001-SEMARNAT-2021 para reúso en suelo) se derivaría antes del tratamiento avanzado para su reúso, el resto del agua tratada continuaría su tratamiento avanzado antes de ser descargado a los humedales.

Se asume que los humedales forman parte del volumen del reservorio del LTX, el cual deberá asegurar seis (6) meses de tiempo de residencia en éste. Los humedales servirían para mejorar el paisaje y la aceptación social del proyecto, ofrecerán un servicio ambiental al atraer fauna y ser un espacio para aves migratorias así como también servirán para contener los asentamientos no planificados y el relleno de cascajo (con la consecuente contaminación) del lago en la zona norte. Adicionalmente, se asume que los humedales remediarán la re-contaminación del agua derivada de la fauna atraída, actividades recreativas aledañas y podría funcionar como una barrera ante eventuales problemas de operación de la PTAR.

3.8.5.2 ESCENARIO B

El objetivo de la PTAR es remover parcialmente el fósforo, nitrificar y con respecto a los parámetros de materia orgánica cumple con la normativa mexicana para descarga a cuerpos de agua superficiales (NOM-001-SEMARNAT-2021). Al finalizar todo el tratamiento, después de la filtración y desinfección, el agua podrá usarse tanto para riego (cumpliendo NOM-003-SEMARNAT-1997 para reúso con contacto directo) o bien para descarga a los humedales del LTX.

Se asume que los humedales se encargarían del pulimiento final y tendrían la función de desnitrificar, remover fósforo, patógenos, CEs y pulir el agua residual tratada hasta una calidad excelente (clasificación ICA).

NOTA:
Se llegó a considerar un Escenario C, donde las PTARs tendrían en su última etapa un filtro percolador (una etapa) para remoción de materia orgánica. La función de los humedales sería de mayor importancia en el pulimiento del agua, deberían reducir la materia orgánica, nitrificar y desnitrificar para remover nitrógeno, filtrar SST así como remover patógenos. El Escenario C se eliminó debido a que dentro del área disponible los humedales no tienen la capacidad ni robustez para asegurar de una forma técnica y económicamente viable la remoción de materia orgánica, nitrificación-desnitrificación, desinfección, etc., de un flujo tan elevado de agua residual que debe asegurar a una excelente calidad.

En la Tabla 75 se comparan los parámetros límite en la normativa nacional

Tabla 75. Parámetros límite en la normativa nacional

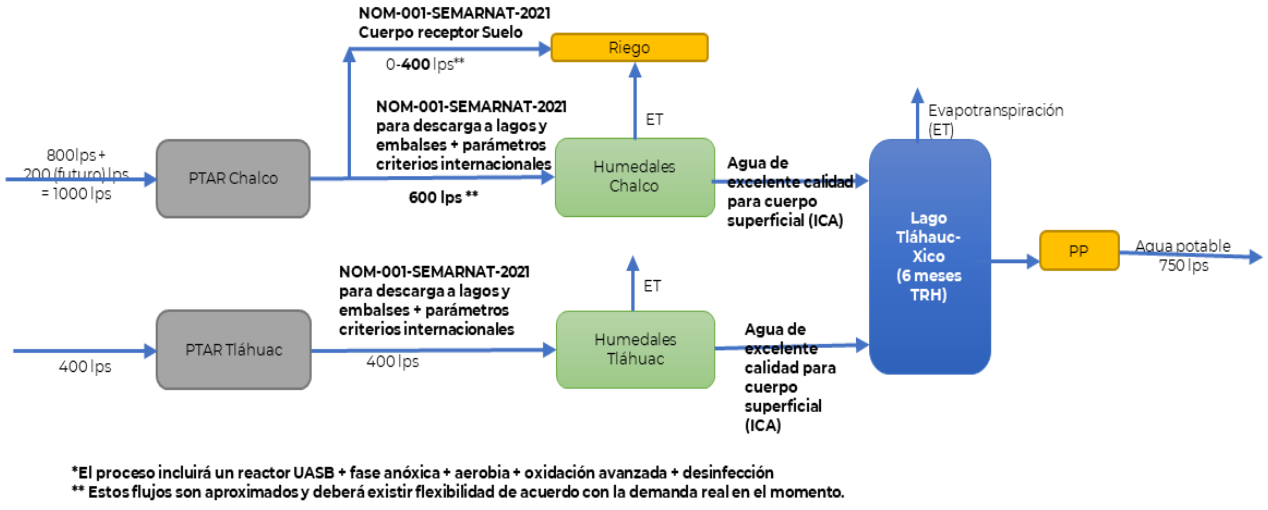
Parámetros	Parámetros límite en la normativa nacional	Bases de diseño para el agua residual tratada descargada a los humedales

	Cuerpo de agua superficial con calidad excelente (ICA)	Parámetro límite de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descarga a lagos y embalses	NOM-003-SEMARNAT-1997 para reúso con contacto directo	Escenario A	Escenario B
Demanda Química de Oxígeno	≤10	≤100	NA	≤10	≤100
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	≤3	NA	≤20	≤3	≤20
Sólidos suspendidos totales	≤25	≤20	≤20	≤3	≤20
Grasas y aceites	NA	≤15	≤15	≤1	≤15
Nitrógeno total*	NA	≤15	NA	≤10	≤15*
NTK*	NA	NA	NA	≤2	≤7*
Fósforo total*	NA	≤5	NA	≤1	≤5*
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	≤1	≤1	≤1
Coliformes fecales (UFC/100mL)	≤100	NA	≤240	≤100	≤240
Escherichia coli, (NMP/100 ml)	≤126	≤250	NA	≤126	≤250
Toxicidad aguda (UT)	NA	2 a los 15 minutos de exposición	NA	NA	2 a los 15 minutos de exposición
Compuestos emergentes	NA	NA	NA	≤0.1 ppb	NA

*Nota: Los nutrientes (nitrógeno y fósforo) son de utilidad para el agua de riego y para el crecimiento de los humedales, sin embargo, los humedales no estarán diseñados para nitrificar, pero sí para desnitrificar. Por lo tanto, se requiere que la PTAR lleve a cabo la nitrificación y disminuya el nitrógeno no oxidado (NTK) hasta un nivel menor a 7 ppm. La desnitrificación y la remoción de fósforo, para cumplir la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descarga a lagos y embalses, será empleada (sólo en caso necesario) en los trenes de agua que descarguen a los humedales, no en el agua que se reúse para riego. Los trenes de tratamiento deberán de contar con esta flexibilidad en cuanto a la remoción de nutrientes en el agua.

3.8.6 Modulación del sistema

Las siguientes figuras muestran la modulación propuesta para el sistema de tratamiento en los dos Escenario (A y B), de tal manera que sea fácilmente replicables estos módulos tanto en la PTAR Chalco como en la PTAR Tláhuac, sea práctica la derivación del agua residual para los sistemas de riego, y se facilite el crecimiento a futuro de la PTAR.



*El proceso incluirá un reactor UASB + fase anóxica + aerobia + oxidación avanzada + desinfección
** Estos flujos son aproximados y deberá existir flexibilidad de acuerdo con la demanda real en el momento.

Figura 121. Modulación de las PTARs en el Escenario A

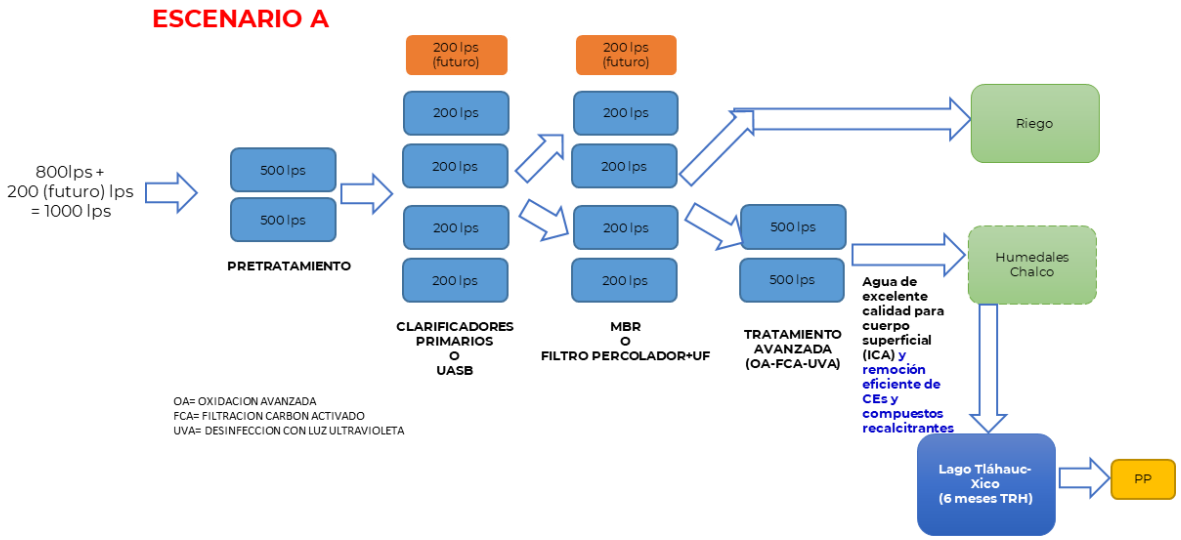
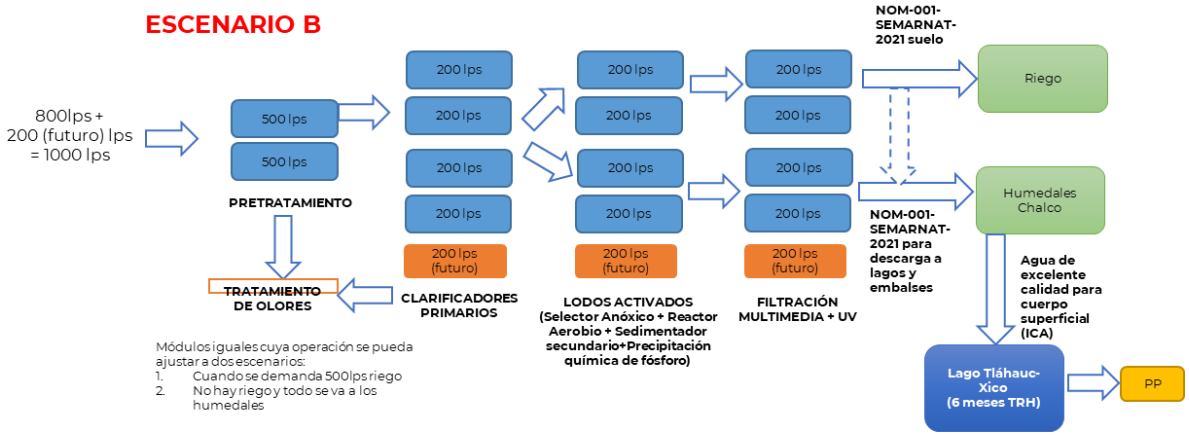


Figura 122. Modulación de las PTARs en el Escenario B



Área disponible

Se cuenta con dos ubicaciones con las siguientes áreas disponibles:

Tabla 76. Ubicación y capacidad de las PTARs

Ubicación	Capacidad a instalar	Área Disponible Aproximada (ha)
Laguna 4N	800 L/s (4 módulos x 200 L/s) + (1 módulo 200 L/s)	9.2
Laguna 3	400 L/s	5.1

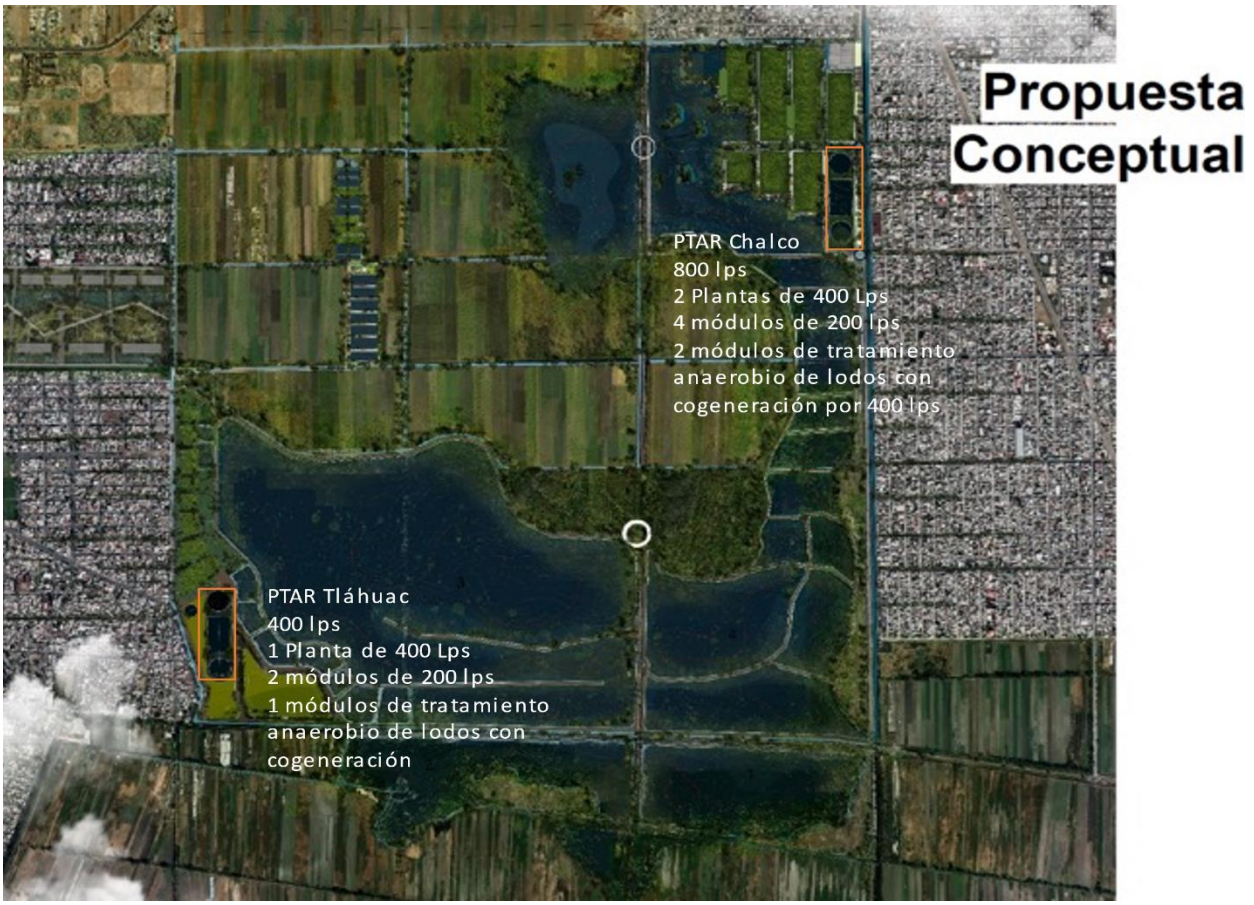


Figura 123. Ubicaciones propuestas para PTARs lago Tláhuac-Xico

El tren de proceso de tratamiento de las alternativas a evaluar se ha preseleccionado considerando el objetivo de la PTAR y la restricción del área disponible.

3.8.7 Pre-Selección del Proceso

El proceso del tren de tratamiento de las alternativas a evaluar se ha preseleccionado considerando el objetivo de la PTAR, la restricción del área, así como la complejidad requerida para la operación.

3.8.7.1 Trenes de tratamiento de Referencia para el Escenario A

Para la preselección de los trenes de tratamiento, se toman como referencia dos de los modelos estudiados mostrados en el Capítulo 3; modelo Gwinnett County utilizado en Georgia, Estados Unidos de América (Tratamiento avanzado sin Ósmosis Inversa) (Funk,Bell &Hooper) y el sistema de plantas NEWater, de Singapur (Tratamiento avanzado con Ósmosis Inversa) (PUB SIngapore Water Authority).

Los trenes de referencia llevan a cabo el tratamiento conforme a lo siguiente.

Tabla 77. Trenes de tratamiento de referencia

Planta	Gwinnett County	NEWater

Tratamiento Primario	Clarificación primaria	Clarificación primaria
Tratamiento Secundario	Lodos Activados (Lodos activados completamente mezclados + clarificador Secundario)	Lodos Activados (Lodos activados completamente mezclados + clarificador Secundario)
Tratamiento Avanzado	Clarificación Química Ultrafiltración Pre-Ozonación Filtración con Carbón Activado Desinfección con Ozono	Microfiltración/ Ultrafiltración Ósmosis inversa Desinfección ultravioleta

Se toman estos dos casos como referencia pues ambas plantas se utilizan como fuentes de recarga de cuerpos de agua superficiales y posteriormente se toma agua de dichos cuerpos para ser potabilizada en plantas potabilizadoras independientes.

Uno de los problemas principales de utilizar ósmosis inversa como parte del tratamiento es la generación de una corriente concentrada en sales. En el caso de NEWater, al encontrarse cerca de la costa, esta corriente es descargada sin mayores consecuencias en el mar. En el caso de Georgia, al encontrarse en el interior del continente no cuenta con esa facilidad, el riesgo de infiltración de esta corriente salobre o el tratamiento del rechazo se vuelve complicado por lo que se exploró una forma distinta de lidiar con los contaminantes emergentes por lo que se ha favorecido la aplicación de ozono y filtración biológica con carbón activado.

En ambas plantas previo al tratamiento final de ósmosis inversa u ozonación/filtración biológica, se hace uso de una Ultrafiltración para remover la mayor carga de sólidos y patógenos posibles y minimizar el riesgo de ensuciamiento de membranas o el consumo excesivo de Ozono.

Planteamiento del tren de tratamiento

Con base en las plantas de referencia se establece que el tren de tratamiento de la PTAR Tláhuac se puede dividir en las siguientes etapas:

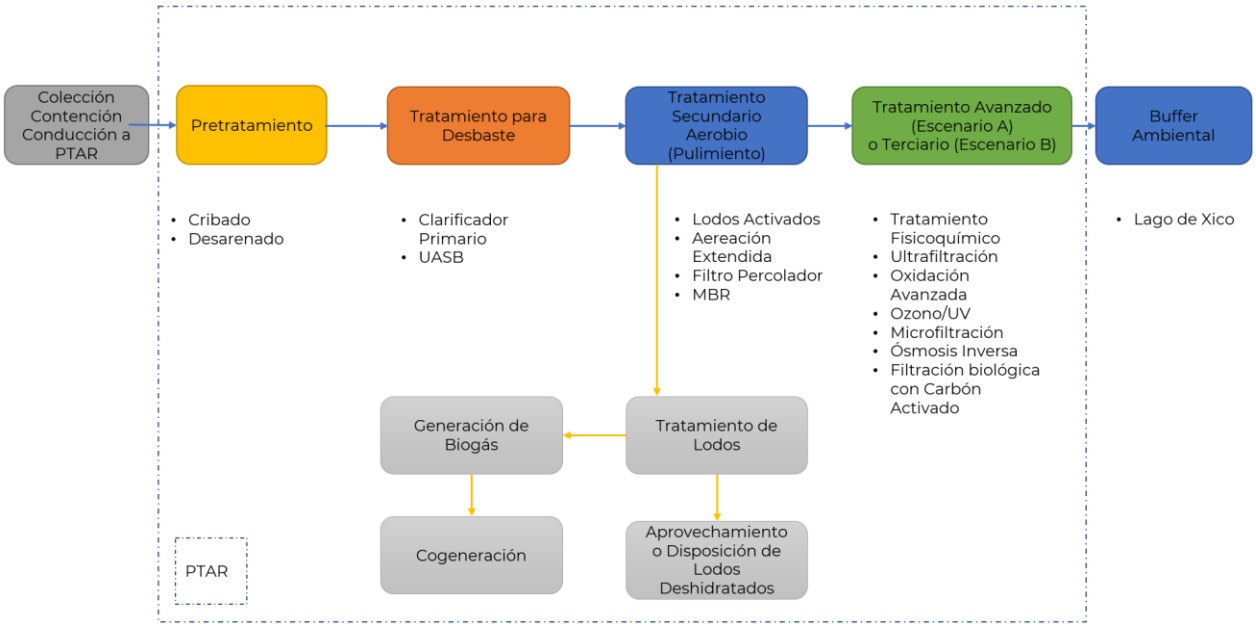


Figura 124. Tren general de tratamiento avanzado

Colección, Contención y Conducción de Aguas Residuales:

La colección de las aguas residuales se realiza en el Túnel del Canal General, el cual colecta las aguas residuales provenientes del Valle de Chalco y la cuenca del Río Amecameca y alimentará a la PTAR Chalco mientras que la PTAR Tláhuac será alimentada por aguas residuales colectadas en Tláhuac.

El proyecto de contención y conducción de las aguas residuales será realizado por el área de Estudios y Proyectos de la CONAGUA. Se menciona, de forma informativa, el alcance de dicho proyecto.

La contención de escurrimientos contaminantes actualmente ingresando al lago Tláhuac-Xico se realizará por medio de un canal perimetral que rodeará las secciones 3 y 4 Sur del lago, el cual conducirá las aguas recolectadas hacia el canal general.

La conducción de las aguas residuales hacia la PTAR se realizará tomando el agua desde algunas plantas de bombeo del túnel Canal General y acondicionando un canal de llegada a la PTAR.

Pretratamiento

El pretratamiento consiste en la separación de sólidos y partículas grandes que pueden dañar los equipos de proceso e interferir en el desempeño de la planta.

Las operaciones por realizar en este pretratamiento son el cribado grueso, cribado fino y desarenado-desengrasado.

Este paso permite eliminar los materiales insolubles de gran tamaño que pueden dificultar el tratamiento biológico, los sólidos separados, dependiendo de sus características serán clasificados y dispuestos conforme a la normativa aplicable.

Tratamiento de Desbaste

El tratamiento de desbaste puede llevarse a cabo ya sea por medio de un sedimentador primario (clasificado como parte de un tratamiento primario), el cual permitirá separar la materia orgánica particulada. El lodo recuperado en el fondo del sedimentador primario podrá ser aprovechado en la digestión anaerobia para la generación del biogás y su aprovechamiento en la cogeneración de energía.

Otra opción para el tratamiento de desbaste es la instalación de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB por sus siglas en inglés), que se clasificaría como parte del Tratamiento Secundario, en el que, además de separar la materia orgánica particulada, se desarrolle un lecho de lodos compuesto por microorganismos anaerobios que degradan parte la materia orgánica soluble. Lo anterior puede reducir aún más el tamaño y requerimientos de oxígeno del tratamiento secundario aerobio.

Tratamiento Secundario Aerobio

Se compararán dos sistemas de tratamiento aerobio: 1) Lodos activados (LA) o bien, 2) Filtro percolador (FP). En el caso del Escenario A donde se incluirá una ultrafiltración, el proceso de lodos activados será acoplado a un sistema de membranas sumergidas, dando como resultado un proceso biológico de membranas (MBR). Lo anterior permitirá la optimización del área para la PTAR.

Los sistemas LA se prefieren especialmente cuando la calidad del agua tratada sea muy estricta, como en aquellos casos donde se desea emplear el agua residual tratada con fines de reúso. Pueden ser diseñados y su operación controlada para remoción de nutrientes en el agua residual. Los FPs en cambio, se caracterizan por la sencillez en su operación y por reducir su costo operativo; sin embargo, son una solución tecnológica menos flexible y más vulnerable a declives en la temperatura ambiental.

En el caso de este proyecto, para alcanzar la calidad de agua requerida en cualquiera de los Escenarios, donde aparte de remover la materia orgánica se requiere de la nitrificación, será necesario instalar al menos dos FP en serie.

Para las opciones del escenario B, se considerará un proceso LA en régimen completamente mezclado (7 días de tiempo de residencia celular).

Tratamiento Avanzado (sólo Escenario A)

Se plantea que el tratamiento avanzado no incluya membranas de ósmosis inversa y, tomando la referencia el modelo de Gwinnett County, se plantea que el tratamiento avanzado se lleve a cabo por medio de las siguientes operaciones:

Tratamiento Fisicoquímico: Si no se alcanza la remoción de fósforo requerida a la salida del tratamiento secundario, será necesario precipitar el fósforo y lograr su remoción ya sea añadiendo el químico para precipitación en el tanque de membranas del MBR o en el clarificador secundario del Filtro Percolador.
Ultrafiltración: Las membranas de ultrafiltración reducen los sólidos suspendidos totales, así como evitan el paso de patógenos y ayudan en la remoción del fósforo si este se encuentra suspendido en el agua residual tratada.
Ozonación: La ozonación cumple dos propósitos, desinfectar el agua y lograr la destrucción de componentes recalcitrantes y emergentes por medio de oxidación.
Filtración Biológica sobre Carbón Activado (sólo en caso de no existir humedales en el lago LTX): Un lecho de carbón activado en el que se promueve actividad biológica permite la descomposición continua de los compuestos emergentes que pudieran estar remanentes en el efluente secundario. La tasa de remoción se estima conforme a lo identificado por Snyder en donde se observan remociones mínimas del 80% para los diferentes compuestos emergentes como farmacéuticos y disruptores endócrinos (Snyder, Wert, & Hongxia, 2007).
Desinfección UV: La desinfección final por medio de luz Ultravioleta permite asegurar que el efluente utilizado para recargar el lago, será seguro para el contacto directo.
En el caso que los análisis de calidad del agua derivados del muestreo revelen que existe alta salinidad en las aguas residuales, será recomendable revisar una alternativa adicional en la que se aplique la ósmosis inversa como parte del tratamiento avanzado.

Tratamiento Terciario (sólo para Escenario B)

Si sólo se deseara cumplir con la normativa nacional, sería necesario un tratamiento terciario para remoción de sólidos suspendidos y desinfección que consistiría en los siguientes procesos:
Filtración a gravedad: Para remover los sólidos suspendidos hasta un rango menor a 20mg/L con el menor costo operativo posible.
Desinfección UV: La desinfección final por medio de luz Ultravioleta permite asegurar que el efluente utilizado pueda ser reusado con contacto directo (NOM-003-SEMARNAT-1997). Cabe mencionar que la UV tiene una mayor eficiencia entre menos sólidos suspendidos contenga el agua residual tratada, con un máximo de 30mg/L a la entrada.

Sistema para control de Olores

Debido a que las plantas se encontrarán ubicadas dentro del área de interés de recorrido por los visitantes al Lago Tláhuac-Xico y cerca de centros de población, es necesario contar con sistemas de control y eliminación de olores que permitan evitar la emisión de los mismos a las áreas circundantes.

3.8.8 Trenes de Proceso Propuesto

Conforme a los criterios de pre-selección mencionados en la sección anterior, se plantean dos posibles opciones para integrar los trenes de tratamiento para el escenario A, cada una con dos posibilidades de remoción de sólidos primarios para un total de cuatro. Estas opciones se describen en las siguientes subsecciones de este documento.

Para cada opción se presenta un perfil de remoción típico para fines informativos y de comparación, sin embargo, los valores finales dependerán de las concentraciones confirmadas por los análisis obtenidos a partir de los muestreos realizados en el lago.

Para el escenario B se presentan 2 opciones de tratamiento que cumplirán con el requerimiento de calidad de agua para Reúso con Contacto Directo indicadas en la NOM-003-SEMARNAT-1997 requeridas por los usuarios de riego y para los usos recreativos del lago.

3.8.8.1 Opción A1

El primer tren de tratamiento integra el tratamiento primario con un sedimentador y el tratamiento secundario por medio de lodos activados con proceso anóxico y membranas (MBR) conforme al siguiente diagrama de bloques:

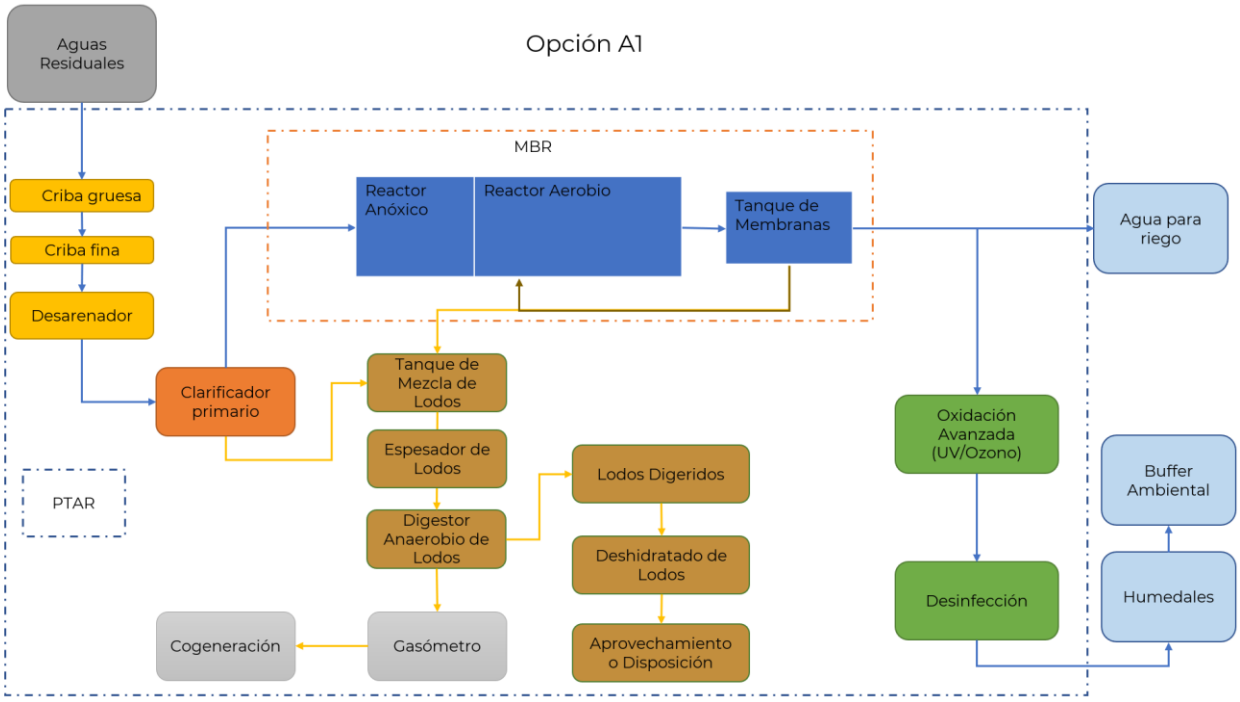


Figura 125. Opción de tratamiento A1

Este tren de tratamiento cuenta con un sistema de pretratamiento para remoción de sólidos grandes por medio de cribas gruesas y finas, así como desarenado-desengrasado.

El tratamiento primario se lleva a cabo en un clarificador primario que permite minimizar la materia orgánica particulada ingresando al tratamiento aerobio, de tal forma que se pueda llevar a cabo la degradación de la materia orgánica y los contaminantes solubles de manera más eficiente.

El tratamiento secundario consta de un sistema anóxico-aerobio para lograr la degradación de la DBO así como la remoción biológica de nitrógeno. Para alcanzar la calidad requerida en el efluente de la planta podría ser necesaria la adición de químicos para lograr la precipitación de fósforo.

Los lodos generados en el proceso biológico serán separados por medio de un sistema de membranas sumergidas (MBR). Este sistema reduce el área de la planta al eliminar la necesidad del clarificador secundario y un sistema de filtrado adicional.

El tanque de membranas puede ser ubicado de tal forma que sea independiente de las áreas de actividad biológica, de tal forma que en caso de requerir mantenimiento se pueda realizar sin interferir el proceso.

Posteriormente, el efluente tratado del MBR es enviado a un sistema de oxidación avanzada por medio de la inyección de ozono y catalizado por irradiación de luz ultravioleta; el ozono al ser un oxidante potente cuenta con la capacidad de destruir moléculas complejas y que estas puedan ser removidas del agua en las siguientes etapas del proceso.

El agua sometida a oxidación es enviada a un sistema de filtración de carbón activado biológico, en el que se promueve el desarrollo de actividad biológica en el lecho de carbón activado, esto permite que los microorganismos terminen la degradación de la materia orgánica remanente o resultante del proceso de oxidación química al mismo tiempo que por medio de adsorción son retenidos los contaminantes recalcitrantes (Zhu & Otros Autores, 2020). Este filtro no será necesario si se asume que los humedales realizarán la filtración final.

Como último paso de garantía de no emisión de patógenos al lago, se contará con un sistema de desinfección por medio de luz UV, con lo que también se evita la emisión de químicos adicionales.

Con los tratamientos previos se busca garantizar que la calidad del agua cumpla al menos con lo indicado en la Tabla 75; también se cumple con la remoción de nutrientes, lo cual que reduce las posibilidades de eutrofización y re-contaminación del lago. Es importante mencionar que el paso de nutrientes puede generar la necesidad de mayores cantidades de oxidantes en los procesos de oxidación avanzada por lo que se recomienda alcanzar la mayor remoción posible en el sistema biológico. La eliminación de compuestos recalcitrantes y emergentes, sumados al tiempo de residencia en el lago de al menos 6 meses en el reservorio ambiental permitirían considerar el efluente de estas PTAR como una fuente segura para su posterior uso indirecto en potabilización si se cumplen los criterios descritos en los capítulos de normalización y la descripción de la planta potabilizadora indicada en el capítulo 6.

Los lodos generados en los tratamientos primario y secundario serán enviados a un tratamiento de digestión anaerobia para su estabilización previo a su deshidratación para minimizar el volumen. Este proceso genera biogás, el cual podrá ser aprovechado para la cogeneración de energía y autoabastecer a la PTAR, disminuyendo los costos de operación.

Los lodos estabilizados resultantes cumplirán con la NOM-004-SEMARNAT-2002 para usos forestales, aprovechamiento en mejoramiento de suelo y uso agrícola.

Los sólidos generados en los procesos de separación del pretratamiento, serán enviados a disposición.

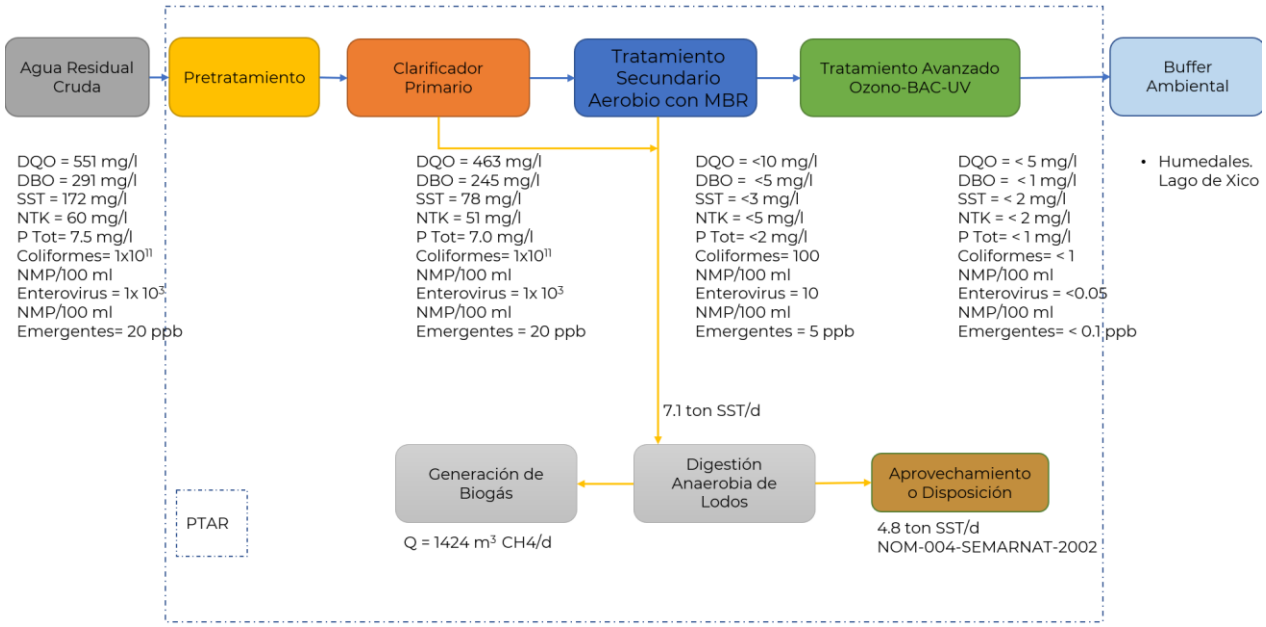


Figura 126. Perfil de remoción de contaminantes Opción de Tratamiento A1

Se puede observar que el efluente final cumplirá lo indicado en la tabla 5.6, parámetros de la calidad del efluente, de tal forma que la opción de tratamiento es válida para el objetivo buscado.

3.8.8.2 Opción A2

El segundo tren de tratamiento a evaluar integra el tratamiento inicial con un reactor anaerobio UASB y el tratamiento secundario por medio de lodos activados con MBR conforme al siguiente diagrama de bloques:

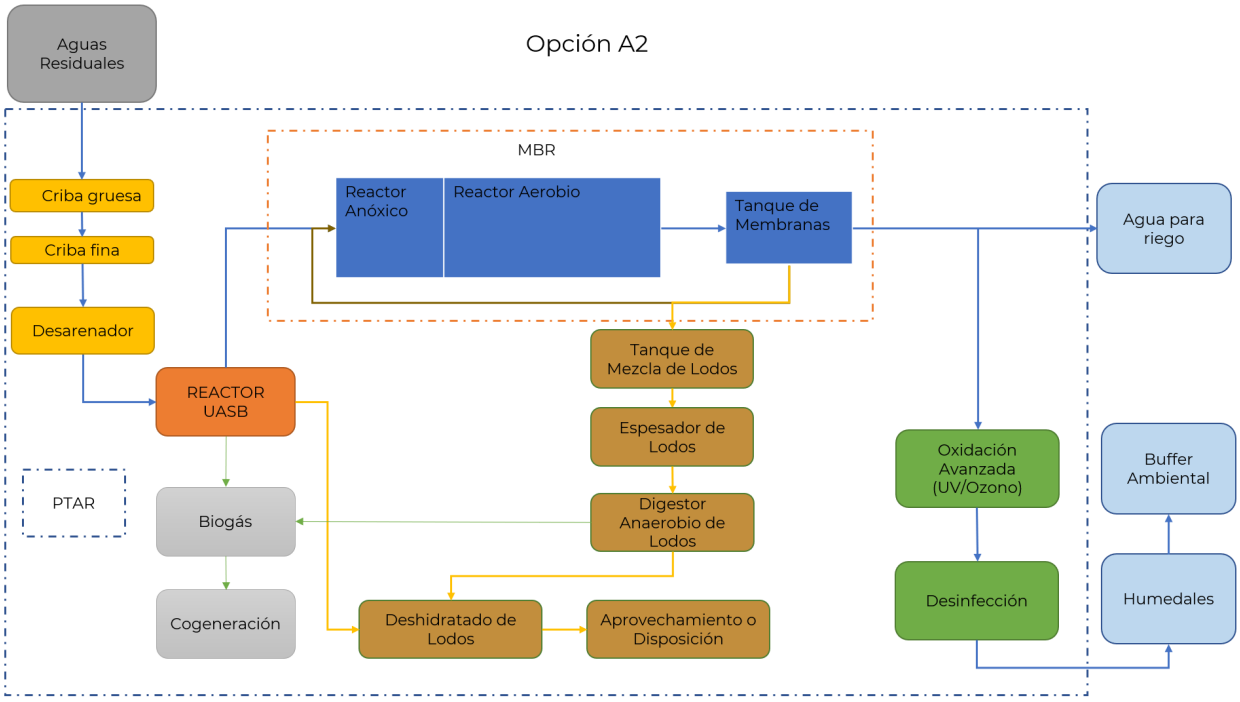


Figura 127. Opción de tratamiento A2

Este tren de tratamiento cuenta con un sistema de pretratamiento para remoción de sólidos grandes por medio de cribas gruesas y finas, así como desarenado-desengrasado.

En lugar de utilizar un clarificador primario para la remoción de materia particulada, se integra un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente, UASB, el cual, además de retener la materia particulada, genera biomasa anaerobia que ayuda a degradar esta materia orgánica particulada mientras se genera biogás.

La integración de un reactor UASB al tren de tratamiento debe permitir reducir los requerimientos energéticos del sistema aerobio, lo que puede ayudar a contar con una menor área de instalación y disminuir los costos operativos.

Los siguientes pasos del tratamiento de esta opción son iguales a los descritos para la opción A1. Se asume que los lodos purgados del reactor UASB ya están estabilizados.

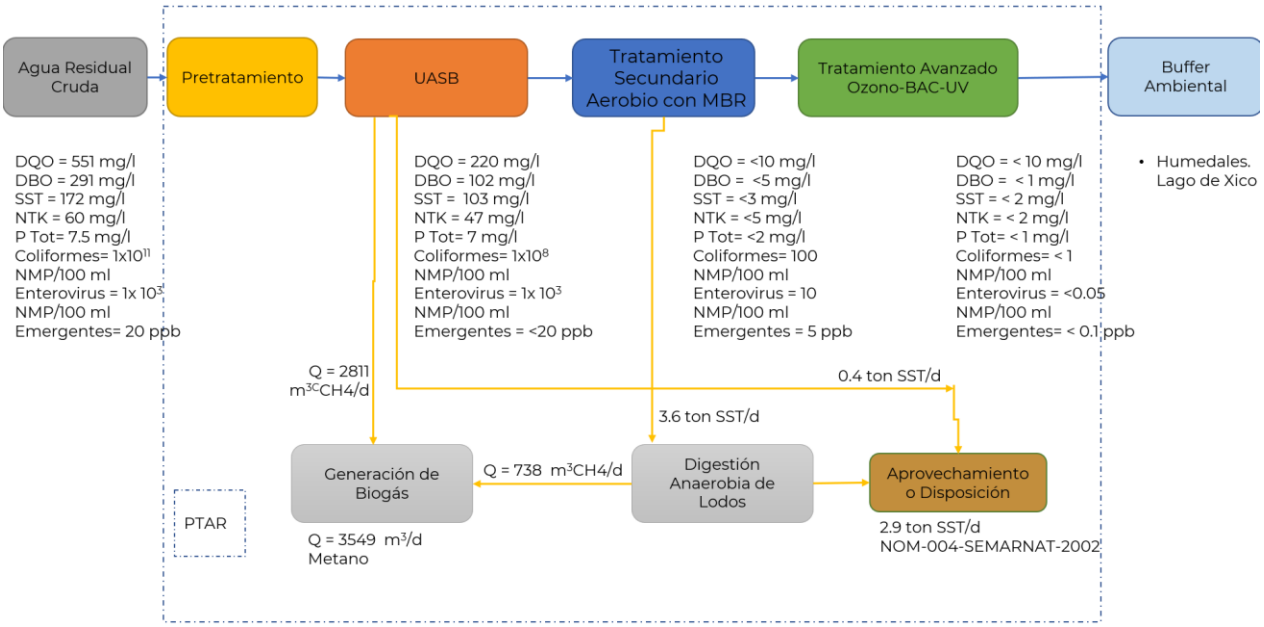


Figura 128. Perfil de remoción de contaminantes Opción de Tratamiento A2

Esta opción también cumplirá lo indicado en la tabla 5.6, parámetros de la calidad del efluente, de tal forma que la opción de tratamiento es válida para el objetivo buscado.

Si bien el uso de un reactor UASB genera una mayor cantidad de biogás aprovechable para cogeneración, ayuda a minimizar los requerimientos de aireación para el proceso aerobio, al también consumir materia orgánica, ésta puede quedar en déficit para alcanzar la remoción de nutrientes, por lo que podría ser necesario utilizar una fuente suplementaria de materia orgánica, usualmente con metanol, la cual, con los datos disponibles, no sería necesaria si sólo se utiliza el proceso anóxico-aerobio como indicado en la opción 1.

Como referencia en la figura 5.7 se observa que el reactor UASB logra remover más del 60% de la DBO consumiendo un 25% del nitrógeno. La relación de carga orgánica resultante para el proceso aerobio indica que se requerirá una carga de DBO mayor para alcanzar la remoción necesaria previo al proceso avanzado por lo que sería necesaria la inyección de una fuente de materia orgánica como el metanol. Un cálculo preliminar con base en la información disponible sugiere el uso de 1,600 litros por día de metanol. La validación de la calidad del agua mediante el muestreo a realizar permitirá confirmar el valor encontrado.

3.8.8.3 Opción A3

El tercer tren de tratamiento a evaluar integra el tratamiento primario con un clarificador primario y el tratamiento secundario por medio de un filtro percolador.

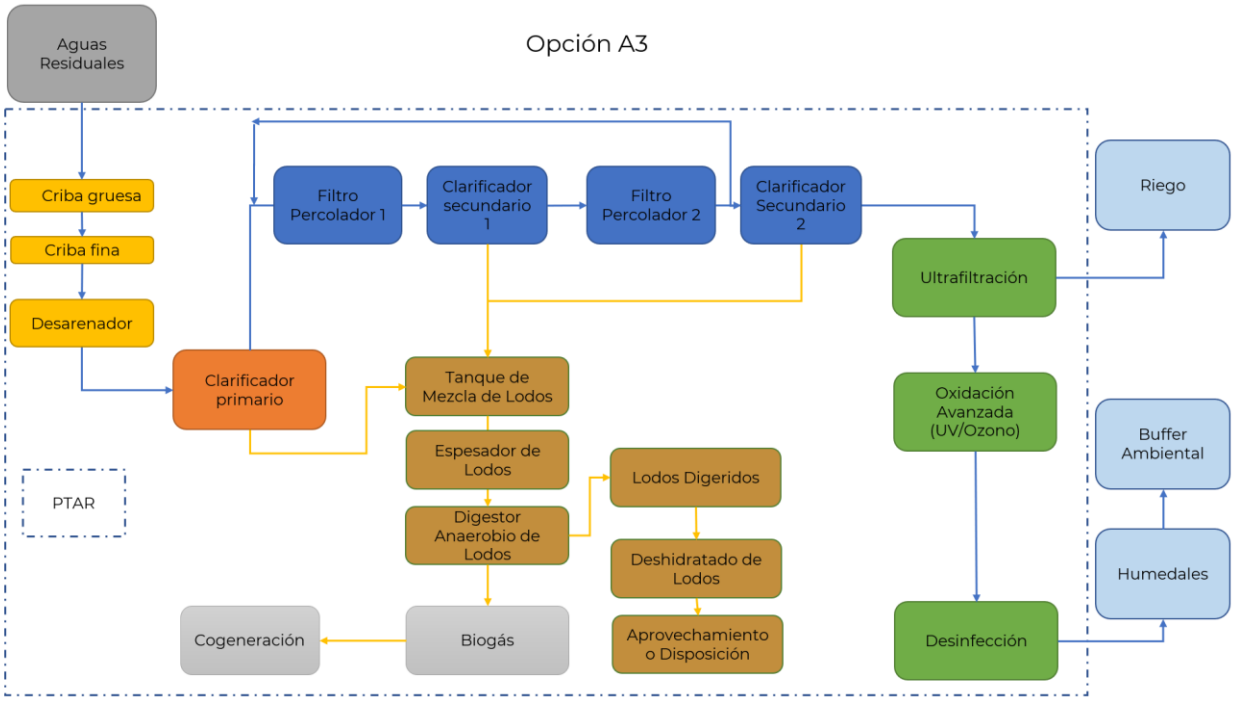


Figura 129. Opción de tratamiento A3

Esta opción de tratamiento integra un sistema de biofiltros o filtros percoladores como tratamiento secundario aerobio en lugar de emplear el reactor anóxico-aerobio con MBR. El filtro percolador permite llevar a cabo la remoción de materia orgánica así como la nitrificación en dos etapas en serie. Sin embargo, para lograr una calidad aceptable previo al sistema de tratamiento avanzado, es necesaria considerar una clarificación después de cada filtro percolador. La desnitrificación sería pobre en los filtros percoladores, por lo que existiría una recirculación del agua tratada del filtro percolador 2 al influente del filtro percolador 1.

Al igual que las opciones anteriores, será necesario adicionar un coagulante que permita la precipitación del fósforo en el clarificador secundario 2 y así evitar que pase a las siguientes etapas del tratamiento y pueda llegar a ser emitido en el efluente de agua residual tratada.

Para el tratamiento avanzado se propone el mismo tren basado en oxidación con ozono y filtración biológica sobre carbón activado, sin embargo, para lograr un aprovechamiento adecuado del ozono y evitar requerir unidades generadoras de ozono mayores, es necesario que el agua efluente del sistema secundario sea filtrada a nivel de Ultrafiltración.

El paso de ultrafiltración permite eliminar materia suspendida y microorganismos que pueden consumir ozono y evitar que éste actúe sobre los componentes recalcitrantes y emergentes.

El tren de tratamiento de lodos en esta opción se integra con digestión anaerobia para lograr la estabilización y generación de biogás para su posterior aprovechamiento en cogeneración y los lodos cumpliendo la NOM-004-SEMARNAT-2002 para su uso forestal, mejoramiento de suelos y uso agrícola.

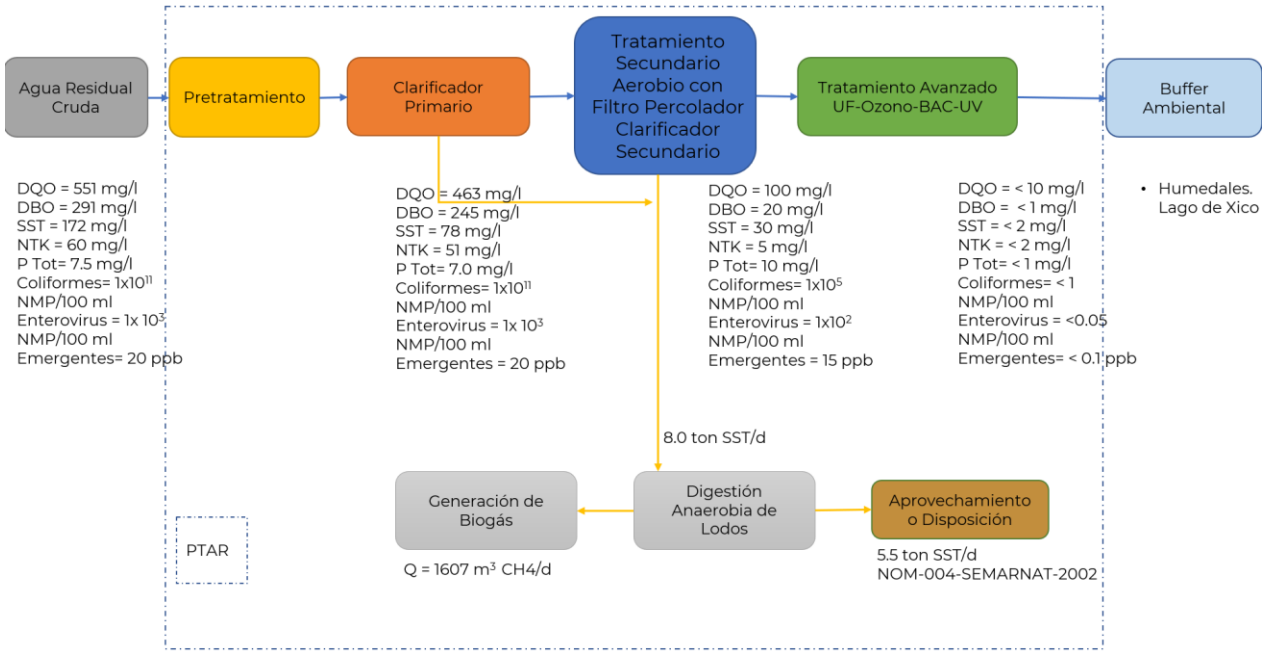


Figura 130. Perfil de remoción de contaminantes Opción de Tratamiento A3

Se observa que esta opción también cumplirá lo indicado en la tabla 5.6, parámetros de la calidad del efluente, de tal forma que la opción de tratamiento es válida para el objetivo buscado.

Se puede ver que la calidad del efluente obtenida del filtro percolador es menor que la obtenida en el MBR, esto indica que el sistema terciario debe ser de un rendimiento al menos similar para que el tratamiento avanzado pueda tener el mismo desempeño por lo que, es necesario integrar un tren de ultrafiltración (UF).

Si bien se genera ahorro en la capacidad de sopladores, el uso de sistemas de bombeo en el sistema UF puede mermar dicho ahorro y generar costos de operación similares a los del sistema aerobio de lodos activados con MBR.

3.8.8.4 Opción A4

El cuarto tren de tratamiento a evaluar integra el tratamiento primario con un reactor anaerobio UASB y el tratamiento secundario por medio de lodos activados con MBR conforme al siguiente diagrama de bloques:

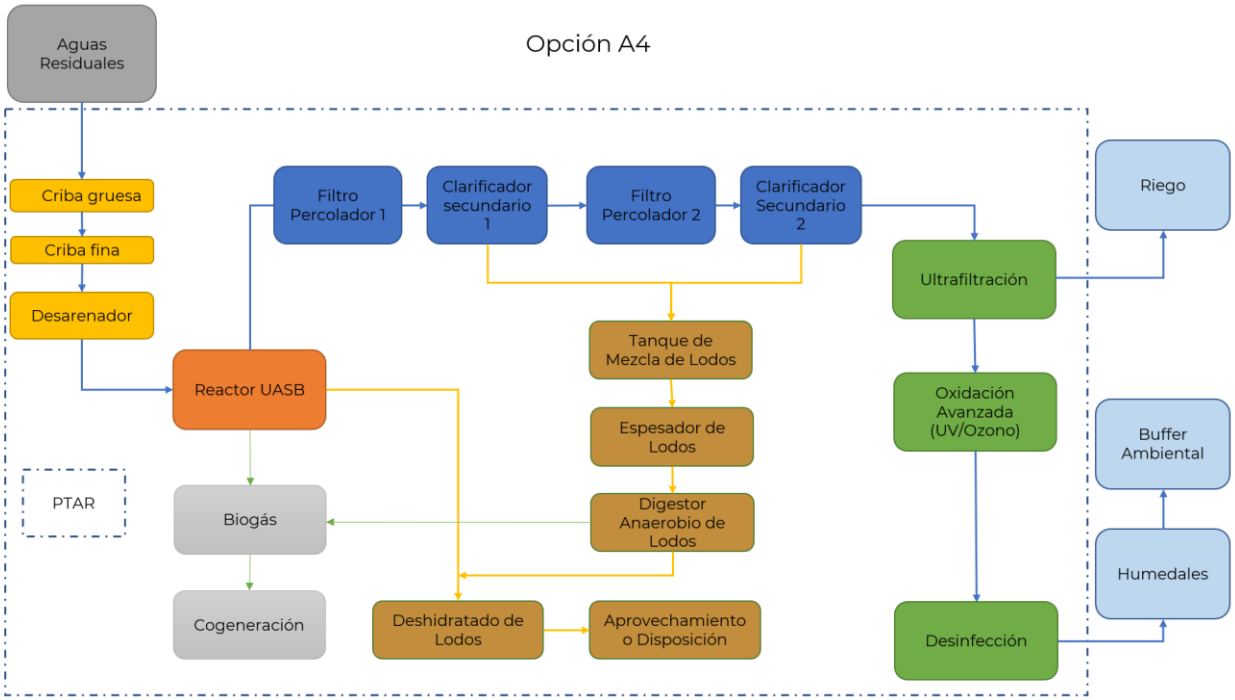


Figura 131. Opción de tratamiento A4

Esta opción de tratamiento integra un reactor UASB al sistema de biofiltros o filtros percoladores como tratamiento secundario aerobio en lugar de utilizar el reactor biológico en configuración anóxico-aerobio con MBR.

La integración del UASB al tren de tratamiento, además de la degradación de materia orgánica y generación de biogás, debe permitir minimizar el área ocupada por el filtro percolador y minimizar su requerimiento energético por lo que, en el caso en que se logre aprovechar el biogás en cogeneración, el costo operativo podría ser aún menor.

Será necesario adicionar coagulante que permita la precipitación del fósforo en el clarificador secundario y así evitar que pase a las siguientes etapas del tratamiento y pueda llegar a ser emitido en el efluente de agua residual tratada.

Para el tratamiento avanzado se propone el mismo tren basado en oxidación con ozono y filtración biológica sobre carbón activado, sin embargo, para lograr un aprovechamiento adecuado del ozono y evitar requerir unidades generadoras de ozono mayores, es necesario que el agua efluente del sistema secundario sea filtrada a nivel de Ultrafiltración.

El paso de ultrafiltración permite eliminar materia suspendida y microorganismos que pueden consumir ozono y evitar que éste actúe sobre los componentes recalcitrantes y emergentes.

El tren de tratamiento de lodos en esta opción se integra con digestión anaerobia para lograr la estabilización y generación de biogás para su posterior aprovechamiento en cogeneración y los lodos cumpliendo la NOM-004-SEMARNAT-2002 para su uso forestal, mejoramiento de suelos y uso agrícola.

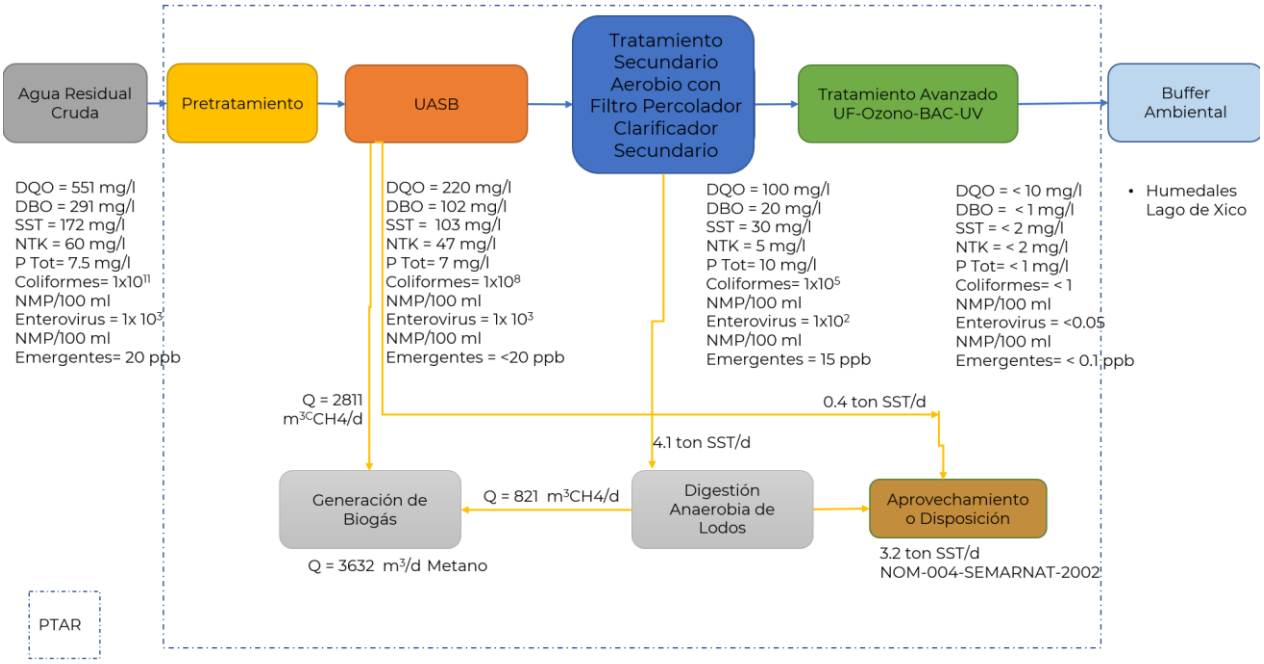


Figura 132. Perfil de remoción de contaminantes. Opción de tratamiento A4

Se puede observar que esta opción también cumplirá lo indicado en la tabla 5.6, parámetros de la calidad del efluente, de tal forma que la opción de tratamiento es válida para el objetivo buscado.

Como se ha descrito, el reactor UASB logra remover aproximadamente del 60% al 70% de la DBO. El filtro percolador requerirá de una aireación forzada para promover la nitrificación, por lo que el ahorro esperado en consumo energético disminuirá.

También se puede encontrar que el resultado del proceso biológico aún tendrá concentraciones por arriba de lo requerido en el efluente a enviar al lago por lo que, para remover el fósforo, será necesario precipitarlo en el clarificador secundario, añadiendo una mayor cantidad de químicos.

3.8.8.5 Opción B1

Para esta opción de tratamiento se considera que el agua tratada no contará con tratamientos avanzados e irá a un sistema de humedales para su pulimiento.

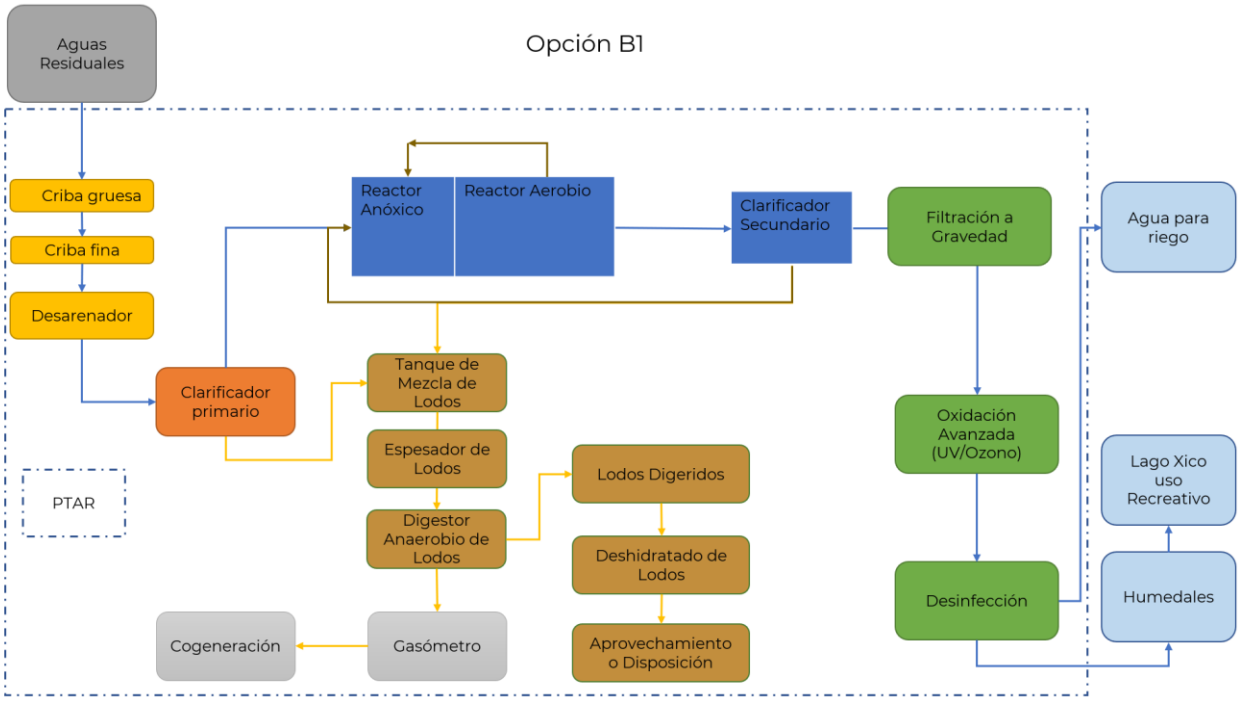


Figura 133. Opción de Tratamiento B1

Este tren de tratamiento cuenta con un sistema de pretratamiento para remoción de sólidos grandes por medio de cribas gruesas y finas, así como desarenado-desengrasado.

El tratamiento primario se lleva a cabo en un clarificador primario que permite minimizar la materia orgánica particulada ingresando al tratamiento aerobio, de tal forma que se pueda llevar a cabo la degradación de la materia orgánica y los contaminantes solubles de manera más eficiente.

El tratamiento secundario consta de un sistema anóxico-aerobio para lograr la degradación de la DBO así como la remoción biológica de nitrógeno. Para alcanzar la calidad requerida en el efluente de la planta podría ser necesaria la adición de coagulante para lograr su precipitación.

Los lodos generados en el proceso biológico serán separados en un clarificador secundario, de donde se toma lodo para recircular al tanque anóxico así como para enviar el exceso a la digestión anaerobia, mezclándolo con los lodos primarios y así alcanzar su estabilización previo a su deshidratación para minimizar el volumen de disposición. Este proceso genera biogás, el cual podrá ser aprovechado para la cogeneración de energía y autoabastecer una fracción de la energía eléctrica requerida por la PTAR, disminuyendo los costos de operación.

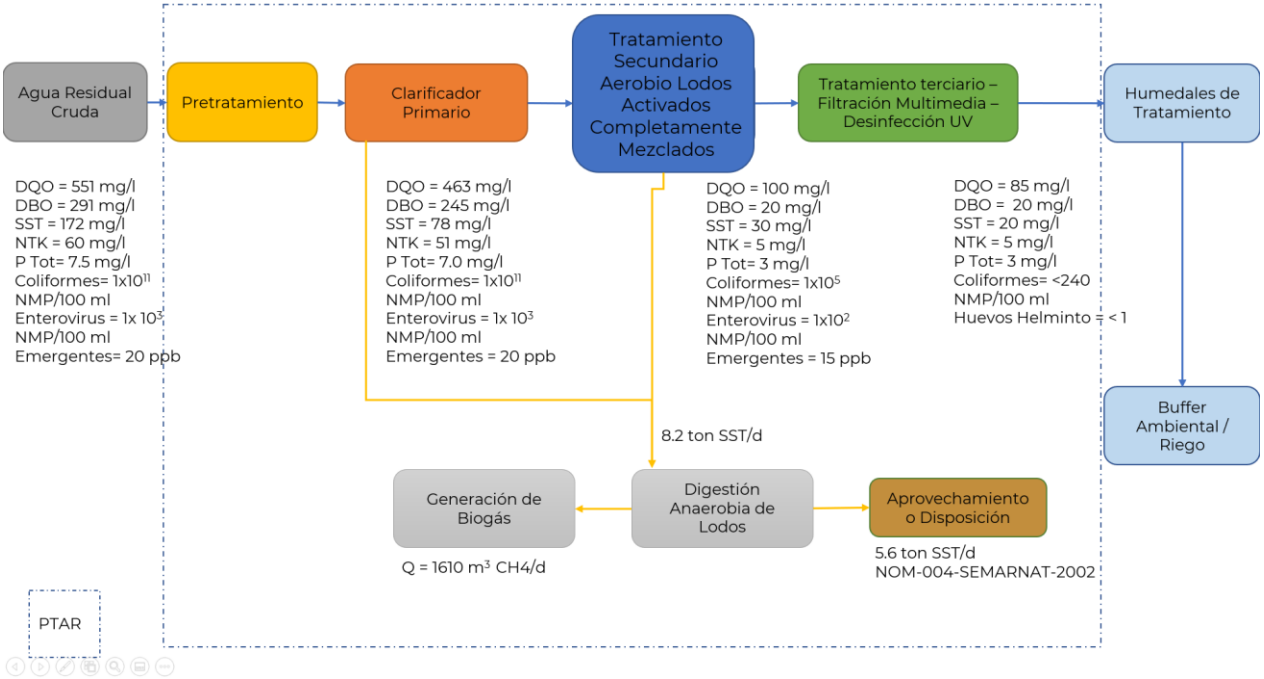


Figura 134. Perfil de remoción de contaminantes. Opción de tratamiento B1

3.8.8.6 Opción B2

Este tren de tratamiento cuenta con un sistema de pretratamiento para remoción de sólidos grandes por medio de cribas gruesas y finas, así como desarenado-desengrasado.

El tratamiento primario se lleva a cabo en un clarificador primario que permite minimizar la materia orgánica particulada ingresando al tratamiento aerobio, de tal forma que se pueda llevar a cabo la degradación de la materia orgánica y los contaminantes solubles de manera más eficiente.

El tratamiento secundario consta de un sistema anóxico-aerobio para lograr la degradación de la DBO así como la remoción biológica de nitrógeno. Para alcanzar la calidad requerida en el efluente de la planta podría ser necesaria la adición de químicos para lograr su precipitación y máxima remoción que minimice la necesidad de oxidante en el tratamiento avanzado.

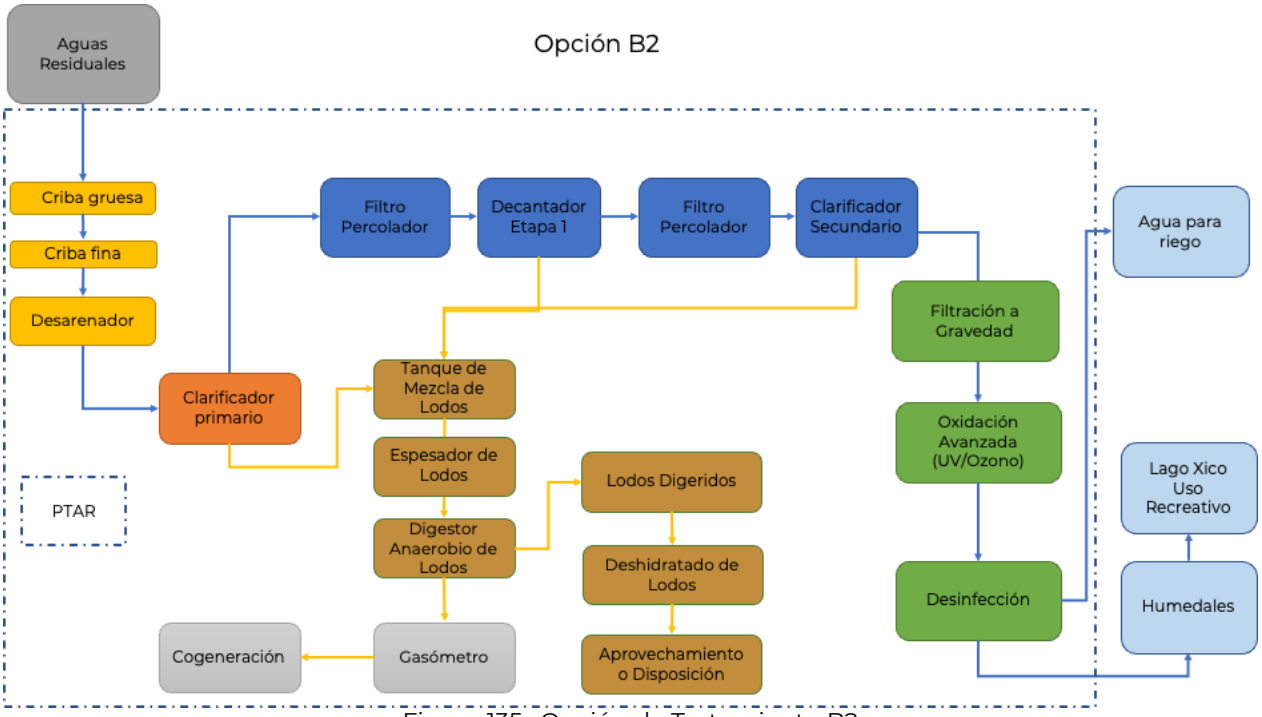


Figura 135. Opción de Tratamiento B2

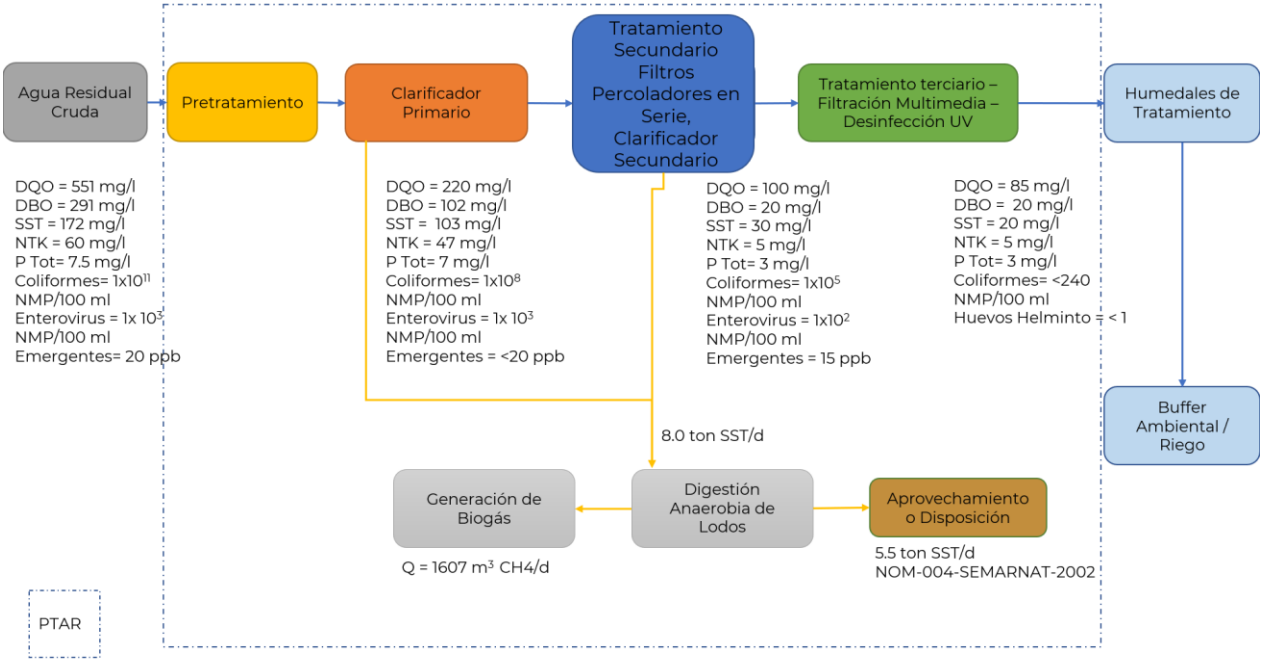


Figura 136. Perfil de remoción de contaminantes. Opción de tratamiento B2

3.9 Análisis de las opciones

Para el análisis de las opciones presentadas y lograr la pre-selección del tren de tratamiento a desarrollar para la PTAR del lago Tláhuac-Xico se han realizado los siguientes cálculos que permiten valorar las opciones más adecuadas:

- Estimación del área de instalación
- Estimación del costo global de la PTAR
- Estimación del costo operativo de cada opción
- Estimación del potencial de generación y aprovechamiento de biogás

Con los datos obtenidos de estas estimaciones, se realiza una matriz simple en la que se asigna el menor impacto a los valores obtenidos como la opción de preferencia, el resultado de dicha matriz nos indica la preferencia hacia el tren de tratamiento que podría ser seleccionado para su desarrollo funcional.

Los datos presentados corresponden a un módulo de tratamiento de 400 L/s y su respectivo tren de tratamiento de lodos, una vez definida la calidad de agua a tratar derivada de los muestreos se realizarán las adecuaciones requeridas para considerar los caudales y distribuciones correspondientes a cada planta.

Tabla 78. Áreas estimadas para la instalación de las diferentes opciones del tren de tratamiento (400 L/s)

Opción	Tren de Tratamiento	Área Pretrat (m^2)	Área Primario (m^2)	Área Anaerobio UASB (m^2)	Área Secundario Aerobio (m^2)	Área Terciario (UF) (m^2)	Área Oxidación Ozono/UV y desinfección (m^2)	Area tratamiento de lodos (m^2)	Area Digestión Anaerobia y Cogeneración (m^2)	Área de tanques y auxiliares (m^2)	Área Estimada Total (m^2)	Área Estimada (Ha)
1	Pretratamiento-Clarificador Primario-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	920	1800	-	3200	-	1500	1800	2600	4500	16320	1.632
2	Pretratamiento-Reactor UASB-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	920	-	5400	3200	-	1500	1300	3800	4500	20620	2.062
3	Pretratamiento-Clarificador Primario-Filtro Percolador(2 en serie)-UF-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	920	1800	-	3900	1800	1500	1800	1600	4500	17820	1.782
4	Pretratamiento-Reactor UASB-Filtro Percolador (2 en serie)-UF-Tratamiento Avanzado-Digestor Anerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	920	-	5400	3900	1800	1500	1300	3800	4500	23120	2.312
B1	Pretratamiento-Clarificador Primario-Lodos Activados con Desnitrificación-Filtración Multimedia-Desinfección UV-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	920	1800	-	4200	2200	2000	1300	2600	4500	19520	1.952
B2	Pretratamiento-Clarificador Primario-Filtro Percolador (2 en serie)-Desinfección UV - Digestor Anaerobio - Deshidratador de Lodos - Cogeneración	920	1800	-	3350	2200	2000	1300	1500	4500	17570	1.757

La Tabla 125 muestra que los sistemas con tratamiento aerobio y MBR son los que ocuparían menor área, siendo la opción 2, integrando el reactor UASB y el MBR la que ocuparía la menor área de las opciones evaluadas. Al caudal de 400 L/s el filtro percolador requiere de áreas mayores, por tanto, la optimización de área buscada de forma conceptual para estas opciones no se ve reflejada en la estimación.

Tabla 79. Estimación del costo de inversión CAPEX por módulo de 400 L/s

Opción	Tren de Tratamiento	CAPEX Pretratamiento $MDP	CAPEX Primario $MDP	CAPEX Sistema de Control de Olores $MDP	CAPEX Anaerobio UASB $MDP(Incluye cogeneración)	CAPEX Secundario Aerobio $MDP	CAPEX Terciario (UF) $MDP	CAPEX Oxidación Avanzada y desinfección $MDP	CAPEX tratamiento de lodos $MDP	CAPEX Digestión Anaerobia	CAPEX Cogenera-ción $MDP	CAPEX de tanques y auxiliares $MDP	CAPEX Estimado $MDP
A1	Pretratamiento-Clarificador Primario-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	20	60	10	-	150	-	50	18	35	21	90	454
A2	Pretratamiento-Reactor UASB-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	20	-	8	125	145	-	50	12	20	36	90	506
A3	Pretratamiento-Clarificador Primario-Filtro Percolador(2 en serie)-UF-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	20	-	8	63	135	-	50	12	20	36	90	434
A4	Pretratamiento-Reactor UASB-Filtro Percolador (2 en serie)-UF-Tratamiento Avanzado-Digestor Anerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	20	60	10	-	120	55	50	15	25	10	90	455
B1	Pretratamiento-Clarificador Primario-Lodos Activados con Desnitrificación-Filtración Multimedia-Desinfección UV-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	20	-	8	125	90	55	50	12	20	30	90	500
B2	Pretratamiento-Clarificador Primario-Filtro Percolador (2 en serie) -Desinfección UV - Digestor Anaerobio - Deshidratador de Lodos - Cogeneración	20	-	8	63	90	55	50	12	20	30	90	438

La tabla muestra que para el escenario A tanto la opción con el sistema con tratamiento aerobio con filtro percolador y clarificador primario (A3) como la opción de clarificador primario con reactor aerobio con membranas MBR (A1) requieren montos de inversión equivalentes. Las opciones con UASB requerirán una mayor inversión de capital, debido principalmente a los componentes requeridos en el UASB para la extracción y aprovechamiento del biogás, bastante más complejos que los componentes de un clarificador primario.

Para el escenario B se observa que la opción B1 integrando un sistema de lodos activados con selector anóxico y filtración multimedia requiere menor inversión que la opción B2, para la que se requerirían dos filtros percoladores en serie además de una etapa final de lodos activados para garantizar la calidad final de agua además del sistema terciario de filtración.

Se evaluó de forma preliminar un posible costo de operación OPEX basado en los requerimientos energéticos y de consumo de productos químicos para las diferentes opciones de tratamiento presentadas; la Tabla 80 muestra el OPEX con y sin considerar ahorro de electricidad debido al aprovechamiento energético de biogás. La opción que tuvo el menor costo de operación asociado es la opción número 4, que integra el reactor UASB y filtro percolador.

Tabla 80. Estimación del costo operativo OPEX por módulo de 400 L/s

Opción	Tren de Tratamiento	OPEX ($/m³)	OPEX considerando electricidad producida a partir del biogás($/m³)
A1	Pretratamiento-Clarificador Primario-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	$3.78	$3.51
A2	Pretratamiento-Reactor UASB-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	$3.58	$3.12
A3	Pretratamiento-Clarificador Primario-Filtro Percolador(2 en serie)-UF-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	$3.52	$3.40
A4	Pretratamiento-Reactor UASB-Filtro Percolador (2 en serie)-UF-Tratamiento Avanzado-Digestor Anerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	$3.50	$3.11
B1	Pretratamiento-Clarificador Primario-Lodos Activados con Desnitrificación-Filtración Multimedia-Desinfección UV-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	$2.90	$2.65
B2	Pretratamiento-Clarificador Primario-Filtro Percolador (2 en serie) -Desinfección UV - Digestor Anaerobio - Deshidratador de Lodos - Cogeneración	$2.53	$2.41

Con base en el potencial de generación se recalculó el OPEX para evaluar el impacto del aprovechamiento del biogás; obteniéndose un potencial de ahorro de al menos 12% en el caso del MBR, siendo posible hasta alrededor del 20% en el tren de proceso con UASB y filtro percolador. Se requiere validar la carga orgánica real de las aguas residuales a tratar para establecer correctamente la capacidad de generación de biogás y su posible aprovechamiento en cogeneración.

Aunque el metano disuelto en los lodos digeridos tiene la misma concentración que el efluente del UASB; el caudal de lodos digeridos al ser tan pequeño comparado con el agua residual tiene como resultado que el metano disuelto en el efluente del digestor sea despreciable (aproximadamente 0.1% del total generado).

Con la información previa se realiza una matriz de selección mostrada en la Tabla 128 en la que el 1 corresponde al menor valor cada rubro y el 4 al valor mayor; realizando una valoración simple, el tren de tratamiento con la sumatoria menor es el que cubre de mejor manera los requerimientos del objetivo del tratamiento indicado en la sección 3.10.1.

La matriz incluye una valoración respecto al control del proceso, estimada conforme a experiencias previas tomando en cuenta la posibilidad de recuperación de parámetros operativos después de eventos de mala calidad de agua, sensibilidad a variaciones de la calidad del agua residual a tratar y la posibilidad de reducir las intervenciones de los operadores.

Tabla 81. Matriz de decisión entre las diferentes opciones de PTAR del Escenario A

Opción	Tren de Tratamiento	Área Requerida	CAPEX	OPEX	Control del Proceso	Sumatoria
1	Pretratamiento-Clarificador Primario-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	2	2	5	1	10
2	Pretratamiento-Reactor UASB-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Deshidratador de Lodos - Cogeneración	1	4	4	2	9
3	Pretratamiento-Clarificador Primario-Filtro Percolador-UF-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	4	1	2	3	10
4	Pretratamiento-Reactor UASB-Filtro Percolador-UF-Tratamiento Avanzado-Deshidratador de Lodos - Cogeneración	3	3	1	4	11

Conforme a la tabla, el tren de tratamiento pre-seleccionado es el descrito en la opción 2, se requerirá validar con los datos de calidad de agua pendientes de realizar y verificar que los datos obtenidos en las estimaciones previas son consistentes a la situación actual de las aguas residuales fuente para el tratamiento en estas PTAR propuestas.

Tabla 82. Matriz de decisión entre las diferentes opciones de PTAR del Escenario B

Opción	Tren de Tratamiento	Área Requerida	CAPEX	OPEX	Control del Proceso	Sumatoria
B1	Pretratamiento-Clarificador Primario-Lodos Activados con Desnitrificación-Filtración Multimedia-Desinfección UV-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	2	2	2	1	7
B2	Pretratamiento-Clarificador Primario-Filtro Percolador (2 en serie)- Desinfección UV - Digestor Anaerobio - Deshidratador de Lodos - Cogeneración	1	1	1	2	5

3.9.1 Resultados

A partir de los datos obtenidos desarrollados en la sección 3.8 se obtienen las siguientes conclusiones:

3.9.1.1 Escenario A

Las cuatro opciones analizadas para el escenario A pueden generar la calidad de agua requerida en el objetivo de la PTAR, sin embargo, la opción A2 tiene un costo de operación menor, permite optimizar el área requerida para la ubicación de las plantas así como simplificando las operaciones unitarias requeridas.

Para alcanzar la remoción de fósforo se requerirá la adición de un coagulante para llevar a cabo la precipitación, debido a la facilidad de mezcla por la adición continua de aire durante la operación, esta remoción se ve más favorecida en los reactores de membrana (MBR) en comparación con los clarificadores secundarios requeridos para la separación del lodo generado en los filtros percoladores.

Las opciones A3 y A4 con filtro percolador se ven afectadas en su operabilidad por la necesidad de integrar el sistema terciario de filtración por medio de membranas de ultrafiltración para alcanzar la remoción de sólidos y materia orgánica necesarios para minimizar los requerimientos de oxidante, ozono, requerido para la eliminación de los contaminantes emergentes y recalcitrantes que pueden afectar la calidad del agua destinada a la potabilización.

3.9.1.2Escenario B

Las dos opciones analizadas para el escenario B pueden generar la calidad de agua requerida en el objetivo de la PTAR, sin embargo, la opción B2 permite realizarlo con un menor costo operativo.

Se debe considerar que para la opción B2 la nitrificación-desnitrifación teóricas son alcanzables los niveles requeridos por la normativa, sin embargo, su eficiencia es poco controlable.

Para alcanzar la remoción de fósforo se requerirá la adición de un coagulante para llevar a cabo la precipitación, la adición del coagulante para estas opciones puede realizarse previo a la filtración granular, de tal forma que el fósforo sea retenido en el filtro.

La generación de biogás en la opción con filtro percolador es muy baja debido a que se generan menor cantidad de lodo, sin embargo, al requerirse menor cantidad de oxígeno para la oxidación biológica, su costo operativo continúa siendo menor.

3.9.2 Opción Seleccionada escenario A

En las secciones previas se ha identificado el cumplimiento de las opciones de tratamiento descritas en la sección “Datos básicos de diseño de las PTAR en el PILTX” y los criterios de preferencia para llegar a una selección preliminar del tipo de proceso que se requiere para alcanzar los objetivos planteados, considerando que es mandatorio el cumplir con los requerimientos de calidad de agua residual tratada como fuente indirecta para la potabilización revisados en la sección “Casos de estudio de reúso potable”.

La opción 2 ha sido identificada como la opción de mayor factibilidad al equilibrar los requerimientos de inversión y el costo operativo estimado con los requerimientos de área y simplificación de operaciones. Es importante indicar que si bien no es la opción que requiera los menores costos de inversión y operación, sí es la que se presenta como la más robusta frente a posibles variaciones de calidad de agua influente y asegura la calidad del efluente siempre y cuando se mantenga la correcta operación de los bancos de membranas.

Como parte del proyecto general, se ha decidido incluir zonas de humedales construidos que, además de proveer diversos servicios ambientales, servirán para finalizar el tratamiento de la PTAR previo al reservorio ambiental y para permitir un mejor aprovechamiento de sus capacidades, se prescindirá del sistema de filtración biológica sobre carbón activado propuesta en la descripción del proceso como paso final en la remoción por medio de adsorción de los compuestos traza que podrían quedar remanentes posterior a la oxidación con ozono y UV. Los humedales pueden realizar tanto la adsorción y asimilación en la vegetación para la remoción de dichos compuestos.

La inclusión de los humedales también sirve como barrera adicional para mitigar los riesgos descritos en la sección Análisis de las opciones.

También se ha determinado que el alcance del proyecto de tratamiento de agua residual debe considerar el suministro de agua para riego desde la PTAR Chalco.

En la “Ingeniería Conceptual de la Opción Seleccionada” se describe a detalle la ingeniería conceptual de la Opción 2 que sirve como base para el diseño funcional de las PTAR Chalco y Tláhuac.

3.10 Ingeniería Conceptual de la Opción Seleccionada

Esta descripción técnica describe la ingeniería conceptual de la opción del sistema avanzado de tratamiento de aguas residuales con tratamiento anaerobio- anóxico- Biorreactor de Membrana (MBR) y Oxidación Avanzada UV-Ozono para el Proyecto de habilitación del lago Tláhuac-Xico. Se describen a continuación, las capacidades mínimas de diseño de las instalaciones propuestas para las PTAR Tláhuac para tratar un caudal influente de 400 L/s y la PTAR Chalco con capacidad de tratar un influente de 800 L/s con una probable expansión a futuro para 200 L/s adicionales.

Se describe una construcción modular para dotar de flexibilidad a la operación y permitir que en caso de requerirse mantenimiento no se pierda toda la capacidad de tratamiento.

Las siguientes secciones describen la visión general del proceso de tratamiento propuesto, las bases de diseño y la información preliminar del diseño por unidad de proceso.

3.10.1 Diagrama general de bloques

El diagrama general de bloques presenta el esquema descriptivo de la PTAR con los principales procesos involucrados en la misma para ilustrar el flujo principal de la corriente de agua tratada y los lodos generados en la planta.

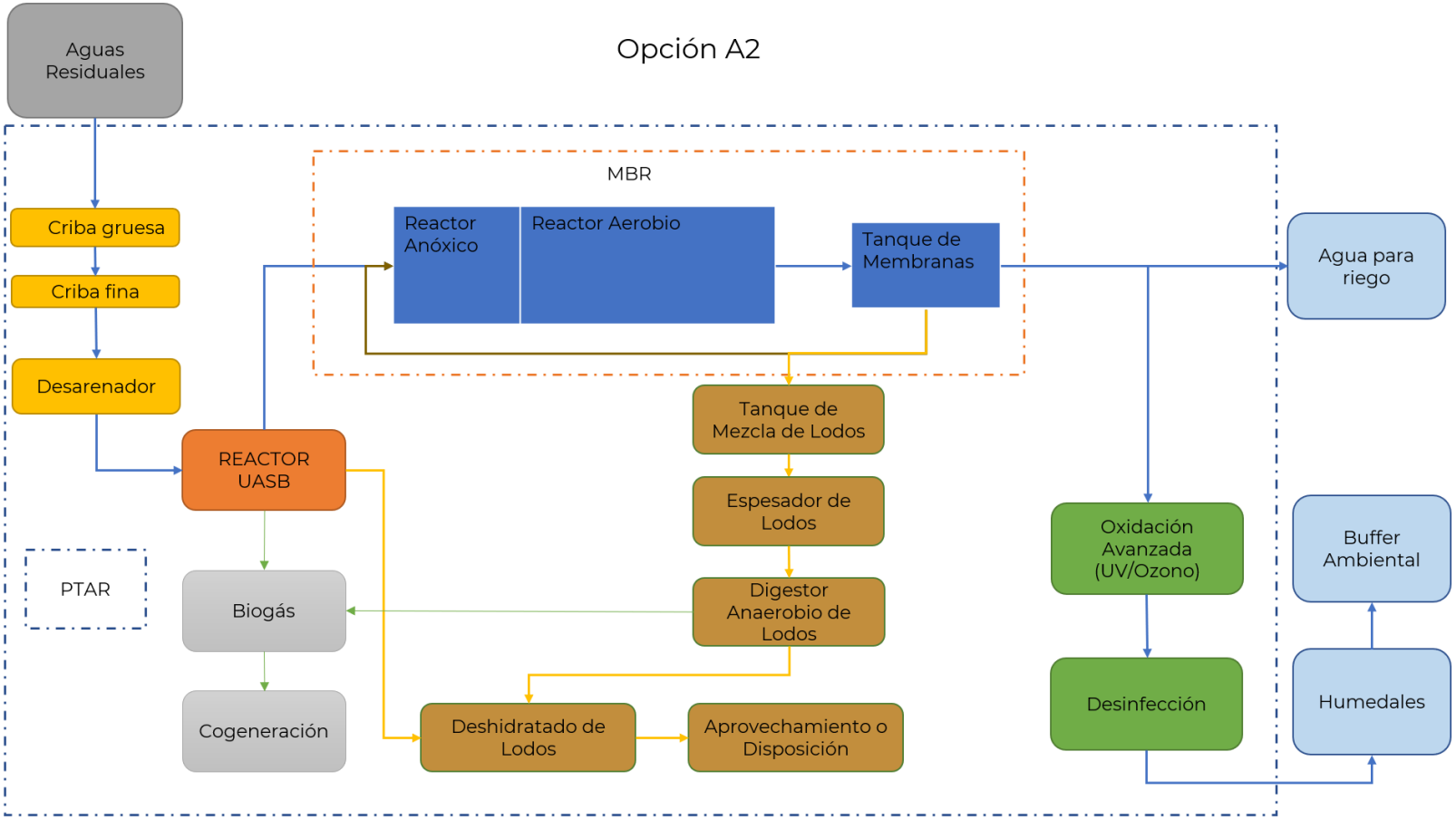


Figura 137. Diagrama de bloques PTAR Tláhuac

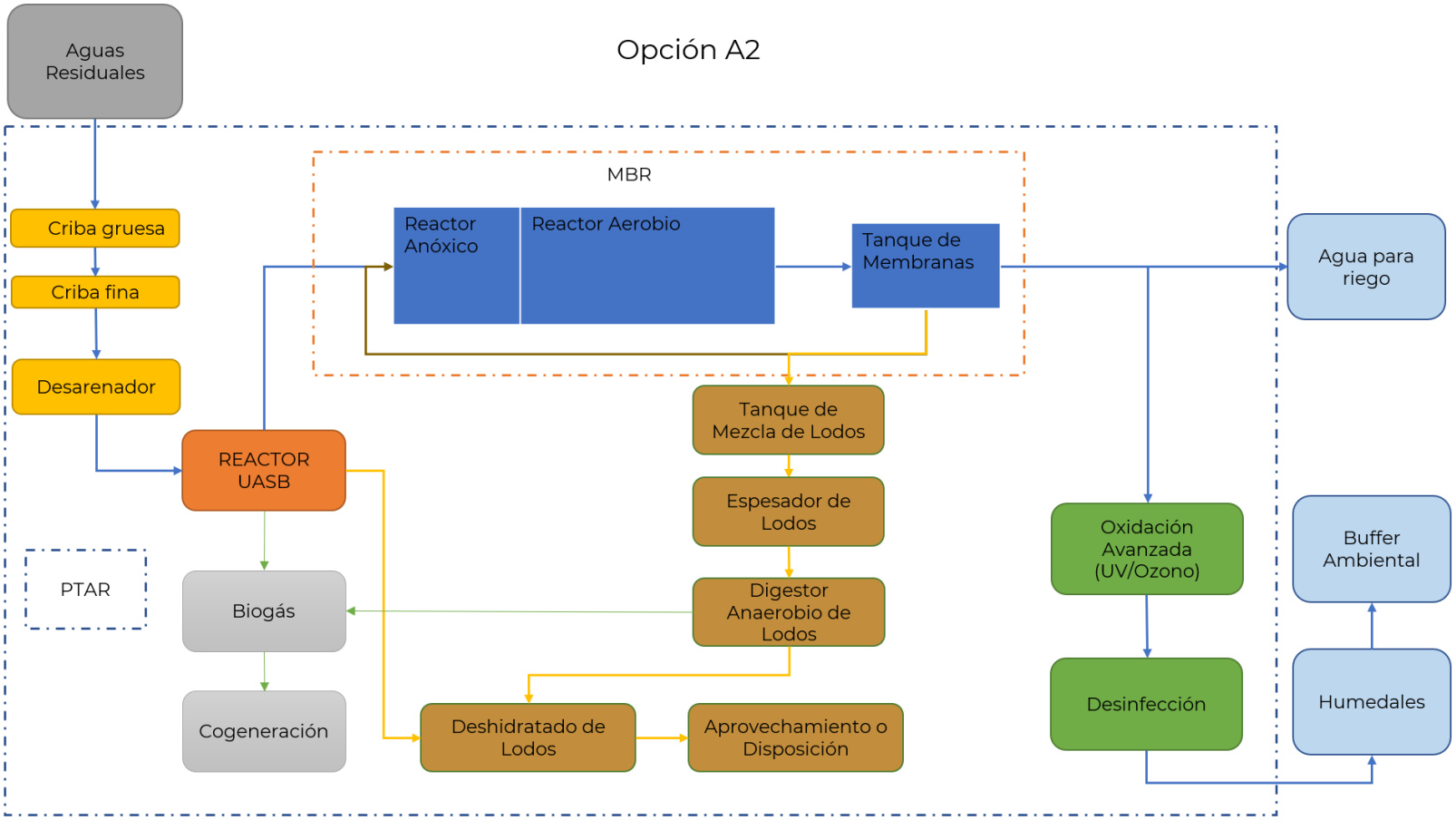


Figura 138. Diagrama de bloques PTAR Chalco

3.10.2 Diagrama de Flujo de Proceso DFP

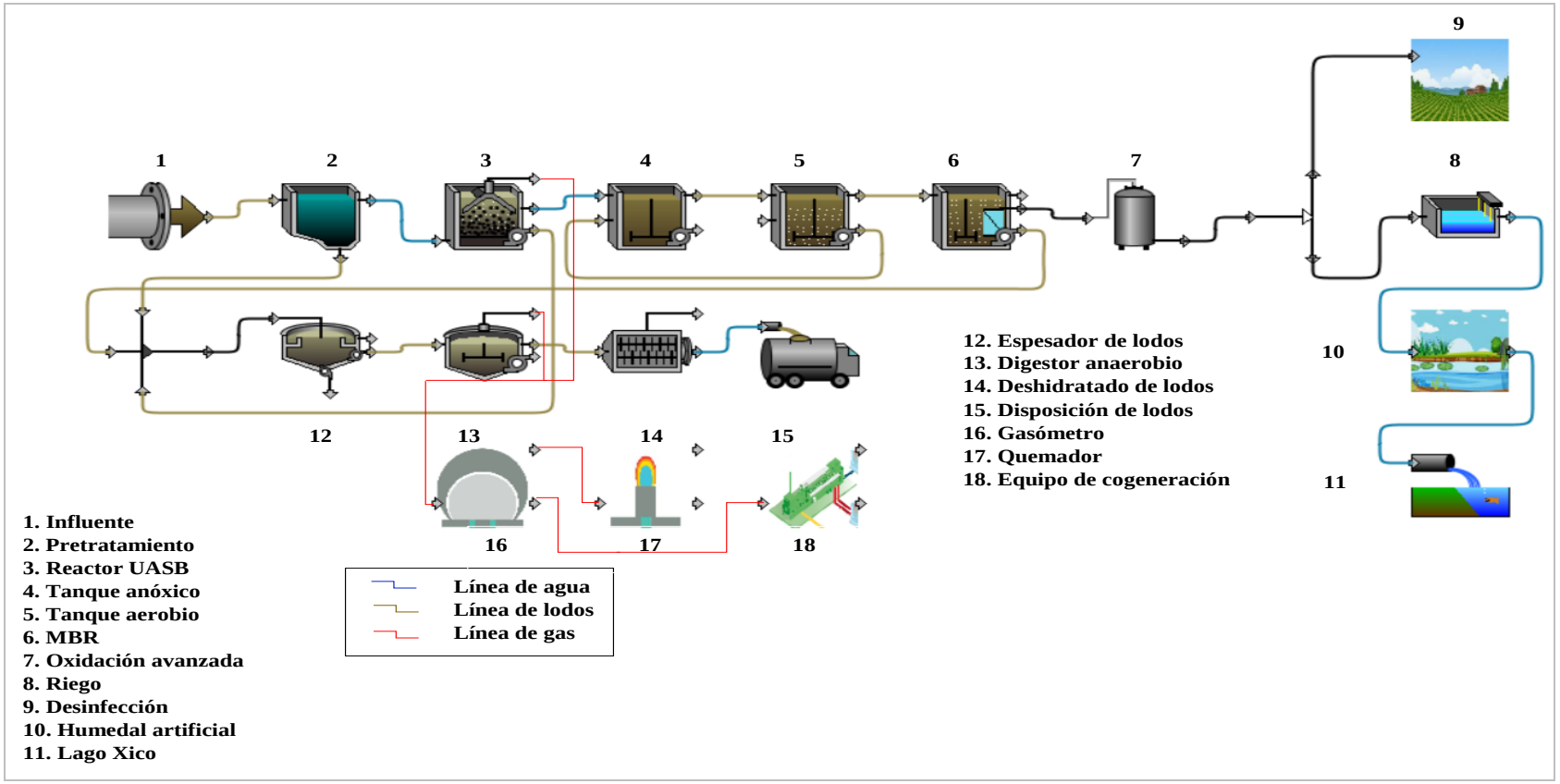


Figura 139. Diagrama General del Proceso

El diagrama de flujo de proceso (DFP) que acompaña a este documento proporciona un esquema de los procesos unitarios descritos, así como la conectividad de flujos entre ellos.

Como se muestra en el esquema de proceso, el influente fluye a través de la criba gruesa, la criba fina y al desarenador, donde se lleva a cabo la eliminación de sólidos gruesos y arenas, además, el desarenador contará con una sección aireada para promover la flotación de las grasas y removerlas por medio de un colector superficial, para el caso de la PTAR Chalco, los equipos serán dimensionados de tal forma que estén preparados para tratar el caudal adicional de la expansión.

Después del tratamiento preliminar, el flujo se dirige al reactor anaerobio, donde los sólidos suspendidos se eliminarán parcialmente y la carga orgánica se disminuirá un 60%, generando una disminución de los contaminantes presentes en el agua residual.

Después del tratamiento primario, el flujo se dirige al MBR para el tratamiento biológico.

Se propone el tratamiento biológico en 2 trenes de lodos activados con desnitrificación y 4 trenes de membrana sumergida por cada 400 L/s a tratar para la PTAR Tláhuac y 4 trenes de lodos activados con desnitrificación y 8 trenes de membrana para la primera etapa de la PTAR Chalco de 800 L/s, reservándose espacio para incluir un nuevo tren de tratamiento biológico y 2 tanques de membranas para los 200 L/s de expansión futura.

El proceso propuesto de Biorreactor de Membrana (MBR) consiste en un sistema de reactor biológico de crecimiento suspendido integrado con un sistema de filtración de membrana para la separación de fases.

Se seleccionó la configuración del proceso Anóxico-Aerobio para alcanzar la remoción máxima de nitrógeno por vía biológica.

El proceso anóxico-aeorobio comienza con la zona anóxica, donde se recibe el agua residual proveniente de la clarificación primaria, así como recirculación de licor mezclado (MLSS) desde los tanques de membrana. La función principal de la zona anóxica es reducir el nitrato a gas nitrógeno (desnitrificación) mientras se eliminan algunos materiales carbonosos. Las zonas aeróbicas siguen a la zona anóxica y es en donde se produce la oxidación de los materiales carbonosos restantes DBO y amoníaco a nitrato. La mezcla del contenido del reactor es proporcionada por mezcladores mecánicos en la zona anóxica. En las zonas aeróbicas, la aireación de burbuja fina proporciona el oxígeno requerido para la reacción aeróbica, así como el flujo de aire requerido para mantener los sólidos y la biomasa (MLSS) en suspensión.

El dimensionamiento del proceso y la determinación de los parámetros operativos base se lleva a cabo utilizando una serie de cálculos de estado estacionario de manera iterativa para determinar los volúmenes requeridos en los tanques de proceso y los flujos de aire necesarios para lograr una calidad de efluente aceptable.

Las aguas residuales tratadas junto con la biomasa fluyen a los tanques de membrana, donde se encuentran las membranas de fibra hueca sumergidas y se emplean para separar el agua tratada de la biomasa. Los módulos de membrana están equipados con difusores de aire dedicados que sirven para varios propósitos, proporcionan oxígeno para la biomasa en suspensión, mezclan los reactores y recorren las membranas para ayudar a limpiar su superficie y mantener las tasas de flujo. La biomasa permanece en el tanque de membrana y se recircula de nuevo a los reactores biológicos o bien, una vez alcanzada la concentración

objetivo en el licor mezclado, se realiza una extracción del lodo en exceso para mantener la concentración estable.

Para la PTAR Chalco, del caudal total tratado en el tratamiento biológico, se destinarán 400 L/s para su uso en riego agrícola una vez hayan sido desinfectados mediante un sistema UV y así asegurar el cumplimiento con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para uso en suelo y que será enviado a través de un sistema de bombeo instalado fuera de la PTAR.

El caudal restante saliente del tratamiento biológico, 600 L/s, será conducido hacia el tratamiento avanzado consistente en un tanque contactor de ozono en el que se lleva a cabo la oxidación de los diferentes compuestos poco biodegradables o los contaminantes traza entre los que se encuentran los contaminantes emergentes. Posterior a este paso, el agua ingresa a un sistema de lámparas UV de alta intensidad para una acción sinérgica de fotocatálisis en la que los compuestos no fácilmente oxidables gracias a la radiación UV puedan ser oxidados y posteriormente removidos del agua tratada.

Una vez se ha pasado por la etapa de oxidación, el agua tratada sale de la PTAR y es conducida hacia los humedales, en donde se llevará a cabo la remoción última de contaminantes traza, además de servir como barrera adicional de protección del reservorio ambiental contra posibles problemas de operación de la PTAR así como de las escorrentías provenientes de los alrededores que no hayan podido ser contenidas por los colectores perimetrales del proyecto.

El exceso de lodo de las etapas de separación de fases se dirige al tanque de almacenamiento de lodos antes del proceso de espesamiento. Desde el tanque de almacenamiento, el lodo se acondiciona mediante un polímero que mejora la floculación y se dirige a un espesador mecánico. El lodo espesado se envía a un tanque de mezcla donde se incorpora con el lodo primario. El lodo mezclado es dirigido al digestor anaerobio. Después de la desgasificación, el lodo digerido es acondicionado por un polímero que promueve la floculación y es dirigido a una unidad de deshidratación. Los lodos deshidratados se recogen en un contenedor para ser transportados fuera de la instalación para su reutilización potencial en actividades agrícolas. El agua de rechazo de los procesos de espesamiento y deshidratación se dirige de nuevo a la primera zona del reactor.

El proceso de digestión anaerobia genera biogás, el cual será acondicionado y aprovechado para cogeneración eléctrica mediante un sistema de conversión de potencia; si por alguna razón no se pudiera aprovechar el biogás en la cogeneración, se dispondrá de un quemador para su consumo.

3.10.3 Bases de diseño

Se tiene considerado la instalación de dos PTAR: una en Valle de Chalco, Edo. de México y otra en Tláhuac, Cd. de México:

PTAR Valle de Chalco (VCh), con capacidad total de 800 L/s (ampliación a 1000 L/s), considerando módulos de 200 L/s cada uno, la cual consta de un pretratamiento, clarificador primario o reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), reactor Biológico de Membrana (MBR) o filtro percolador y un tratamiento avanzado. En 40 % del efluente (400 L/s), se utilizará para riego agrícola y por lo tanto deberá cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-2021 cuerpo receptor suelo, y el resto 600 L/s se descargarán a los humedales y posteriormente al reservorio ambiental, cumpliendo la NOM-001-SEMARNAT-2021, así como parámetros y concentraciones de las recomendaciones internacionales aplicadas a casos de reúso potable indirecto (Tabla5.16). El tratamiento y aprovechamiento de los lodos será por medio de

digestión anaerobio o biogeneración, los cuales deberán cumplir con los límites máximos permisibles de la NOM-004-SEMARNAT-2002, aprovechamiento y disposición final Tipo C.

PTAR de Tláhuac (T), con capacidad total de 400 L/s, considerando módulos de 200 L/s cada uno, la cual consta de un pretratamiento, clarificador primario o reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), reactor Biológico de Membrana (MBR) o filtro percolador y un tratamiento avanzado. El influente descargará a los humedales y posteriormente al reservorio ambiental, cumpliendo la NOM-001-SEMARNAT-2021, así como parámetros y concentraciones de las recomendaciones internacionales aplicadas a casos de reúso potable indirecto. El tratamiento y aprovechamiento de los lodos será por medio de digestión anaerobio o biogeneración, los cuales deberán cumplir con los límites máximos permisibles de la NOM-004-SEMARNAT-2002, aprovechamiento y disposición final Tipo C.

Tabla 83. Calidad del agua del afluente del proceso anaerobio-anóxico-aerobio-oxidación avanzada.

Parámetro	Límite Permisible
DQO	30 mg/L
Nitrógeno Total	5 mg/L
Fosforo Total	3 mg/L
E. Coli	100/NMP/100 mL
SST	3 mg/L

Para el diseño de la PTAR, se consideró una calidad del agua en el influente correspondiente a una DBO5 promedio de 291 mg/L, DQO total de 550.76 mg/l y nitrógeno amoniacal de 44.36 mg/L (Tabla 84). Dichos resultados versan del análisis estadístico de los resultados de calidad del agua, obtenidos en la campaña de muestreo desarrollada en enero-febrero del 2022.

Tabla 84. Calidad del agua de influente.

Parámetros	Unidades	Valor
pH	UpH	7.64
DBO5 total	mg/L	291.02
DQO total	mg/L	550.76
DQO soluble	mg/L	330.26
Grasas y aceites	mg/L	26.71
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	171.96
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	114.21
SSV/SST		0.73
Sólidos sedimentables	mL/L-h	1.28
Nitrógeno amoniacal	mg/L	44.36
Nitrógeno total kjeldahl	mg/L	58.46
Nitrógeno total	mg/L	65.38
Fósforo total	mg/L	7.16
Alcalinidad total	mg/L (CaCO3)	672.12
Dureza total	mg/L (CaCO3)	306.18
Calcio total	mg/L	51.51
Magnesio total	mg/L	44.43
Sulfatos	mg/L	151.14
Sulfuros	mg/L	<0.04

3.10.4 Unidades de Proceso

Esta sección describe las unidades principales de proceso, se integran a manera de referencia para la estimación de áreas y costos, sin embargo, el dimensionamiento final deberá ser verificado contra los resultados de análisis de agua.

3.10.4.1 Tren de agua

Cribas gruesas

Se proporcionan cribas gruesas para eliminar objetos grandes antes del proceso de tratamiento secundario y para proteger los siguientes pasos preliminares del tratamiento. Se propone el cribado grueso de menos tamaño considerando que se realiza cribado grueso en las plantas de bombeo y lumbreras del túnel Canal General.

Tabla 85. Especificación técnica de cribas gruesas

Item/Parámetro	PTAR Tláhuac	PTAR Chalco Actual / Futuro	Unidad
Flujo de diseño (Preparado a futuro)	1,872	4,490	m^3/h
Número de cribas gruesas - Operación	2	4	-
Número de cribas gruesas - Standby	1	2	-
Tamaño de apertura mínimo	6	6	mm
Volumen estimado de cribados	2,320	4,640 / 5,560	L/d

Cribas finas

Se proporcionan cribas finas para eliminar objetos antes del proceso de tratamiento secundario y para proteger los siguientes pasos preliminares del tratamiento. Estos objetos son generalmente plásticos inertes y otros desechos que no se pueden descomponer en el tratamiento biológico.

Tabla 86. Especificación técnica de cribas finas

Item/Parámetro	PTAR Tláhuac	PTAR Chalco Actual / Futuro	Unidad
Flujo de diseño (Preparado a futuro)	1,872	4,490	m^3/h
Número de cribas gruesas - Operación	2	4	-
Número de cribas gruesas - Standby	1	2	-
Tamaño de apertura mínimo	1	1	mm
Volumen estimado de cribados	2,070	4,140 / 4,970	L/d

Desarenador

La eliminación de arenas se proporciona para capturar arena, arena y otros materiales finos así como servir de trampa para remoción de grasas. El desarenador deberá contar también con el sistema de remoción de grasas.

Tabla 87. Desarenador-Desengrasador

Item/Parámetro	PTAR TLÁHUAC	PTAR Chalco Actual / Futuro	Unidad
Flujo de diseño	1,870	4,4904	m^3/h
Número de unidades de eliminación de arenas - Servicio	2	4	-
Número de unidades de eliminación de arenas - Standby	-	-	-
Tipo de desarenador	Horizontal Aireado	Horizontal Aireado	-
Volumen de la cámara de arenas	238	480	m^3
Longitud del tanque	20	20	m
Profundidad del tanque	2.5	2.5	m
Ancho del tanque	5.0	5.0	m
Caudal de aire requerido	10.5	11.7	m^3/min
Cantidad estimada de arenas	1,720	3,440 / 4,120	L/d

Reactor Anaerobio

El reactor anaerobio tendrá la función de reducir la carga orgánica y sólidos al tratamiento biológico.

Tabla 88. Especificación técnica del proceso anaerobio

Item/Parámetro	PTAR Tláhuac	PTAR Chalco	Unidad
Número de unidades - Operación	2	4	-
Número de unidades - Futuro	-	1	-

Proceso de MBR

Como se describió anteriormente, el tratamiento biológico se lleva a cabo en un sistema de reactor biológico de biomasa suspendida integrado con un sistema de filtración por membrana.

El volumen del reactor biológico requerido, el flujo de aire y las condiciones de operación están determinados por una serie de cálculos en estado estacionario para cumplir con los requisitos de calidad del efluente.

Tabla 89. Especificación técnica del proceso A2O

Item/Parámetro	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Caudal por tren de tratamiento	200	200	L/s
Número de trenes biológicos	2	4	-
Número de trenes biológicos a futuro	-	1	-
Volumen total de zonas de reacción por tren (mínimo)	3,350	3,350	m^3
Volumen anóxico por tren (mínimo)	415	415	m^3
Volumen aerobio por tren (incluyendo tanque de membranas)	2,935	2,935	m^3
TRH de zonas anóxicas (mínimo)	0.57	0.57	h
TRH de zonas aerobias (mínimo)	3.9	3.9	h
SRT de diseño aerobio (mínimo)	12	12	d
Concentración de MLSS	10,000	10,000	mg/l
Concentración de MLSS en RAS (máximo)	12,000	12,000	mg/l
Relación mínima de recirculación de RAS	2.5	2.5	-

La configuración y modulación por trenes simétricos de filtración permiten flexibilidad operativa así como una integración de las expansiones más simple al layout de la planta al establecerse las áreas de reserva desde un inicio.

Aireación de procesos para los reactores biológicos

La aireación se proporciona en las zonas aeróbicas para mantener la mezcla y proporcionar suficiente oxígeno para los procesos biológicos. El sistema de aireación deberá ser seleccionado considerando el caudal de aire necesario para suministrar el oxígeno necesario para la oxidación biológica.

La siguiente tabla resume el caudal de aire necesario base para el dimensionamiento de los equipos de suministro de aire.

Tabla 90. Especificación técnica de aireación del proceso

Item/Parámetro	Valor	Unidad
Demanda de aire de proceso (min)	14,080	Nm^3/h
Demanda de aire de proceso (promedio)	17,600	Nm^3/h
Demanda de aire de proceso (máx.)	22,880	Nm^3/h

Condiciones normales: T = 20ºC, P = 1.013 bar, HR = 36%

Eliminación química de fósforo/coagulación

Antes de la separación de sólidos, se proporciona la adición de coagulante para precipitar el fósforo remanente y mejorar la eliminación de partículas en suspensión de las membranas, la adición de cloruro férrico se realiza para alcanzar una concentración de fósforo en el efluente menor a 1 mg/L.

Tabla 91. Especificación técnica de eliminación química de fósforo / coagulación

Item/Parámetro	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO Actual / Futuro	Unidad
Dosis total de cloruro férrico	140	280 / 330	l/d

Tanques de membrana

La filtración por membrana separa los sólidos de las aguas residuales tratadas. Las especificaciones indicadas en la Tabla 92 son de referencia, los datos finales dependerán del proveedor y membrana seleccionadas.

Tabla 92. Especificación técnica de tanques de membrana

Item/Parámetro	PTAR Tláhuac	PTAR Chalco		Unidad
		Actual	Futuro	
Número de tanques de membrana (mínimo)	4	8	2	Pz
Diseño de flux de membrana promedio	20	20	20	$L/m^2/h$
Diseño de flux máximo de membrana	34	34	34	$L/m^2/h$
Flux de membrana promedio operacional esperado	14.8	14.4	14.4	$L/m^2/h$
Flux de membrana máximo operacional esperado	18.5	18.2	18.2	$L/m^2/h$
Número total de módulos de membrana (320 m^2/módulo)	248	500	124	Pz
Área total de la membrana	79,200	160,000	39,600	m^2
Volumen mínimo por tanque de membrana	350	350	350	m^3
Profundidad del tanque de membrana	5.5	5.5	5.5	m
Demanda media específica de aire (SADm)	0.1	0.1	0.1	$m^3/m^2/h$
Lavado total de aire para membranas	6,600	13,200	3,300	Nm^3/h
Concentración de MLSS en tanque de membrana	10 000	10 000	10,000	mg/L

Se utilizan soluciones de NaOCl y ácido cítrico para el mantenimiento de la membrana y la limpieza de la recuperación.

Tabla 93. Especificación técnica de productos químicos para limpieza y recuperación

Item/Parámetro	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO		Unidad
		Actual	Futuro	
Dosificación de NaOCl (solución al 12.5 %) para la limpieza de mantenimiento de la membrana	0.4	0.75	1.0	m^3/h
Dosificación de ácido cítrico (solución al 50%) para la limpieza del mantenimiento de la membrana	0.66	1.30	1.65	m^3/h
Intervalo típico de limpieza de mantenimiento de membranas	3.5-7	3.5-7	3.5-7	d
Duración del evento de limpieza de mantenimiento de membranas	60	60	60	min
Dosificación de NaOCl (solución al 12.5 %) para la limpieza de la recuperación de la membrana	3.55	7.0	9.0	m^3/h
Dosificación de ácido cítrico (solución al 50%) para la limpieza de la recuperación de la membrana	0.66	1.30	1.65	m^3/h
Intervalo de limpieza de recuperación típico	90-180	90-180	90-180	d
Duración del evento de limpieza de recuperación de membrana	360-480	360-480	360 -480	min

Ozonación

Se integra la inyección y contacto de ozono para la remoción de contaminantes emergentes y recalcitrantes, para la PTAR Chalco la capacidad mínima de generación de ozono por unidad considera lo necesario para la primera etapa de 800 L/s considerando que en ciertos periodos el total del agua podría enviarse a los humedales si no hubiera consumo en riego, por ejemplo, en temporada de lluvias.

Tabla 94. Especificación técnica sistema generación de ozono

Item/Parámetro	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO		Unidad
		Actual	Futuro	
Generador de Ozono	1	2	1	Pz
Generador de Oxígeno PSA	1	2	1	Pz
Capacidad mínima de generación de ozono total	9	9	4.5	Kg/h
Tiempo en Tanque de Contacto	20	20	20	min
Sistema de Difusión de burbuja fina	1	1	-	Sistema

Oxidación UV

El sistema de UV de oxidación será preferentemente en reactor cerrado presurizado con lámparas de alta potencia de salida y media presión. La dosis mínima indicada es de referencia para proceso combinado con generación de ozono, se deberán verificar los análisis necesarios y la transmitancia del agua residual tratada para establecer las condiciones óptimas de operación.

Tabla 95. Especificación técnica

Item/Parámetro	PTAR TLAHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Número de unidades - Operación	2	2	Pz
Número de unidades – Futuro	0	1	Pz
Dosis UV mínima	300	300	mJ/cm^2

Desinfección UV

A través del paso de la luz UV al agua, se logra la inactivación de bacterias, virus y protozoos, se recomienda que aunque el agua proveniente de las membranas del MBR se encuentra desinfectada gracias al paso del poro de membrana, se integre un sistema de desinfección por medio de luz UV para el cumplimiento de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reúso con contacto directo.

Esta unidad solo será requerida en la PTAR Chalco en la derivación de los 500 L/s para agua de riego, en caso de no utilizarse la derivación hacia agua de riego, este equipo puede ayudar a desinfectar el agua tratada y permitir que los humedales trabajen sobre los contaminantes emergentes durante periodos breves de tiempo.

Tabla 96. Especificación técnica de desinfección UV

Item/Parámetro	PTAR CHALCO	Unidad
Número de unidades – Operación	1	Pz
Número de unidades – Standby	0	Pz
Dosis UV	30	mJ/cm^2

3.10.4.2 Tren de lodos

Tanque de almacenamiento de lodos

El tanque de almacenamiento de lodos se proporciona como un amortiguador para permitir la operación intermitente de espesamiento y deshidratación.

Tabla 97. Especificación técnica del tanque de almacenamiento de lodos

Parámetros	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Volumen del tanque de almacenamiento de lodos	140	350	m^3
Tiempo de retención	24	30 (actual) 24 (futuro)	h

Unidad de pre-espesador mecánico

Se selecciona un espesado de tipo mecánico para asegurar una concentración constante de 6%.

Tabla 98. Especificación técnica de la unidad de espesado mecánico

Item/Parámetro	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Número de unidades - Operación	2	4	Pz
Número de unidades - Standby	0	0	Pz
Flujo de lodos a espesar	590	1180 Actual 1475 Futuro	m3/d
Contenido de sólidos secos	6	6	%p/p
Dosificación de polímeros (promedio)	3	3	gPolímero/kgTS
Horas de operación al día	14	20	h/d

Tanque de mezcla

El lodo primario y el exceso de lodo se mezclan en el tanque de mezcla antes de dirigirse al digestor anaerobio.

Tabla 99. Especificación técnica del tanque de mezcla de lodos

Item/Parámetro	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Volumen total del tanque de mezcla	18	45	m^3
Tiempo de retención	3	3.75 (Actual) 3 (Futuro)	h

Digestor anaerobio

El lodo del tanque de mezcla se dirige al digestor anaerobio.

Tabla 100. Especificación técnica del digestor anaerobio

Parámetros	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Número de digestores anaerobios	2	4	Pz
Volumen del digestor anaerobio por unidad	1,370	1,485	m3
SRT	20	21.7 (actual) 20 (futuro)	d
Temperatura de funcionamiento	35	35	°C
Producción estimada de biogás	2,781	5,562 (Actual) 6,952 (Futuro)	m3/d
Contenido de metano del gas	65	65	%

Tanque de desgasificación

El lodo del digestor anaerobio se dirige al tanque de desgasificación para su posterior deshidratación.

Tabla 101. Especificación técnica del tanque desgasificador de lodos

Parámetros	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Volumen del tanque de desgasificación	68	170	m3
Tiempo de retención	12	14 (actual) 12 (futuro)	h

Unidad de deshidratación – Centrífuga decantadora
El lodo del digestor anaerobio se dirige a la(s) centrífuga(s) decantadora(s).

Tabla 102. Especificación técnica de unidad deshidratradora de lodos

Item/Parámetro	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Número de unidades – Operación	1	2	Pz
Horas de Operación	12	12 (Actual) 16 (Futuro)	Pz
Volumen diario de la torta de lodo	28	56 (Actual) 70 (Futuro)	m3
Contenido de sólidos secos (mínimo)	18	18	%p/p
Contenido de sólidos secos (esperado)	20	20	%p/p
Dosificación de polímeros (promedio)	10	10	gPolímero/kgTSS

Sistema de dosificación de polímeros

El polielectrolito se utiliza en varias unidades de proceso para mejorar el rendimiento de separación de sólidos. La especificación siguiente indica la tasa general utilizada, se deberán realizar pruebas con los diferentes floculantes para establecer la dosis y cantidad de polielectrolito requerida.

Tabla 103. Especificación técnica de los sistemas de preparación de polímero

Sistema de polímeros	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Espesamiento de lodos	15	30 (Actual) 37.5 (Futuro)	kg/día
Deshidratación de lodos	45	90 (Actual) 112.5 (Futuro)	kg/día

3.10.4.3 Tren de biogás

El biogás generado será aprovechado para la cogeneración de energía eléctrica que suplementará parcialmente las necesidades de la PTAR, se describen los requerimientos mínimos del almacenamiento de biogás, la potencia del cogenerador y el diámetro mínimo del quemador de biogás en exceso.

Gasómetro

El biogás puede ser almacenado previo o posterior a su acondicionamiento para utilizarse en cogeneración

Tabla 104. Especificación técnica del tanque de almacenamiento de biogás

Parámetros	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Volumen del gasómetro	927	2,320 (2 x 1,160)	m3
Tiempo de retención	8	10 (Actual) 8 (Futuro)	h

Sistema de cogeneración

El sistema de cogeneración además genera el calor necesario para mantener la temperatura de 35°C en los digestores anaerobios.

Tabla 105. Especificación de la unidad de potencia de cogeneración

Parámetros	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Potencia	200	2x200 (Actual) 100 (Futuro)	kWe

Quemador

En caso de que no se pueda generar energía o se tenga exceso de biogás, será necesario quemarlo para evitar la acumulación, así como olores indeseables, esta operación se realizará de forma automática en caso de que el gasómetro presente alto nivel.

Tabla 106. Especificación técnica del quemador de biogás exceso

Parámetros	PTAR TLÁHUAC	PTAR CHALCO	Unidad
Diámetro	18	2 x 18	in
Caudal de Biogás (Estimado como base 5% de biogás no utilizado)	5.6	11.2 (Actual) 14 (Futuro)	m3/h

3.10.5 Diagrama de Flujo de Proceso

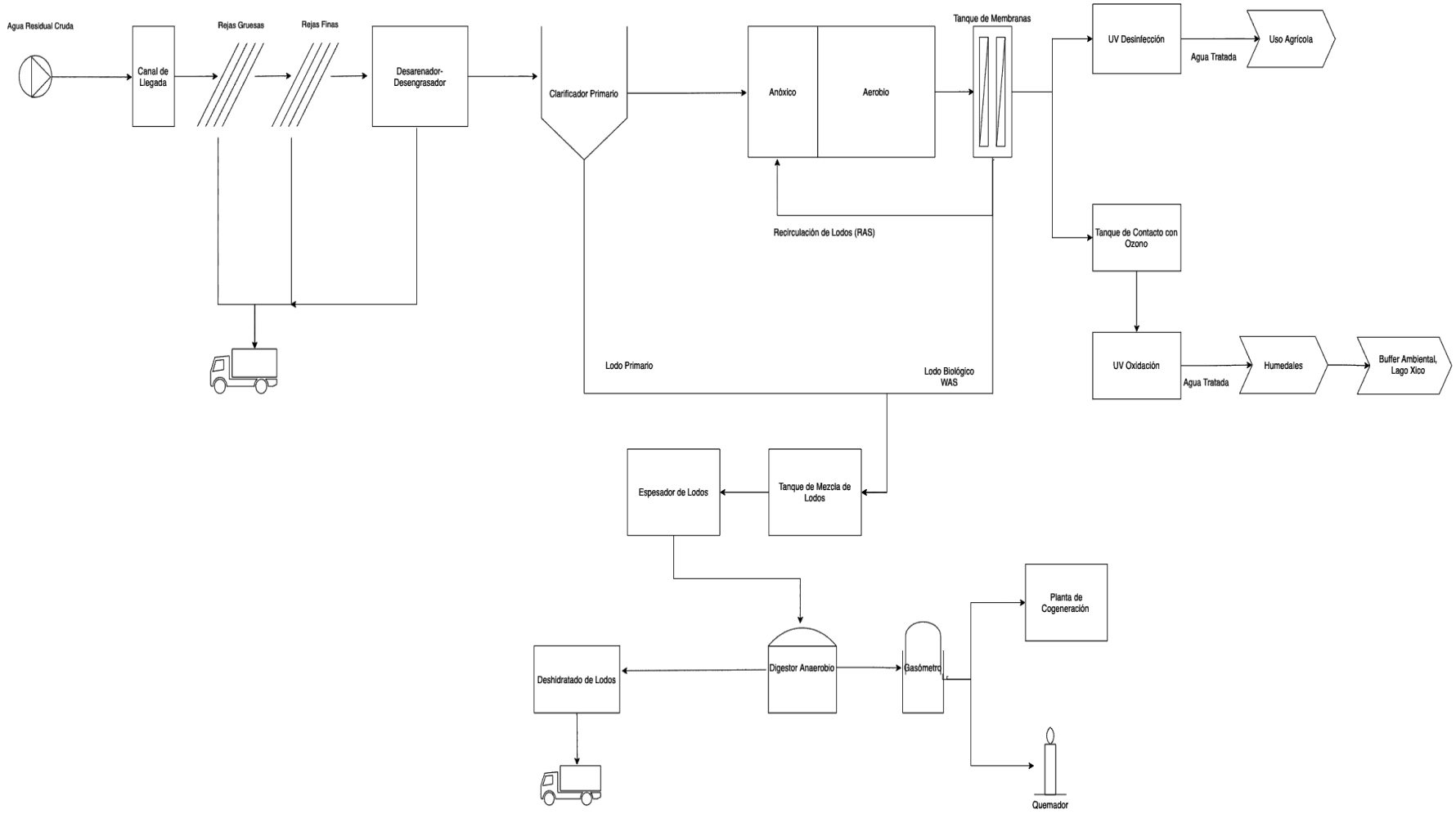


Figura 140. Diagrama General de Flujo de Proceso

3.10.6 Layout en Fase Conceptual

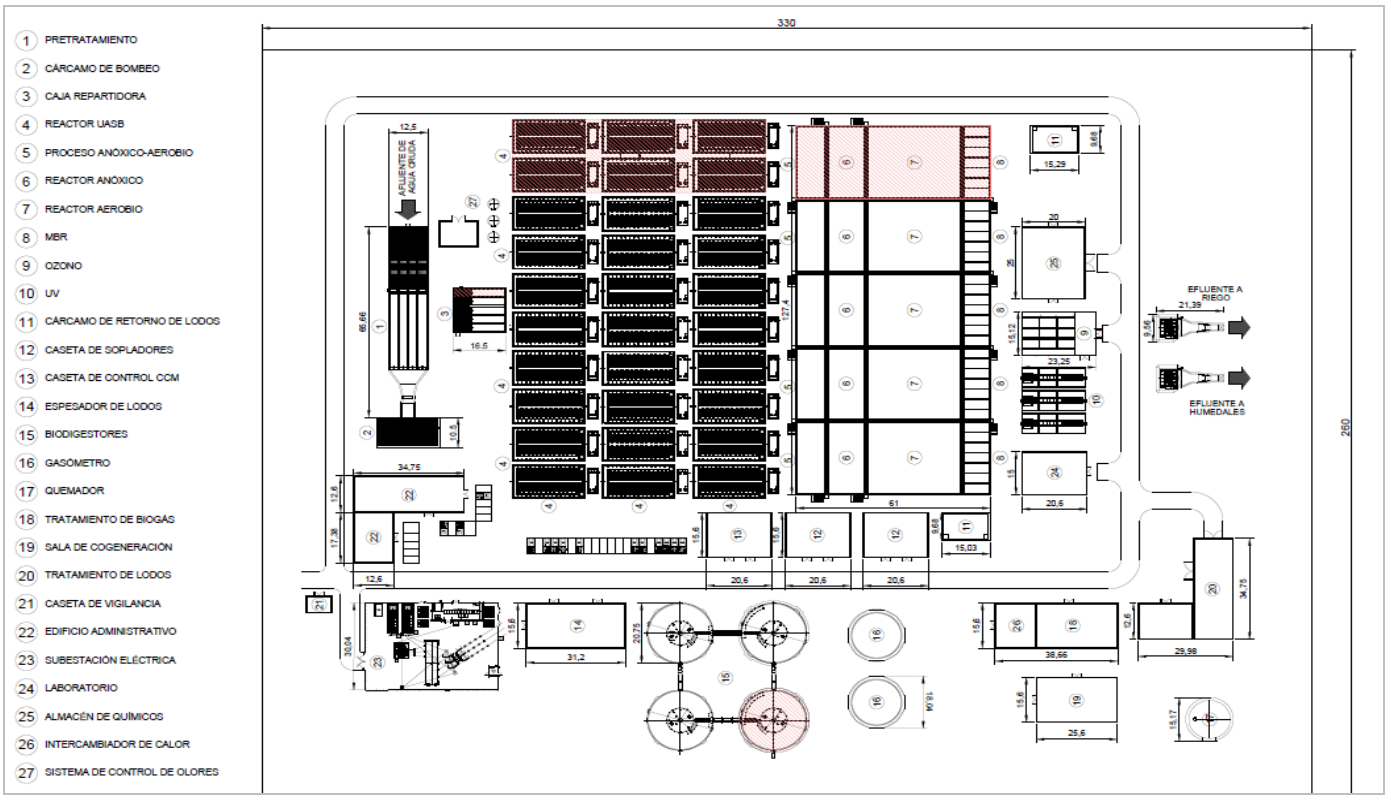


Figura 141. Arreglo General Conceptual PTAR Chalco

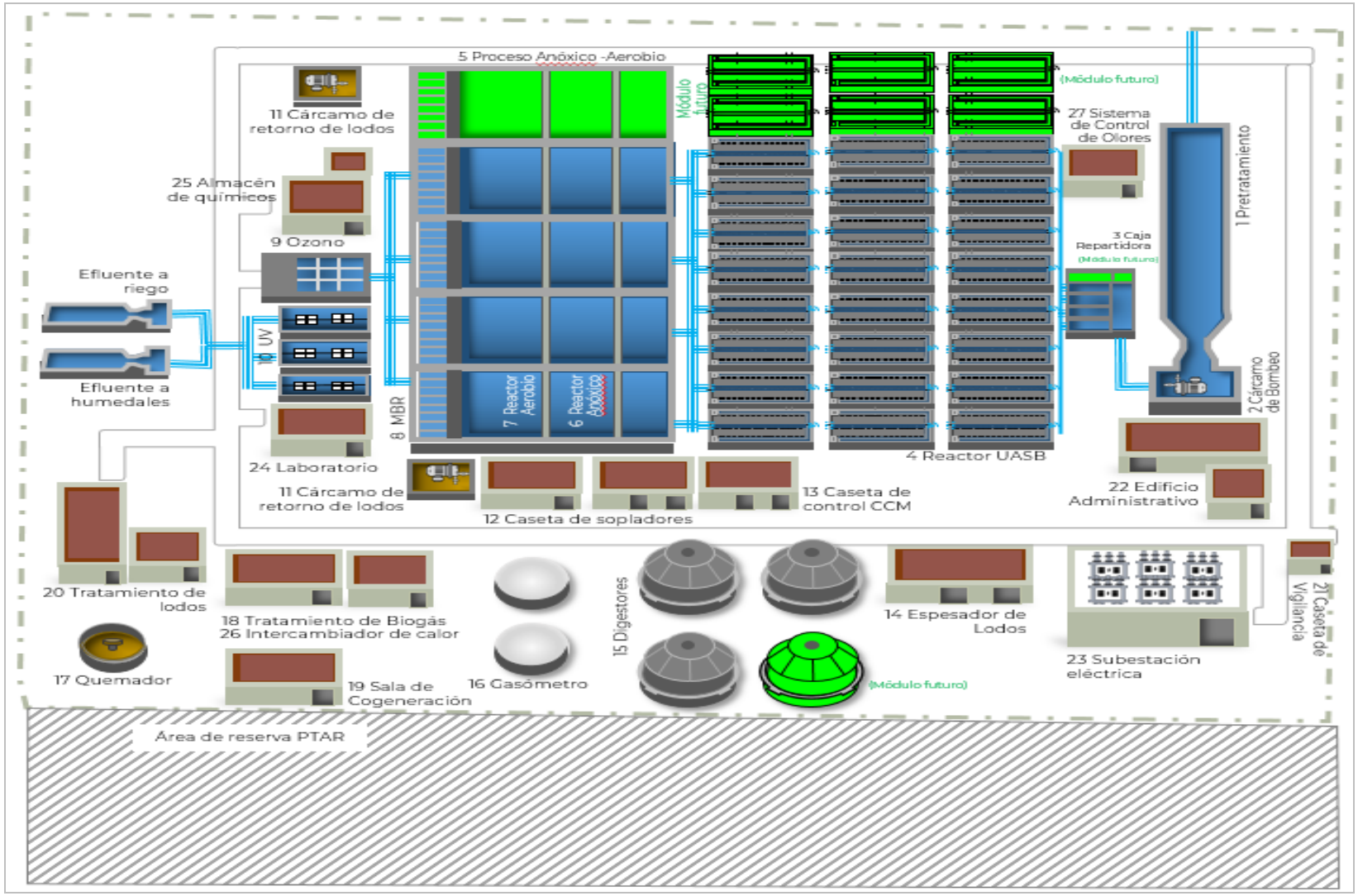


Figura 142. Sembrado PTAR Chalco

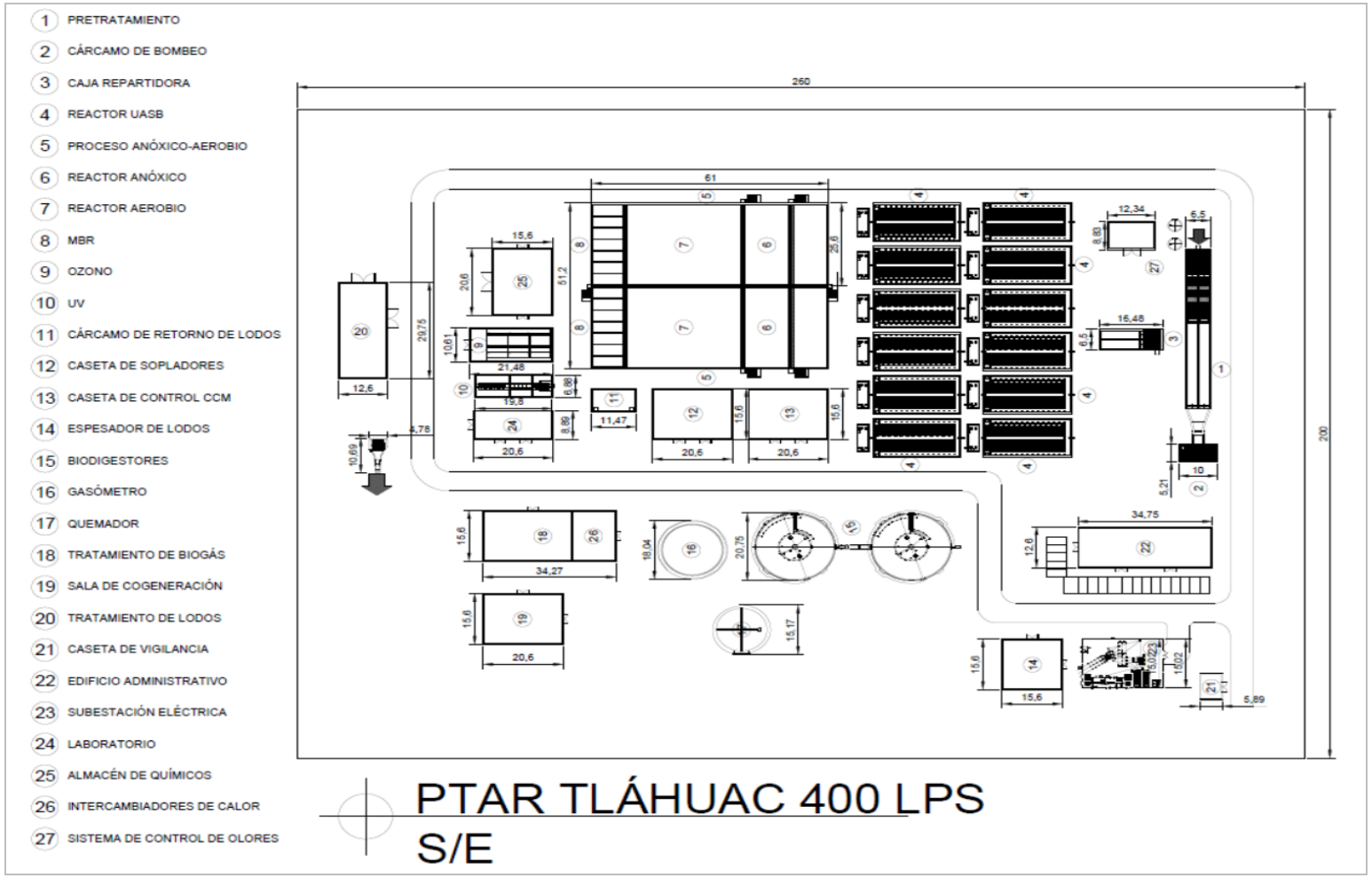


Figura 143. Arreglo General Conceptual PTAR Chalco

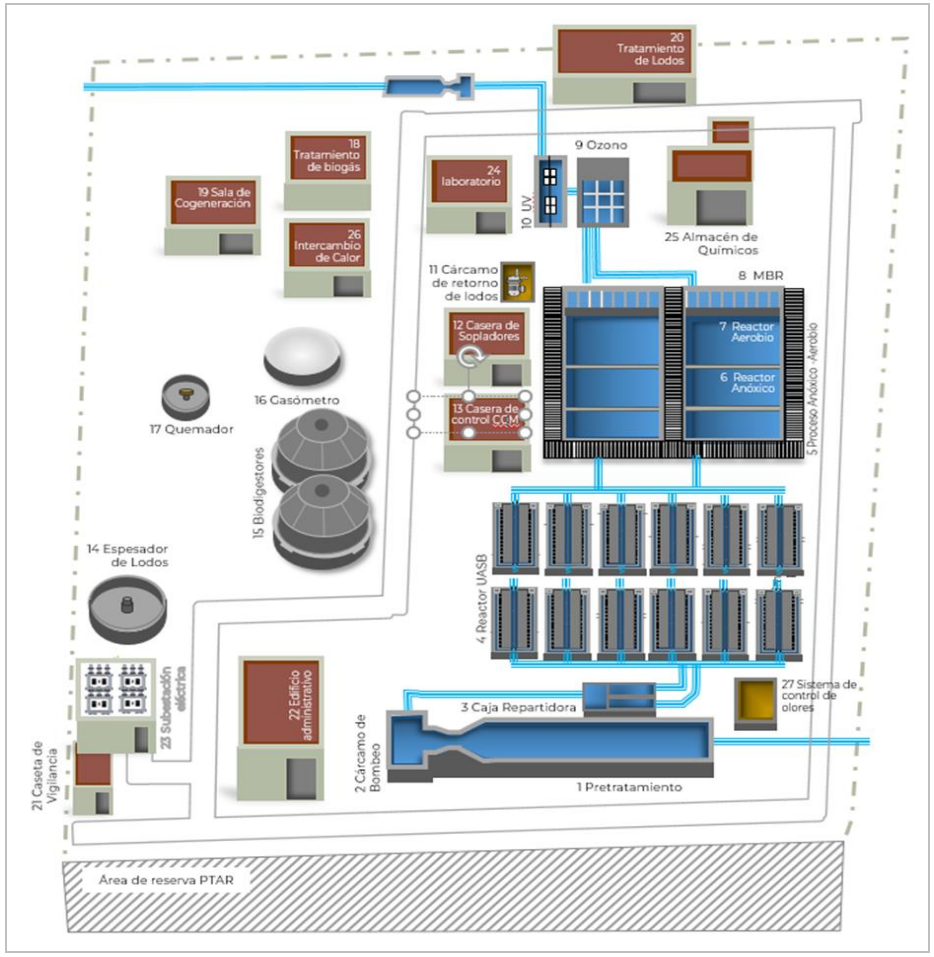


Figura 144. Sembrado PTAR Chalco

3.10.7 Estimación de costos

Tabla 107. CAPEX estimado

Planta	CAPEX Pretratamiento $MDP	CAPEX Primario $MDP	CAPEX Sistema de Control de Olores $MDP	CAPEX Secundario Aerobio $MDP	CAPEX Oxidación Avanzada y desinfección $MDP	CAPEX Espesamiento y Deshidratación de Lodos $MDP	CAPEX Digestión Anaerobia $MDP	CAPEX Cogeneración $MDP	CAPEX de tanques y auxiliares $MDP	CAPEX Estimado $MDP
PTAR Tláhuac 400 L/s: Pretratamiento-Clarificador Primario-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	20	60	10	150	50	18	35	21	90	454
PTAR Chalco 800 L/s (500 L/s para riego + 300 L/s a recarga lago) Pretratamiento-Clarificador Primario-Reactor MBR-Tratamiento Avanzado-Digestor Anaerobio y Deshidratador de Lodos - Cogeneración	35	100	18	270	50	30	60	36	150	749
PTAR Chalco 200 L/s recarga a lago a futuro Reactor MBR-Tratamiento Avanzado	-	-	-	92	40	-	-	-	60	192

El estimado en fase conceptual se encuentra en un rango de +30% a -15%
Tomando como base el costo de PTAR Chapultepec con MBR sin digestión anaerobia ni cogeneración pero con Ósmosis Inversa; para el presente estudio se asume que el costo de la oxidación avanzada es similar al de la Ósmosis Inversa

Factoraje a 6/10 para el escalado de planta:
Costo MBR PTAR Tláhuac = (400 L/s/ 170 L/s)^0.6 * 200 MDP = 334. 2 MDP
Incluyendo la inflación, con base en el INPC INEGI 2022 = 118, 2016 = 89, entonces 118/89 = 1.32 por lo que se añade un 32%
Costo MBR PTAR Tláhuac = 441 MDP + 56 MDP Digestión anaerobia y cogeneración = 497 MDP
Costo MBR PTAR Chalco = (800 L/s/ 170 L/s)^0.6 * 200 MDP = 506.5 MDP
Incluyendo la inflación, con base en el INPC INEGI: 2022 = 118, 2016 = 89, entonces 118/89 = 1.32 por lo que se añade un 32%
Costo MBR PTAR Tláhuac = 668 MDP + 96 MDP Digestión anaerobia y cogeneración = 764 MDP, en este caso al no ser la oxidación avanzada para todo el caudal, se toma una reducción equivalente de 5% en el costo total calculado, entonces, Costo PTAR Chalco= 725 MDP
De lo anterior se verifica que los métodos de estimación se encuentran en el rango aceptable de la etapa conceptual (+30% / -15%)

Tabla 108. Estimación de Costo Operativo PTAR Tláhuac

No	Nombre	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Diario
1		Uso de Electricidad			
1.1	Electricidad Sistema Aerobio MBR	14550	kWh/d	$1.50	$21,825.00
1.2	Electricidad Sistema de Tratamiento Avanzado	3220	kWh/d	$1.50	$4,830.00
2		Químicos			
2.1	FeCl/3	445	l/d	$45.00	$20,025.00
2.2	NaOCl	550	l/d	$25.00	$13,750.00
2.3	Ácido Cítrico	100	kg/d	$110.00	$11,000.00
2.3	Polímero para deshidratado de lodos	60	kg/d	$220.00	$13,200.00
2.4	Polímero para espesado de Lodos	15	kg/d	$180.00	$2,700.00
2.5	Agua Potable	100	m^3/d	$85.00	$8,500.00
3	Disposición de Residuos	27.16	m^3	$250.00	$6,790.00
3.1	Lodo	24	m^3/d		
3.2	Arenas	1.08	m^3/d		
3.3	Cribados	2.08	m^3/d		
5	Cogeneración				
5.1	Potencia teórica generada	4800	kWh/día	$1.50	-$7,200.00
6	Personal				
6.1	Costo de personal	1	Equipo	$30,550.00	$30,550.00
7	Mantenimiento				
7,1	Como % de la inversión estimada	0.2	%	$2,000.00	$2,000.00
8	Específicos				
8.1	Flujo Promedio Diario PTAR Tláhuac	34560	m^3/d		
8.2	Consumo específico de Potencia	0.51	kWh/(m^3)		
9	OPEX	Costo Diario Sin Cogeneración	Costo /m^3	Costo Diario Con Cogeneración	Costo / m^3
9.1	Sin considerar operación y mantenimiento	$102,620.00	$2.97	$95,420.00	$2.76
9.2	Considerando Operación y Mantenimiento	$135,170.00	$3.91	$127,970.00	$3.70

Tabla 109. Estimación de Costo Operativo PTAR Chalco (Actual-Etapa1)

No	Nombre	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Diario
1	Uso de Electricidad				
1.1	Electricidad Sistema Aerobio MBR	29100	kWh/d	$1.50	$43,650.00
1.2	Electricidad Sistema de Tratamiento Avanzado	2,580	kWh/d	$1.50	$3,870.00
2	Químicos				
2.1	FeCl3	790	L/d	$45.00	$35,550.00
2.2	NaOCl	980	L/d	$25.00	$24,500.00
2.3	Ácido Cítrico	180	kg/d	$110.00	$19,800.00
2.3	Polímero para deshidratado de lodos	112	kg/d	$220.00	$24,640.00
2.4	Polímero para espesado de Lodos	30	kg/d	$180.00	$5,400.00
2.5	Agua Potable	180	m^3/d	$85.00	$15,300.00
3	Disposición de Residuos	40	m3	$250.00	$10,000.00
3.1	Lodo	36	m^3/d		
3.2	Arenas	2	m^3/d		
3.3	Cribados	2	m^3/d		
5	Cogeneración				
5.1	Potencia teórica generada	9600	kWh/d	$1.50	-$14,400.00
6	Personal				
6.1	Costo de personal	1	Equipo	$40,550.00	$40,550.00
7	Mantenimiento				
7,1	Como % de la inversión estimada	0.2	%	$2,800.00	$2,800.00
8	Especificos				
8.1	Flujo Promedio Diario PTAR Chalco	69120	m^3/d		
8.2	Consumo específico de Potencia	0.46	$kWh/(m^3)$		
9	OPEX	Costo Diario Sin Cogeneración	Costo /m3	Costo Diario Con Cogeneración	Costo / m3
9.1	Sin considerar operación y mantenimiento	$186,210.00	$2.69	$171,810.00	$2.49
9.2	Considerando Operación y Mantenimiento	$229,560.00	$3.32	$215,654.00	$3.12

Tabla 110. Estimación de Costo Operativo PTAR Chalco (Con ampliación a Futuro)

No	Nombre	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Diario
1	Uso de Electricidad				
1.1	Electricidad Sistema Aerobio MBR	36375	kWh/d	$1.50	$54,562.50
1.2	Electricidad Sistema de Tratamiento Avanzado	3,220	kWh/d	$1.50	$4,830.00
2	Químicos				
2.1	FeCl/3	1000	l/d	$45.00	$45,000.00
2.2	NaOCl	1200	l/d	$25.00	$30,000.00
2.3	Ácido Cítrico	230	kg/d	$110.00	$25,300.00
2.3	Polímero para deshidratado	140	kg/d	$220.00	$30,800.00

	de lodos				
2.4	Polímero para espesado de Lodos	37.5	kg/d	$180.00	$6,750.00
2.5	Agua Potable	220	m^3/d	$85.00	$18,700.00
3	Disposición de Residuos	66.8	m3	$250.00	$16,700.00
3.1	Lodo	62	m3/d		
3.2	Arenas	2.4	m3/d		
3.3	Cribados	2.4	m3/d		
5	Cogeneración				
5.1	Potencia teórica generada	12000	kWh/d	$1.50	-$18,000.00
6	Personal				
6.1	Costo de personal	1	Equipo	$40,550.00	$40,550.00
7	Mantenimiento				
7,1	Como % de la inversión estimada	0.2	%	$3,200.00	$3,200.00
8	Especificos				
8.1	Flujo Promedio Diario PTAR Chalco	86400	m^3/d		
8.2	Consumo específico de Potencia	0.46	kWh/(m^3)		
9	OPEX	Costo Diario Sin Cogeneración	Costo /m3	Costo Diario Con Cogeneración	Costo / m3
9.1	Sin considerar operación y mantenimiento	$232,642.50	$2.69	$214,642.50	$2.48
9.2	Considerando Operación y Mantenimiento	$276,392.50	$3.20	$193,536.00	$2.8

3.10.8 Estimación del Personal Operativo Necesario

La siguiente tabla resume las necesidades de personal operativo para la correcta operación de las PTARS; si bien esta será automatizada, hay varias tareas que requieren la intervención de operadores capacitados así como ayudantes y personal de mantenimiento.

En cuanto al requerimiento del personal requerido para la operación y mantenimiento de las PTAR, es de al menos 26 personas.

Tabla 111. Estimación de personal requerido para la operación de la PTAR

Actividad	Personal	Escolaridad	Cantidad	No. de personas por departamento	PTAR Chalco Turno			PTAR Tláhuac turno		
					1	2	3	1	2	3
Administración	Gerente de Operación	Ingeniero Químico, Bioquímico o Ambiental	1	1				1		
	Gerente de Proceso	Ingeniero Químico, Bioquímico o Ambiental	1					1		
Proceso	Técnico Laboratorista	Técnico Laboratorista (Especialista en Análisis de Aguas)	1	20				1		
	Operador	Carrera trunca ingeniería o Bachillerato	12		2	2	2	2	2	2
	Aux. Operador	Secundaria	6		1	1	1	1	1	1
Mantenimiento electromecánico	Gerente de Mantenimiento Electromecánico	Ingeniero Electromecánico	1	5				1		
	Auxiliar Eléctrico	Técnico en Electricidad	1					1		
	Auxiliar Mecánico	Técnico Mecánico	1					1		
	Ayudante General	Carrera trunca técnico o Bachillerato	1					1		
	Ayudante General	Carrera trunca técnico o Bachillerato	1					1		

3.10.9 Cronograma general del proyecto

Se estima que el tiempo para la construcción de las PTAR, es de 18 meses.

Tabla 112. Programa de obra

PROGRAMA DE OBRA																		
Meses		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Proyecto Ejecutivo																			
	Estudios previos																		
	Análisis de alternativas																		
	Ingeniería básica																		
	Ingeniería de detalle																		
Construcción																			
	Obra civil, hidráulica, electromecánica, eléctrica e instrumentación																		
	Instalación de equipos																		
Puesta en marcha																			
	Capacitación																		
	Entrega de Planos, Manual de Operación y Dossier de equipos. Con garantías de fábrica.																		
	Entrega administrativa (Acta de entrega, Finiquito, Fianza de vicios ocultos)																		

3.11 Comentarios finales

Independientemente del Escenario A o B y el tipo de tratamiento en las PTAR, se requiere tomar en cuenta las siguientes consideraciones el proyecto:

- Detener completamente las fuentes contaminantes que llegan al lago (escurrimientos de tierras agrícolas y aguas residuales crudas o tratadas a nivel inferior).
- Verter agua residual tratada de excelente calidad al lago. Mientras el agua del lago se depura, se debe encontrar un punto de descarga del agua contaminada y permitir que exista un recambio del agua.
- Después del monitorear la calidad del agua del lago, y una vez alcanzada una calidad de agua requerida, se podría comenzar la operación de la planta potabilizadora.

Tratamiento de agua para consumo humano

3.12 Introducción

Para esta segunda etapa, junto con personal técnico de la CORENADR, participaron tres especialistas de la Universidad Nacional Autónoma de México y una de la Universidad Autónoma Metropolitana. Los resultados de esta segunda etapa, aparecen en la sección denominada Estudios de biodiversidad, calidad del agua y del suelo, e incluyen un apartado de bioindicadores.

Con base en los resultados de los análisis de calidad del agua del año 2019, realizados por el SACMEX, en distintas zonas del lago Tláhuac-Xico, así como los obtenidos en la campaña de muestreo de enero-febrero del año 2022, se infiere que la calidad del agua presenta contaminación por descarga de aguas residuales sin tratar.

Tomando como referencia los Límites Máximos Permisibles (LMP), establecidos en la normatividad de agua potable vigente NOM-127-SSA1-1994 Mod.2000 y los resultados de calidad del agua del año 2022, se identifica que parámetros como coliformes fecales, color, turbiedad, aluminio, cadmio, cromo total, nitrógeno amoniacal, pH, plomo, sodio, sólidos disueltos totales y sustancias activas al azul de metileno rebasan los LMP. En el caso, de cloruros, dureza total y sulfatos solo rebasan los LMP en las zonas 5, 3 (centro), 3 (profundo) y la zona 4. Respecto al parámetro fierro solo se rebasa el límite en la zona 3 (centro) y los fluoruros en la zona 5.

No obstante, la calidad del agua que ingresaría a la Planta Potabilizadora NO sería la que actualmente se encuentra en el lago, ya que previamente pasará por la PTAR con proceso terciario y oxidación avanzada, humedales y 6 meses de THR en el reservorio ambiental.

Por lo cual, partiendo de la premisa de que la fuente de abastecimiento es un agua superficial, sujeta a posibles variabilidades de calidad del agua, se consideró tomar como parámetros de diseño para la planta potabilizadora la calidad del agua de un cuerpo de agua similar, presa Madín, de la que se cuenta con muestreos recientes y que está sujeta a condiciones similares a las que estará sujeta la planta potabilizadora (Tabla 113). Por lo anterior, se evaluaron tres alternativas de trenes de potabilización, que puedan cumplir con los requerimientos de tratamiento necesarios para satisfacer la calidad de agua potable, que establece la normatividad vigente. Cabe destacar, que independientemente de los procesos aquí propuestos, se deberá fundamentar el tren mediante la realización de pruebas de tratabilidad, con el agua real que entrará a la Planta, para validar cualquier tren.

Tabla 113. Calidad del influente a la Planta Potabilizadora.

Parámetro	Unidades	
pH	UpH	6.70
Color	UPt/Co	70
Turbidez	UTN	70
Sólidos totales	mg/L	255
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L	188
Sólidos suspendidos totales	mg/L	67
Sodio total	mg/L	11
DQO total	mg/L	20

La Planta de Potabilizadora tendrá una capacidad total de 750 L/s, considerando módulos de 250 L/s cada uno, cuya calidad del agua efluente deberá cumplir con los LMP establecidos en la NOM-127-SSA1-2021 y proyecto de NOM-127-SSA1. En cuanto al manejo y disposición de los lodos químicos, se deberá cumplir la NOM-004-SEMARNAT-2002, recomendándose utilizar filtro prensa banda y/o centrifuga, recomendables para el deshidratado de lodos químicos.

3.13 Procesos de tratamiento para las características específicas de calidad del agua del influente

Ya que el lago será sometido a un proceso de tratamiento, se asume que en el lago se tendrán condiciones similares a lo presentado en la Tabla 113.

Bajo este escenario (escenario B), los contaminantes más difíciles a remover son los Contaminantes Emergentes, por lo que los procesos deben ser lo suficientemente robustos como para eliminar al máximo el potencial peligro de que se encuentren en la salida de la PP y sean consumidas por la comunidad.

Tomando en consideración la Tabla 6.1 y conforme a las experiencias recopiladas del estado del arte para potabilizar mediante el reúso indirecto de aguas residuales tratadas, se proponen como opciones para la remoción de los contaminantes:

- Alternativa 1. Precipitación fisicoquímica (filtración directa)– Filtro de arena – Ozono – Filtro biológico de carbón activado
- Alternativa 2. Filtro de arena – Ultrafiltración – Ozono – Filtro biológico de carbón activado
- Alternativa 3. Precipitación fisicoquímica – Sedimentación (clarificación convencional)- Filtro de arena – Ozono – Filtro biológico de carbón activado – Desinfección.

A continuación, se presenta una descripción breve de la alternativa seleccionada (C):

Precipitación fisicoquímica

Esta etapa es el resultado de dos fenómenos: Mezclado rápido y floculación. El primero, esencialmente químico, consiste en la adición y reacción del coagulante con el agua, principalmente sales de aluminio y hierro, para favorecer la formación de especies hidrolizadas con carga positiva, este proceso se realiza mediante turbulencia provocada por un mezclado rápido que puede ser mecánico o hidráulico, tales como: resaltos hidráulicos en canales, canaletas Parshall, vertedores, mezcladores mecánicos en línea, entre otros y va a depender del gradiente y el tiempo de retención.

El segundo proceso es fundamentalmente físico ya que se necesita una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas flóculos.

Ozono

Es un proceso que utiliza Ozono (O_3) como agente oxidante, utilizado para la desinfección, oxidación de hierro y manganeso, oxidación de sulfuros, oxidación de compuestos que provocan olor, sabor y color, oxidación de microcontaminantes, y su utilización no forma subproductos dañinos para la salud como los trihalometanos.

Debido a la inestabilidad del ozono, éste puede descomponerse fácilmente en oxígeno normal y oxígeno naciente, el cual es un fuerte oxidante, poco soluble en el agua y altamente volátil pues se estima que al mezclarse unos minutos con el agua pierde el 10% por volatización¡Error! Marcador no definido..

El ozono presenta desventajas como requerir de mayor tecnología para su dosificación, traduciéndose en un mayor costo de inversión y operación, además su vida útil en el agua es aproximadamente de 10 a 30 min y no tiene poder residual, a pesar de esto, es ampliamente utilizado en la industria debido a su capacidad de oxidación y desinfección aún mayor que el cloro.

Filtro de arena

Se define como el proceso para remover partículas sólidas en suspensión mediante el paso del flujo a través de un medio poroso como la arena, la filtración es el resultado de dos procesos: el transporte de las partículas y la adherencia con el medio filtrante. El transporte de las partículas se realiza bajo un fenómeno físico e hidráulico, mientras que la adherencia de las partículas obedece a una acción superficial.

Los filtros trabajan con una misma carga hidráulica y su capacidad de filtración depende del grado de ensuciamiento del medio filtrante. El tipo de filtro que se considera en esta tercera alternativa consiste en dos lechos de arena sílica o cuarzosa y de carbón de antracita, será del tipo flujo descendente y el retrolavado será a contraflujo; el agua para lavado provendrá de los demás filtros, primero se aplicará aire para aflojar toda la suciedad y romper las bolas de lodo y después el lavado únicamente con agua.

Filtro de carbón activado

El carbón activo es un material adsorbente que provee una superficie en la cual los iones o moléculas pueden concentrarse, la utilización de carbón activado como medio filtrante permite la remoción de contaminantes como nitrógeno amoniacal, carbón orgánico asimilable, productos derivados de la ozonación, sustancias causantes de olor y sabor, y pesticidas debido a su capacidad de adsorción¡Error! Marcador no definido..

El flujo de agua pasa a través del filtro de carbón activado, los contaminantes se adsorben en la superficie hacia el interior de los poros, que pueden ser de tamaño molecular, hasta saturarlos, provocando una mayor pérdida de carga en el sistema, debido a esto es importante realizar retrolavados para limpiar los filtros, que consiste en hacer pasar de forma ascendente una mezcla de agua y aire¡Error! Marcador no definido..

Desinfección

Corresponde a la última etapa del proceso, que tiene como objetivo garantizar la calidad del agua a nivel microbiológico y asegurar que se inocua para la salud del consumidor¡Error! Marcador no definido.. Para la desinfección se utiliza un agente físico o químico que destruye a los organismos, los agentes desinfectantes más usados son cloro libre, cloro combinado, dióxido de cloro, ozono, luz ultravioleta¡Error! Marcador no definido., en esta alternativa se propone usar gas cloro como desinfectante.

La desinfección requiere de ciertos factores que aseguren su eficacia, como el tipo de contaminante presente en el agua, la concentración del agente desinfectante, la temperatura del agua, la naturaleza y calidad del agua, pH y el tiempo de contacto, éste

último se refiere al tiempo disponible para que el cloro actúe sobre los microorganismos y debe ser de 15 a 30 min, para posteriormente almacenarse en una cisterna y enviarla a los tanques elevados de suministro y/o a la propia red de distribución**¡Error! Marcador no definido.**.

3.14 Costos de inversión, operación y mantenimiento

3.14.1 Inversión de la planta

Con base en las alternativas propuestas se elaboraron los costos de inversión, operación y mantenimiento de cada una de ellas, el procedimiento fue el siguiente: se cuantificaron los volúmenes de obra de los principales conceptos civiles, se utilizó como punto de partida el Catálogo general de precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado de la CONAGUA en su última versión, y se realizaron consultas de los costos estimados de los equipos electromecánicos y especializados, a continuación se desglosa por partidas el monto de inversión estimado.

Tabla 114. Desglose del monto de inversión por partidas.

No.	Partidas	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
1	Obra civil	$81,900,000.00	$71,900,000.00	$91,900,000
2	Obra de equipamiento	$104,000,000.00	$215,000,000.00	$110,000,000
3	Obra eléctrica	$11,520,000.00	$15,000,000.00	$12,000,000
4	Obra I&C	$14,700,000.00	$20,000,000.00	$15,000,000
	Total (Sin IVA)=	$212,120,000.00	$321,900,000	$228,900,000
	Total (Con IVA)=	$246,059,200.00	$373,404,000.00	$265,524,000

La obra civil: Corresponde a la construcción de tanques, cárcamos, cisternas, edificios de operación y administrativos, laboratorio, casetas de almacenamientos, barda perimetral, pavimentación y caseta de vigilancia.

Obra de equipamiento: Corresponde al equipamiento mecánico e instalación hidráulica tanto para la línea de agua como la línea de lodos, incluye el equipamiento menor.

Obra eléctrica: Corresponde a la instalación eléctrica de las líneas de agua y de lodos, edificios, alumbrado interior y exterior

Obra de instrumentación y control: Corresponde al equipo que servirá para control y recopilación de información durante el proceso de tratamiento

3.14.2 Costos de operación y mantenimiento

Para determinar los costos de operación y mantenimiento se evaluaron 4 rubros principales que están directamente involucrados con la operatividad de la planta y representan un gasto considerable, las cuales son I. personal, II. energía, III. reactivos y IV. Mantenimiento.

A continuación, se desglosan las consideraciones que se hicieron para calcular el costo por m^3 de agua potabilizada.

3.14.2.1 Personal

Para el personal se consideraron un total de 17 personas entre director, gerentes, oficiales, especialistas, vigilantes y laboratoristas, la tabla siguiente muestra el desglose del personal, con el sueldo considerando las prestaciones de Ley, en este rubro se considera la misma cantidad de personal para las tres alternativas:

Tabla 115. Personal considerado para la operatividad de la planta.

Cantidad	Personal	Salario nominal unitario mensual	Salario nominal total mensual	Salario nominal anual	Salario real mensual	Salario real anual
1	Gerente de operación	$27,375.03	$27,375.03	$328,500.36	$45,182.11	$542,185.36
1	Gerente de proceso	$25,854.20	$25,854.20	$310,250.34	$42,718.44	$512,621.31
1	Técnico laboratorista	$22,812.53	$22,812.53	$273,750.30	$37,791.10	$453,493.22
6	Operador	$22,812.53	$136,875.15	$1,642,501.80	$226,746.61	$2,720,959.32
3	Auxiliar de operador	$16,729.19	$50,187.56	$602,250.66	$83,809.26	$1,005,711.10
1	Gerente de mantenimiento electromecánico	$22,812.53	$22,812.53	$273,750.30	$37,791.10	$453,493.22
1	Auxiliar eléctrico	$16,729.19	$16,729.19	$200,750.22	$27,936.42	$335,237.03
1	Auxiliar mecánico	$16,729.19	$16,729.19	$200,750.22	$27,936.42	$335,237.03
2	Ayudante General	$12,166.68	$24,333.36	$146,000.16	$20,545.41	$246,544.89
17	Total=		$343,708.71	$4,124,504.52	$571,002.28	$6,852,027.38

*Considerar compartir cuadrilla de trabajo en la PTAR y Planta Potabilizadora.

3.14.2.2 Energía

Con respecto al gasto de energía, se calculó el requerimiento energético de los equipos que estarán en funcionamiento durante la operación de la planta (kWh/día), mediante una estimación de horas – operación al día, otro de los aspectos que también se consideró fue el alumbrado interno y externo, así como los equipos de instrumentación y control.

Para determinar el costo de energía por metro cúbico se recurrió a las tarifas horarias que la Comisión Federal de Electricidad CFE muestra en su página de internet, y que dependen del tipo de servicio, zona de suministro (para este caso es Regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur), mes y hora del día.

A continuación, se muestran los resultados del cálculo.

Tabla 116. Tarifa de energía por metro cúbico de agua potabilizada.

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
Tarifa por día variable + fija, $/día =	$24,464.24	$28,221.37	$24,548.53
Caudal, m^3/día=	64,800.00	64,800.00	64,800
Costo unitario, $/$m^3$=	$0.38	$0.44	$0.38

3.14.2.3 Costo de reactivos

Se estimaron los costos de reactivos de las tres alternativas para un periodo de un año, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 117. Costos por reactivos.

RESUMEN	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
Costo Coagulante ($/día)	$115,421.76	$118,584.00	$115,421.76
Costo Ajuste pH ($/día)	$57,348.00	$58,320.00	$57,348.00
Costo Floculación ($/día)	$5,832.00	$5,832.00	$5,832.00
Costo Desinfectante ($/día)	$1,749.60	$2,041.20	$1,749.60
Costo para Deshidratado ($/día)	$720.00	$720.00	$720.00
Total ($/día)=	$181,071.36	$185,497.20	$181,071.36
Total ($/mes)=	$5,507,466.49	$5,642,082.84	$5,507,466.49
Total ($/año)=	$66,089,597.83	$67,704,994.02	$66,089,597.83

3.14.2.4 Mantenimiento

Se deberá hacer un mantenimiento constante a la infraestructura de la planta, para que ésta se encuentre en óptimas condiciones, para tal efecto se estimó los elementos más susceptibles a recibir un mantenimiento constante incluyendo la infraestructura de los edificios, los cuales se desglosan a continuación.

Tabla 118. Costos por mantenimiento.

Núm	Equipo/instrumento	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
1	Dosificador Coagulante	$10,000.00	$10,000.00	$10,000.00
2	Floculador 1 (TREN 1, 2 Y 3)	$10,000.00	$0.00	$10,000.00
3	Bomba de Purga Lodos	$0.00	$5,000.00	$5,000.00
4	Equipo para lavados de filtros	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
5	Bomba de Agua Potabilizada	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
6	Bomba para Filtro Prensa de Banda	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
7	Banda Transportadora para entrega de lodos	$3,333.33	$3,333.33	$3,333.33
8	Generador de ozono	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
9	Dosificador Gas cloro	$3,000.00	$3,000.00	$3,000.00
10	Equipo para recuperado de filtros	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
11	Mezclador de equipo de preparación de polímero, 440 v	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
12	Equipo hidroneumático para agua de	$1,666.67	$1,666.67	$1,666.67

Núm	Equipo/instrumento	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
	servicios, 220 v			
13	Equipo de preparación de polímero anionico, 440 v	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
14	Bomba para Filtro Prensa de Banda	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
15	Filtro Prensa Banda	$6,666.67	$6,666.67	$6,666.67
16	Bomba Vertical Lavado Bandas	$5,000.00	$5,000.00	$5,000.00
17	Membrana ultrafiltración		$500,000.00	
	Subtotal Mensual=	$79,666.67	$124,666.67	$84,666.67

Núm	Edificación civil	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
1	Mantenimiento menor de las edificaciones	$8,333.33	$8,333.33	$8,333.33
	Subtotal Mensual=	$8,333.33	$8,333.33	$8,333.33
	Total mensual=	$88,000.00	$133,000.00	$93,000.00

RESUMEN

Una vez determinados los costos de operación y mantenimiento de la planta potabilizadora, se muestra una tabla resumen con el costo por metro cúbico.

Tabla 119. Resumen de costos por operación y mantenimiento.

Concepto	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
Salario de personal anual=	$6,852,027.38	$6,852,027.38	$6,852,027.38
Costo de energía anual=	$8,929,251.18	$10,300,572.61	$8,960,015.27
Reactivos anual=	$66,089,597.83	$67,704,994.02	$66,089,597.83
Mantenimiento anual=	$1,056,000.00	$1,596,000.00	$1,116,000.00
Total anual=	$82,926,876.40	$86,453,594.02	$83,017,640.48
Gasto (m^3/s)=	0.75	0.75	0.75
Volumen anual (m^3)=	23,652,000	23,652,000	23,652,000
Costo por m^3 potabilizado ($/m^3$)=	$3.50	$3.66	$3.51

Del análisis económico realizado, así como del análisis de alternativas, se optó por seleccionar para desarrollo la alternativa 3, de la cual se desarrollada la ingeniería conceptual.

3.14.3 Ingeniería conceptual de la alternativa seleccionada

La Planta de Potabilizadora tendrá con capacidad total de 750 L/s, considerando módulos de 250 L/s cada uno, cuyo tren de proceso es: pretratamiento y acondicionamiento del agua, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, ozono+biofiltración (oxidación avanzada), desinfección (Figura 140), cuya calidad del agua efluente deberá cumplir con los LMP establecidos en la NOM-127-SSA1-2021. En cuanto al manejo y disposición de los lodos químicos, se deberá cumplir la NOM-004-SEMARNAT-2002, recomendándose utilizar filtro prensa banda y/o centrifuga, recomendables para el deshidratado de lodos químicos.

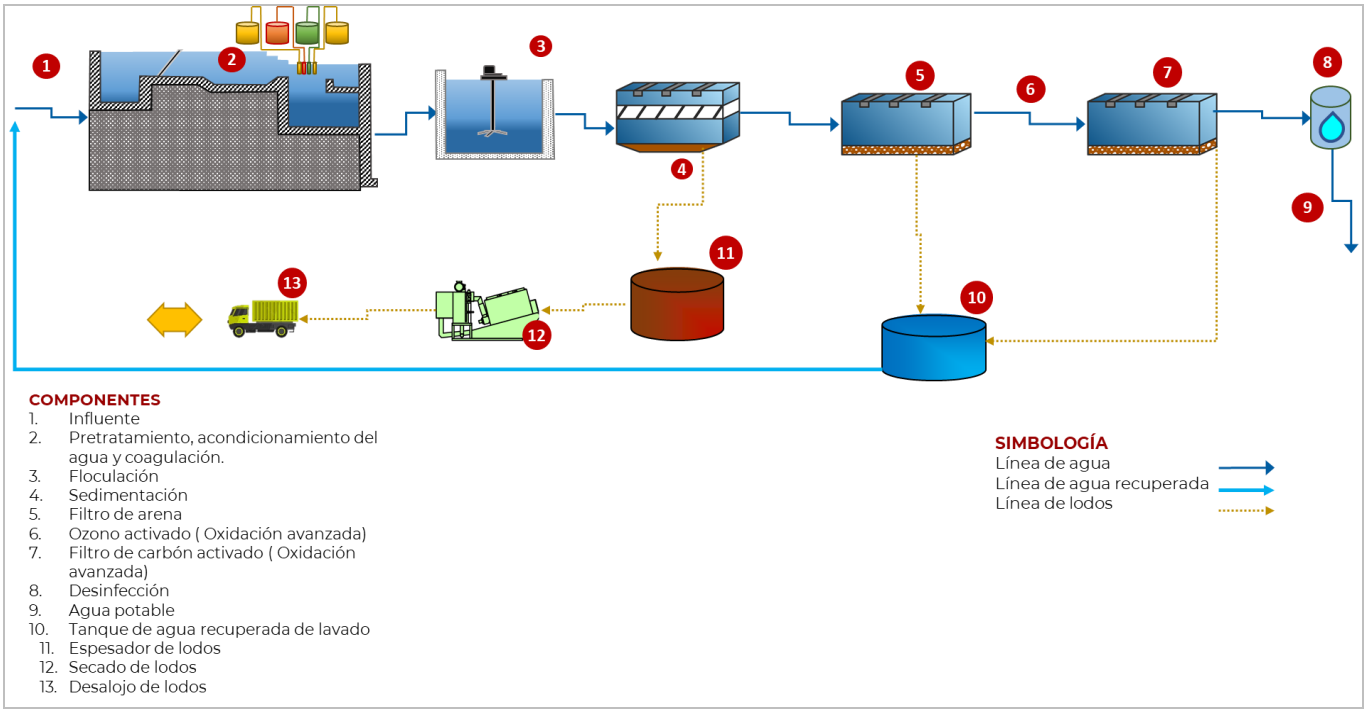


Figura 145. Diagrama de flujo de Planta Potabilizadora.

Para el desarrollo del proyecto de la Planta Potabilizadora se consideran las recomendaciones y criterios de la American Water Works Association (AWWA) y del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (CEPIS), de la OPS.

Con la alternativa seleccionada, se realizó un balance de masa representativo de como operaría el sistema.

Tabla 120. Balance de masa de la planta potabilizadora.

Fluido	Unidades	1 Agua Cruda	2 Agua a Mezcla Rápida	3 Agua a Flocular	4 Agua a Sedimentar	Agua a Ozonación	5 Agua a Filtración (Arena-Antracita)	7 Agua a Filtración (Carbón Activado)	8 Agua a Desinfección	9 Agua a Distribución	11 Purga de Lodo de Sedimentador	12 Lodo a Espesado	Agua Clarif. Esp.	13 Lodos a Deshidratado	Agua de Rechazo de Deshidratado	Lodo Deshidratado	Agua para Retrolavado (Arena-Antracita)	Agua para Retrolavado (Carbón Activado)	10 Agua Recuperada de Retr. (Arena-Antracita)	10 Agua Recuperada de Retrolavado (Carbón Activado)
Horas de operación	h/d	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	13	13	13	11	11	1.20	1.20	24	24
Días de operación	d/sem	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Caudal	L/s	750	782.17	782.17	782.17	780.39	780.39	749.96	749.96	747.62	1.78	3.29	3.19	0.10	3.81	0.08	405.73	202.87	20.29	10.14
	m^3/d	64,800	67,579.81	67,579.81	67,579.81	67,425.84	67,425.84	64,796.71	64,796.71	64,594.21	153.96	153.96	149.35	4.62	150.68	3.29	1,752.75	876.38	1,752.75	876.38
Sólidos	mg/L	70	67.70	67.70	67.70	60.25	1.51	0.35	0.75	0.75	3,333.33	3,487.91	107.87	112,775.89	103.71	153,794.50	0.75	0.75	9.07	9.01
	kg/d	4,536	4,575.43	4,575.43	4,575.43	4,062.21	101.56	22.52	48.80	48.65	513.22	537.02	16.11	520.91	15.63	505.28	1.32	0.66	15.90	7.90
Turbiedad	UTN	70	52.08	52.08	52.08	46.34	1.16	1.16	0.58	0.58							0.58	0.58	6.98	6.93
Color	U Pt-Co	70	70			105	35	17.50	14	14							14	14		

La superficie requerida para la Planta Potabilizadora es de 2.2 Ha.

El costo total de inversión estimado para la planta potabilizadora es del orden de los 300 MDP, cuyos montos de operación y manteamiento por metro cubico son del orden de los 3.50 pesos. En cuanto al requerimiento del personal requerido para la operación y mantenimiento de la Planta, es de al menos 9 personas, consideran que las actividades administración, mantenimiento electromecánico, gerente de proceso y técnico laboratorista, será la misma plantilla que esté a cargo de las PTAR.

Tabla 121. Requerimiento de personal.

Actividad	Personal	Escolaridad	Cantidad	No. De personas por departamento	Personal por turno		
					Turno 1	Turno 2	Turno 3
Proceso	Operador	Carrera trunca ingeniería o Bachillerato	6	9	2	2	2
	Aux. Operador	Secundaria	3		1	1	1

Se estima que el tiempo para la construcción de las Planta Potabilizadora es de 15 meses.

Tabla 122. Programa de obra.

PROGRAMA DE OBRA																
Meses		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Proyecto Ejecutivo																
	Estudios previos															
	Análisis de alternativas															
	Ingeniería básica															
	Ingeniería de detalle															
Construcción																
	Obra civil, hidráulica, electromecánica, eléctrica e instrumentación															
	Instalación de equipos															
Puesta en marcha																
	Capacitación															
	Entrega de Planos, Manual de Operación y Dossier de equipos. Con garantías de fábrica.															
	Entrega administrativa (Acta de entrega, Finiquito, Fianza de vicios ocultos)															

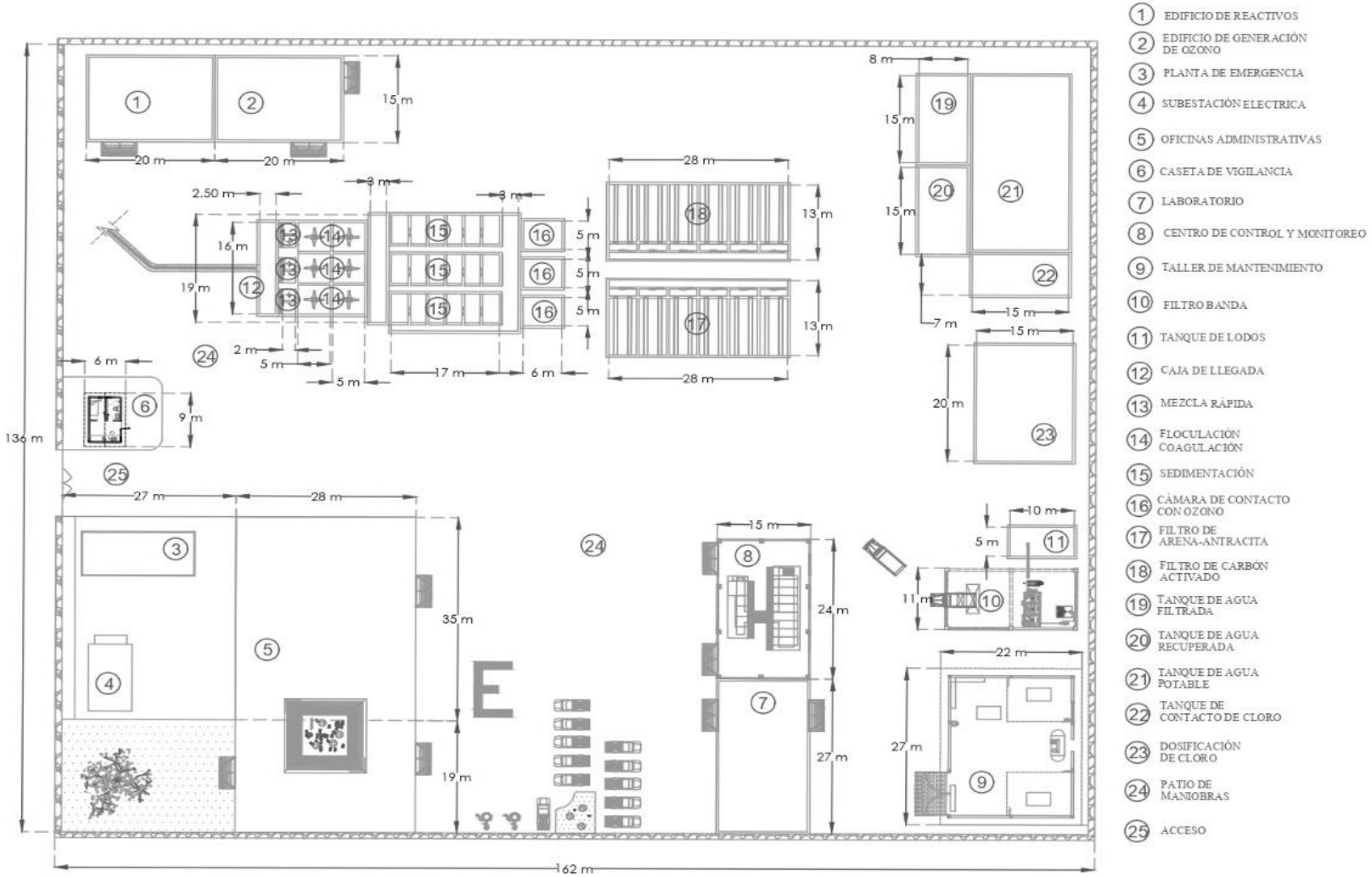


Figura 146. Dimensionamiento de la Planta Potabilizadora.

A continuación, se presenta el sembrado de cada una de las unidades:

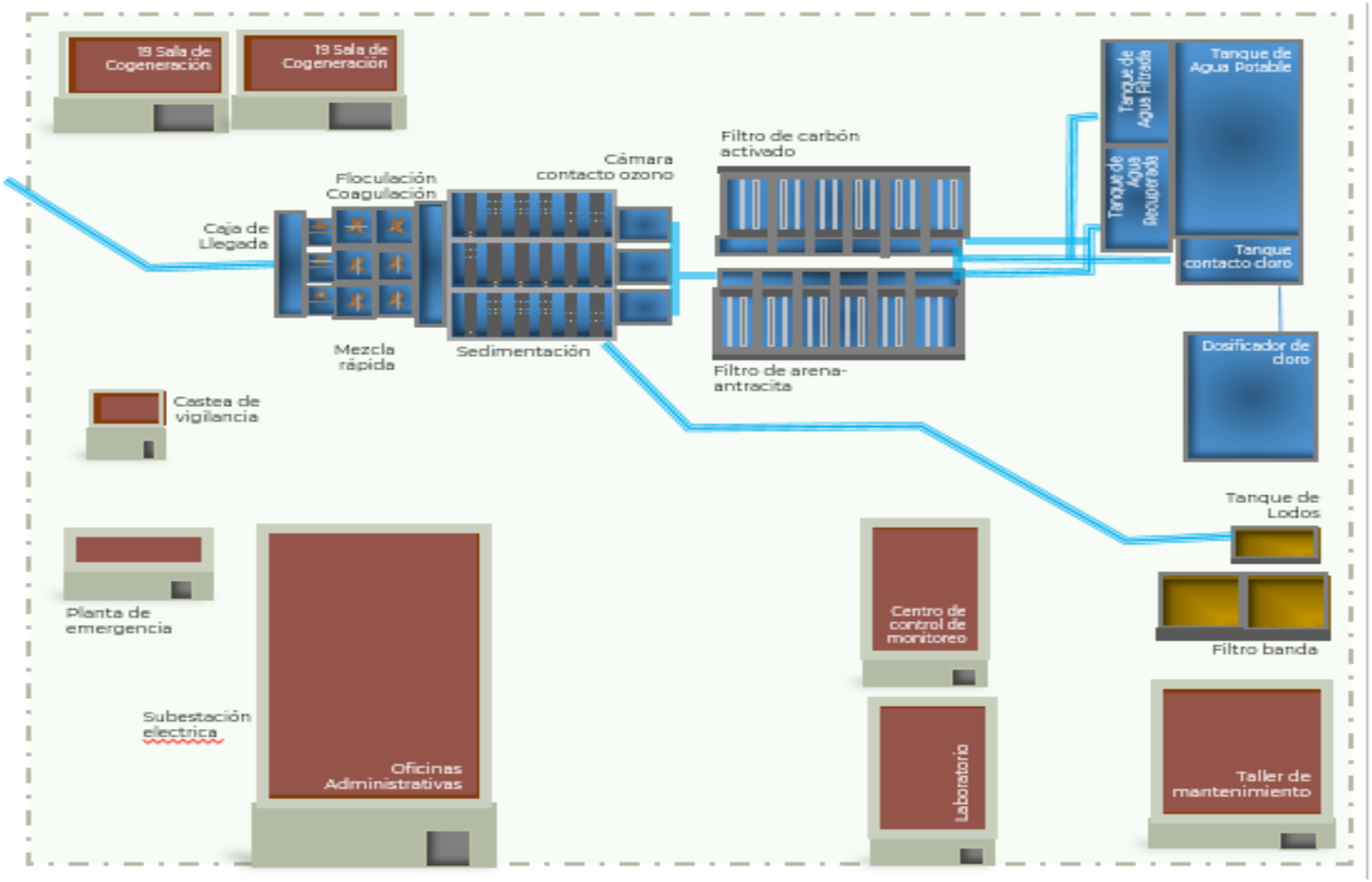


Figura 147. Sembrado de la Planta Potabilizadora.

Por otro lado, también se analizó el escenario donde se asume que la calidad del agua es la que actualmente se tiene en el lago, la cual presenta una contaminación presuntamente derivada de descargas de aguas residuales crudas municipales, los escurrimientos de las parcelas aledañas, y la concentración de los contaminantes y sales (SDT) por un efecto de evaporación en el lago.

Para este escenario se considera que las opciones tecnológicas necesariamente incluyen ósmosis inversa para remover SDT. Para este escenario se analizan tres procesos:

Opción A.1- Precipitación fisicoquímica – Filtro de arena – Ultrafiltración – Ósmosis inversa para el 70% del flujo – Oxidación avanzada (UV/H_2O_2).
Opción A.2- Precipitación fisicoquímica – Filtro de arena – Ultrafiltración – Ósmosis inversa para el 100% del flujo – Remineralización.
Opción A.3- Precipitación fisicoquímica – Filtro de arena – Ozono – Filtro biológico de carbón activado – Ósmosis inversa para el 100% del flujo – Remineralización.

Opción A1

Los sólidos suspendidos totales (SST) se removerán principalmente por una sedimentación a gravedad, empleando adición de químicos (coagulante y floculante). Posteriormente se adicionan filtros de arena a gravedad para remover el remanente de SST, así como color y turbiedad, que haya quedado en el agua.

La precipitación fisicoquímica descrita en el párrafo anterior es una operación unitaria que siempre se recomienda emplear cuando la fuente de agua de la potabilizadora proviene de un cuerpo de agua superficial.

El siguiente proceso es la ultrafiltración (UF), la cual se utiliza para la remoción de moléculas de mayor tamaño, como bacterias, levaduras, cierto tipo de gelatinas, algunos virus, etc. Sin embargo, plaguicidas, herbicidas, dureza y sales aún pueden atravesar las membranas de la UF.

Hasta este paso, los sólidos disueltos totales (SDT) no solamente no se han removido, sino que pueden incrementar debido a la adición de químicos. La siguiente barrera para la remoción de contaminantes es la ósmosis inversa (OI). Su principio es similar al de la Ultrafiltración, una membrana semipermeable separa las moléculas de acuerdo con su tamaño. La OI prácticamente deja pasar únicamente el agua.

En esta opción, el 70% del flujo de agua pasará por la OI, el restante 30% será enviado directamente a la última parte del proceso. Esta relación de 70-30 permitirá equilibrar el agua al nivel de sales permitidos en la NOM-127-SSA1-1994 Mod.2000, las cuales no deben sobrepasar cierto límite, pero tampoco estar en completa ausencia porque de otra manera, el agua no es adecuada para consumo humano.

La última etapa del proceso es la Oxidación Avanzada (OA), en la cual se empleará peróxido de hidrógeno (H_2O_2) junco con luz ultravioleta (UV). La OA es una etapa de seguridad que tiene la finalidad de oxidar compuestos emergentes (CEs), especialmente provenientes de la corriente de agua que no pasó por la OI.

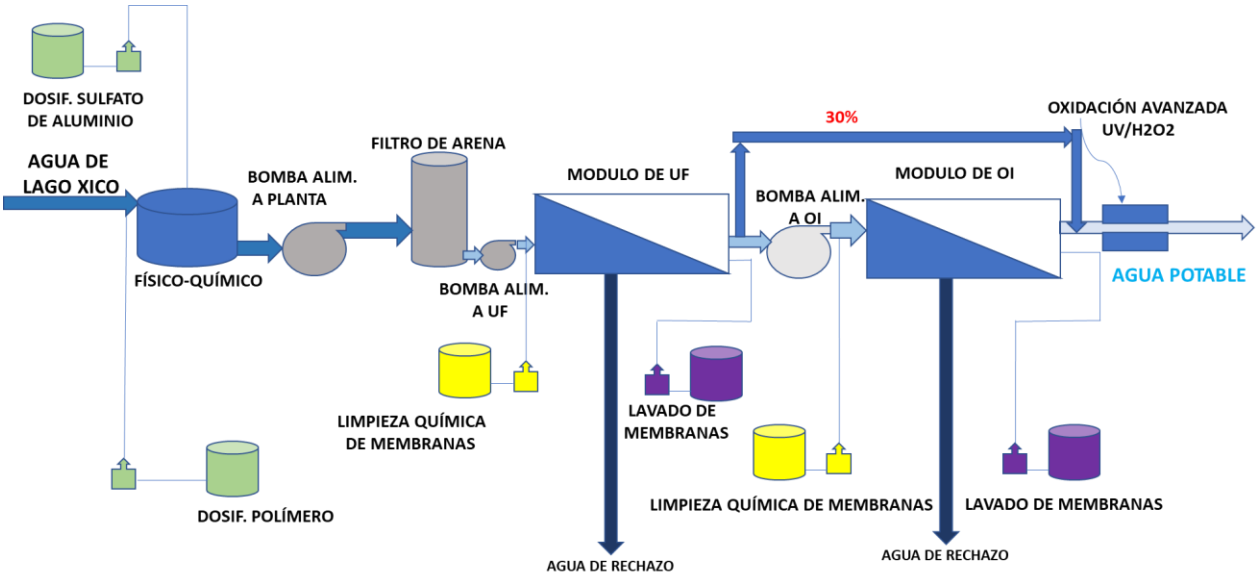


Figura 148. Diagrama general de proceso para la PP. Opción A1

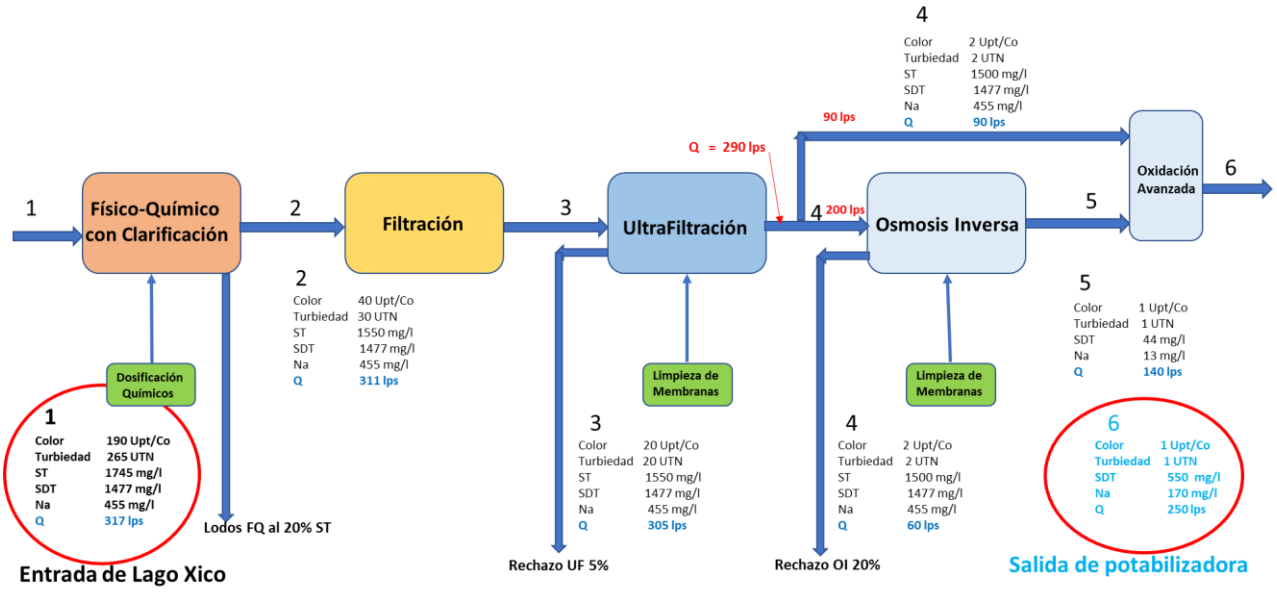


Figura 149. Perfil de remoción de contaminantes en la PP. Opción A1

Opción A2

Es un proceso muy similar a la opción A1, con la diferencia de que el 100% del flujo de agua sí pasa por la ósmosis inversa (OI). Debido a que el permeado de la OI tiene una concentración muy baja de sales, para que sea potable es necesario agregarle minerales en un proceso de recarbonatación que se le conoce como remineralización. La OI es una barrera muy robusta contra CEs, por lo cual no se considera que sea necesario el paso de Oxidación Avanzada que sí está incluida en la opción A1.

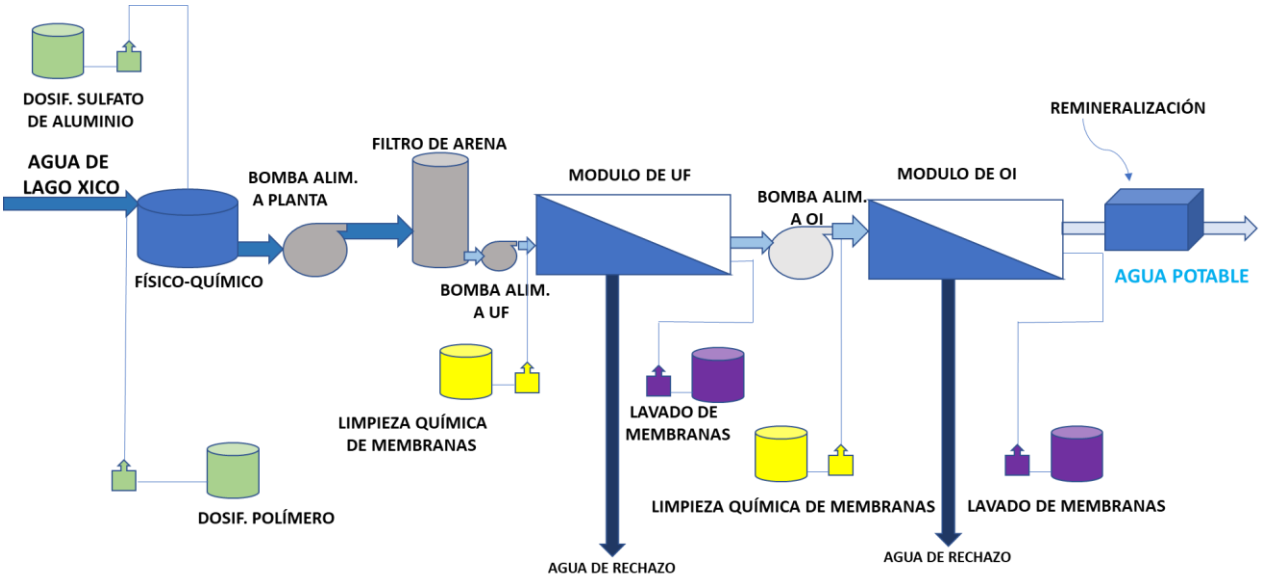


Figura 150. Diagrama general de proceso para la PP. Opción A2

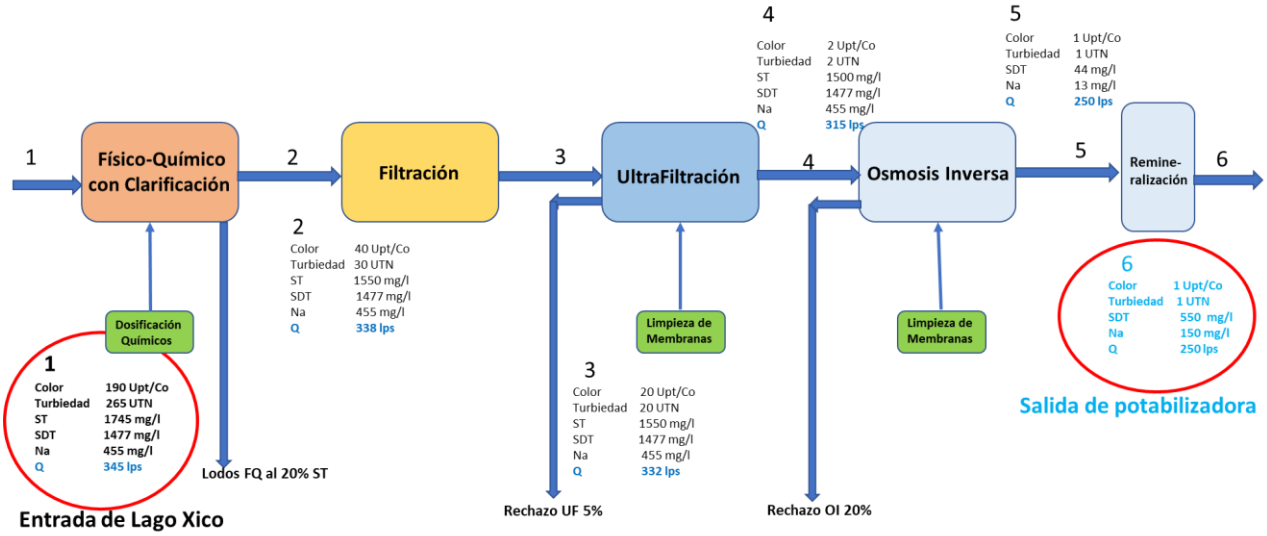


Figura 151. Perfil de remoción de contaminantes en la PP. Opción

Opción A.3

En esta opción se cambia la ultrafiltración por una ozonación seguida por una filtración biológica sobre carbón activado (BAC). La adición de ozono cortará las cadenas de los compuestos refractarios para que se hagan más susceptibles a una oxidación biológica, posterior a la ozonación. En el filtro se adiciona un medio soporte (carbón activado granular) para que los microorganismos remuevan la materia orgánica biodegradable. Debido a que parte del ozono se convierte en oxígeno, el agua que llega al filtro de carbón activado tiene las condiciones ideales para que exista un desarrollo de bacterias aerobias.

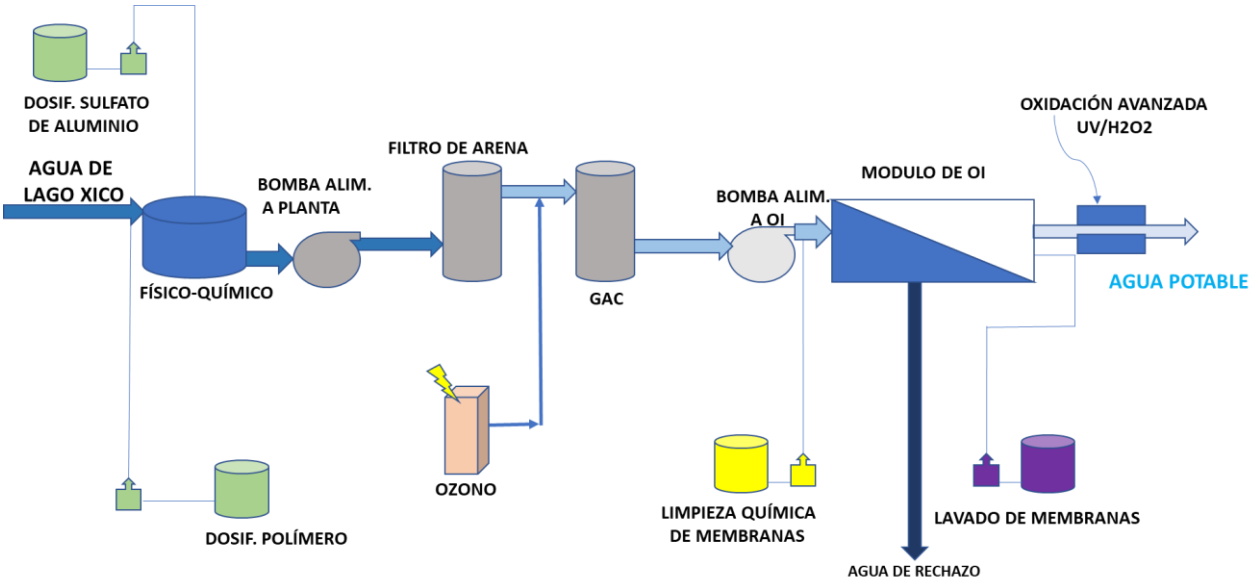


Figura 152. Diagrama general de proceso para la PP. Opción A3

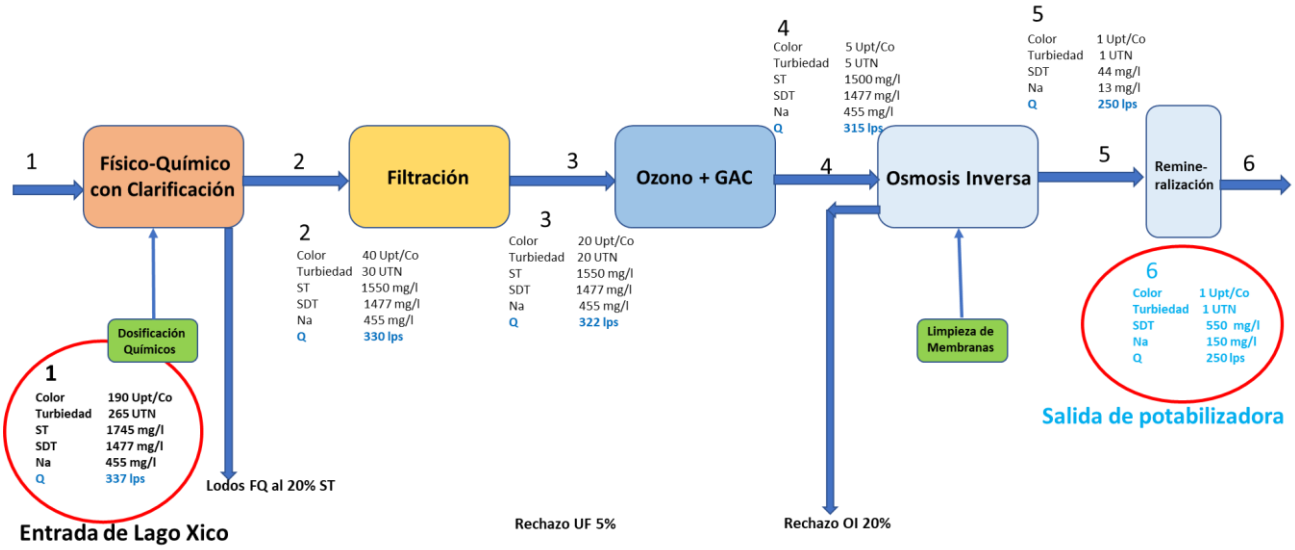


Figura 153. Perfil de remoción de contaminantes en la PP. Opción A3

3.14.4 Comentarios finales

La tabla en referencia de la cual se partió para hacer esta propuesta, muestra agua de buena calidad, sin embargo, para llegar a éste nivel, deberá pasar por una serie de pasos o procesos que aseguren la calidad propuesta y que se mencionan a continuación de manera enunciativa, no limitativa:

-Antes de iniciar operaciones para el diseño de la potabilizadora, deberá estar lleno completamente el Lago. Teóricamente deberán pasar al menos 6 meses, considerando que tiene un tiempo de retención mínimo de 6 meses.
-Una vez lleno el Lago, se deberá iniciar con el estudio de caracterización del agua del Lago. Los estudios para que sean confiables deberán abarcar al menos 6 meses.
-Se deben de realizar estudios de tratabilidad del agua previo al diseño ejecutivo del proyecto.

3.15 Cierre

El presente informe tuvo como objetivo comparar las diversas soluciones técnicas para la planta de tratamiento de aguas residuales y la planta potabilizadora en el Lago Tláhuac-Xico, para éste se pueda emplear como reservorio ambiental para el reúso potable, con el fin de obtener 750 L/s de agua potable a partir de agua residual tratada ingresada a este reservorio.

Para el análisis de este proyecto se consideraron aspectos de normatividad (internacional y nacional), se analizaron casos de estudio de reúso en el mundo y en México, se realizó una campaña de muestreo en el lago, sus afluentes y posibles fuentes de agua residual en la zona para plantear las bases de diseño del proyecto, y con toda esta información se seleccionaron los trenes de proceso y se costearon las plantas tanto de tratamiento de aguas residuales como la potabilizadora.

Se recomienda que el proyecto de tratamiento de agua se realice en cuatro etapas:

ETAPA	DESCRIPCIÓN
1	Ingeniería, construcción, instalación y arranque de las PTARs Tláhuac y Chalco
2	Monitoreo y estabilización de la calidad de agua en el lago
3	Ingeniería, construcción, instalación y arranque de la Planta Potabilizadora.
4	Monitoreo de la eficiencia de la Planta Potabilizadora antes de suministrar agua a la red (mínimo 3 meses).
5	Construcción, instalación y arranque de 200 L/s de agua residual en la PTAR Chalco

Capítulo 4

Restauración ecológica y Red Hidroagrícola

Restauración ecológica y Red Hidroagríola

4.1 Introducción

El Valle de Chalco se localiza al sur-oriente de la cuenca del Valle de México, comprendiendo un paisaje de planicie descubierta generada por la disecación del lago de Chalco que se tuvo a inicios del siglo XX con la apertura del dren del Canal de la Compañía. A partir de lo cual se decretó el reparto agrario de las nuevas tierras, para los ejidos locales, y que posteriormente, por el desarrollo económico de la capital del país y su consecuente crecimiento demográfico, en estos valles, se dio lugar a una de las conurbaciones más importantes de la Zona Metropolitana del Valle de México.

En la parte más baja de esta planicie, se instaló en los años setenta una batería de 14 pozos que comprende al sistema Mixquic-Santa Catarina, como parte del Plan de Acción Inmediata (PAI)[1], el cual suministra un importante volumen de agua en bloque a la Ciudad de México, en su zona oriente.

Como consecuencia de la extracción del agua subterránea en esta región de la subcuenca, se han manifestado tasas de hundimientos del terreno cercanas a una media de 40 cm anuales. La deformación del terreno ha creado nuevas depresiones topográficas que, aunadas a la pérdida paulatina de la capacidad de drenaje del Valle de Chalco, han dado lugar al resurgimiento de cuerpos de agua someros que actualmente se denominan como el sistema lacustre de Tláhuac-Xico.

La naturaleza geológica e hidrográfica de esta región, ha exacerbado el riesgo por inundaciones de esta zona conurbada durante la época de lluvias, generando fuertes presiones en la inversión de obras hidráulicas para el control y desalojo de las aguas residuales y los torrentes de la temporada de lluvias.

Bajo este esquema de manejo hidráulico de los valles que comprenden Tláhuac y Chalco, el sistema lacustre de Tláhuac-Xico se ha operado como un vaso regulador para la captación de los drenajes de la zona, generando una fuerte presión sobre la biodiversidad de la región, así como un riesgo sanitario para la población de las inmediaciones.

Desde un punto de vista biológico, el Lago Tláhuac-Xico es considerado un área de importancia hidroagrícola e hidroecológica que se encuentra relacionado con al menos siete núcleos agrarios de la Ciudad de México. A pesar de que el lago es un cuerpo de agua que ha sufrido importantes modificaciones antropogénicas, como se describió con antelación, sigue siendo un área catalogada internacionalmente por *Bird Life International* como un refugio de importancia para las aves (AICA), particularmente las acuáticas.

Debido a la relevancia socio ambiental que guarda el Lago Tláhuac-Xico, durante el año 2021, personal de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENADR) del

[1] Con la finalidad de abastecer de agua potable a las poblaciones de la Cuenca del Valle de México en 1970 la Comisión de Aguas del Valle de México elaboró un Plan General de Acción Inmediata, el cual inició su operación en el año 1974 con el Sistema de Pozos del Sur, al que pertenece el sistema Mixquic-Santa Catarina. Debido a la creciente demanda de agua potable en la Zona Metropolitana del Valle de México, continúa operando a través del Sistema de Pozos denominado Plan de Acción Inmediata (PAI).

Gobierno de la Ciudad de México, realizó una primera caracterización de los siguientes tres componentes a) la degradación del suelo y la contaminación debido a la presencia de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, b) la calidad del agua, y, c) la distribución de la biodiversidad. En este trabajo, dicha caracterización se presenta como parte de los antecedentes junto con la problemática de la red hidroagrícola.

A partir de la información generada en esta primera etapa de estudio, se pudo comprender que las diferentes secciones del Lago, se comportan de manera heterogénea y debido a ello, se propuso una zonificación ambiental basada en los tres componentes estudiados.

Adicionalmente, a partir de la identificación de los tiraderos de residuos sólidos urbanos y de manejo especial (residuos de la construcción), junto con el ejido de Tláhuac, se realizó un mega tequio para retirarlos y ello constituyó una medida de mejora ambiental inmediata y de grandes dimensiones.

Posteriormente, a través del *proyecto "Habilitación y Aprovechamiento Integral del Agua en el Lago Tláhuac-Xico"*, del cual forma parte el componente de restauración ecológica, la CORENADR caracterizó de manera más detallada en conjunto los tres componentes inicialmente utilizados como indicadores de la calidad de este complejo bio-cultural denominado como el Lago Tláhuac-Xico.

Para esta segunda etapa, junto con personal técnico de la CORENADR, participaron tres especialistas de la Universidad Nacional Autónoma de México y una de la Universidad Autónoma Metropolitana. Los resultados de esta segunda etapa, aparecen en la sección denominada Estudios de biodiversidad, calidad del agua y del suelo, e incluyen un apartado de bioindicadores.

Con toda la integración de resultados, finalmente se propuso una estrategia de restauración hidroecológica regional que constituye el último apartado de este capítulo.

4.2 Antecedentes

4.2.1 Caracterización Ambiental

4.2.1.1 Aportaciones de agua

Mediante una serie de visitas de campo que realizó la CORENADR junto con el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y autoridades agrarias locales, se ubicaron las entradas de agua y el caudal aproximado de los lugares que aparecen a continuación:

- Agua residual proveniente de las colonias aledañas del centro de la Alcaldía de Tláhuac, del pueblo de San Juan Ixtayopan y eventualmente del Canal General.
- Agua tratada proveniente de la planta de rebombeo de El Tequesquite y El Toro, ambas ubicadas sobre la carretera Tláhuac-Chalco.
- Entrada de emergencia de agua combinada del Canal General, que sirve como desahogo cuando el Canal General tiene riesgo de desbordamiento hacia las colonias de Valle de Chalco.

En la siguiente Figura 154 se muestran los puntos de acceso diferenciados por colores según su procedencia.

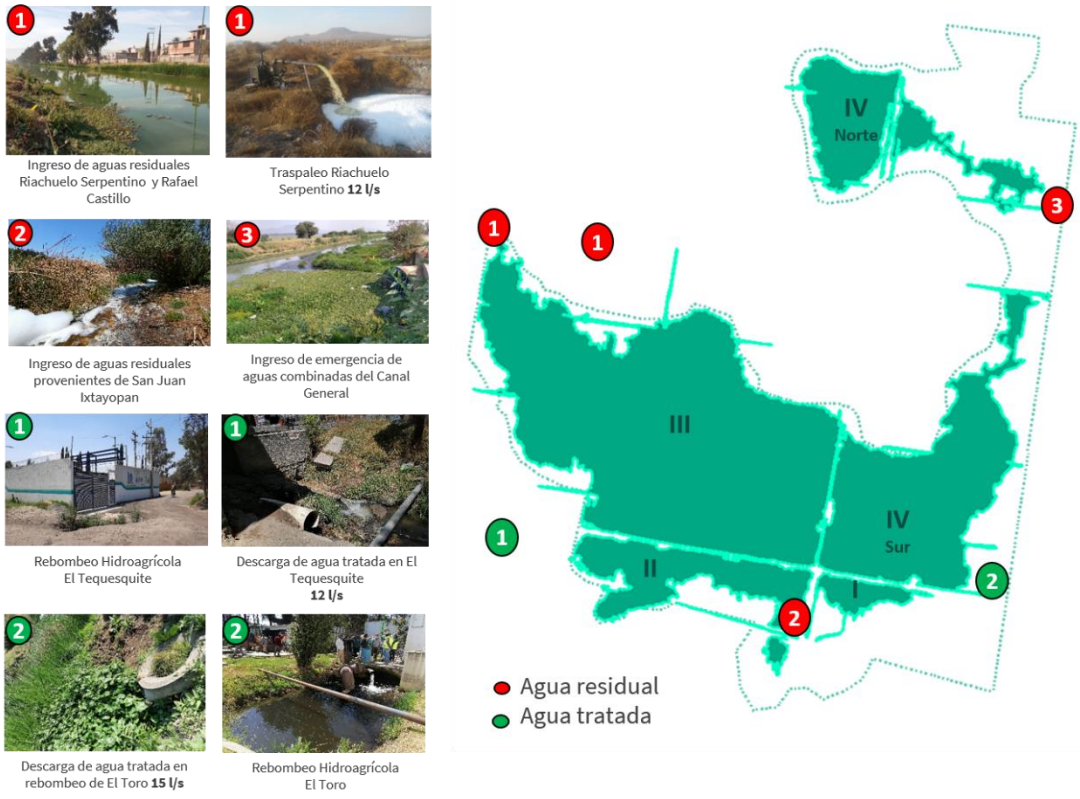


Figura 154. Ubicación de aportaciones de agua residual, tratada y combinada en el Lago Tláhuac-Xico.

4.2.1.2 Parámetros físicos y climáticos

En las estaciones climáticas cercanas al Lago Tláhuac-Xico se tienen registradas precipitaciones acumuladas de 461 mm anuales en promedio, mientras que las tasas de evaporación son de 1,295 mm anuales; ello significa que existe una pérdida de agua significativa y por lo mismo, el Lago no puede existir sólo con el aporte de la precipitación local, sino que, para asegurar su permanencia, debe permitirse el ingreso de agua.

Por otro lado, el espejo de agua que prevalece básicamente se mantiene por el aporte de los drenajes de la alcaldía de Tláhuac, pero ello impacta negativamente en la calidad del agua, como se muestra en los valores extremos de pH y conductividad eléctrica (CE) que aparecen en la tabla 1 y que superan los rangos comunes para el establecimiento de la vida acuática. En el caso más severo, que corresponden a la zona norte del Lago, se documentaron parámetros de pH y CE similares a los de las sustancias con propiedades cáusticas.

Tabla 123 Valores de Conductividad Eléctrica y pH en el Lago Tláhuac-Xico.

Muestra	X	Y	Color del agua	pH	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Observaciones
1	-98.970131	19.285845	verde brillante	8.91	9, 800	Sin vegetación asociada, suelos fangoso y ensalitrado
1.1	-98.971375	19.281323	rojo-naranja	9.69	15, 090	Presencia de pasto y suelo fangoso
4	-98.976758	19.272976	verde brillante claro	8.93	2, 780	Presencia de vegetación acuática y terrestre (sombrillita de agua, tule, quelites y romeritos), suelo fangoso
10	-98.974420	19.261583	verde brillante	10.19	2, 380	Olor a pasto, con tule, suelo fangoso

Nota: El intervalo adecuado para que se desarrolle la vida acuática varía de 6.5 a 9 unidades.
Se clasifican con una concentración grave de sales, rangos de conductividad eléctrica mayores a 3 000 µS/cm en el agua (T.A.Bauder, R.M. Waskom y P.L. Sutherland, en Gómez, J. et al, 2014).

4.2.1.3 Identificación de la degradación del suelo

En las visitas de campo que se hicieron, se identificaron características de degradación de suelos que en este caso podrían ser explicadas por el constante ingreso de aguas con diversos tipos de calidad y a los cambios provocados por la sequía de los últimos años.

En términos generales, se observó una mayor degradación en la zona IV norte del Lago. En las partes menos degradadas, se puede observar la presencia de vegetación ribereña (Figura 155).

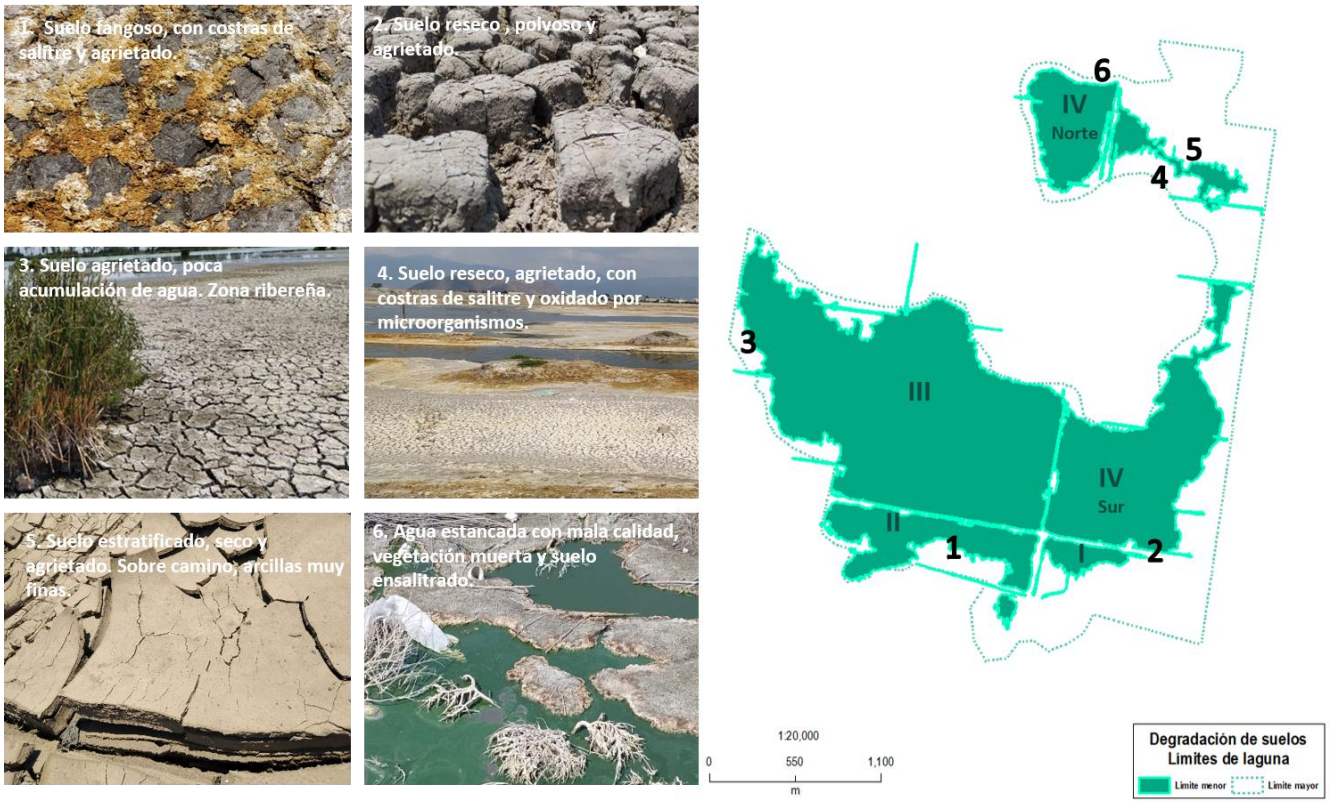
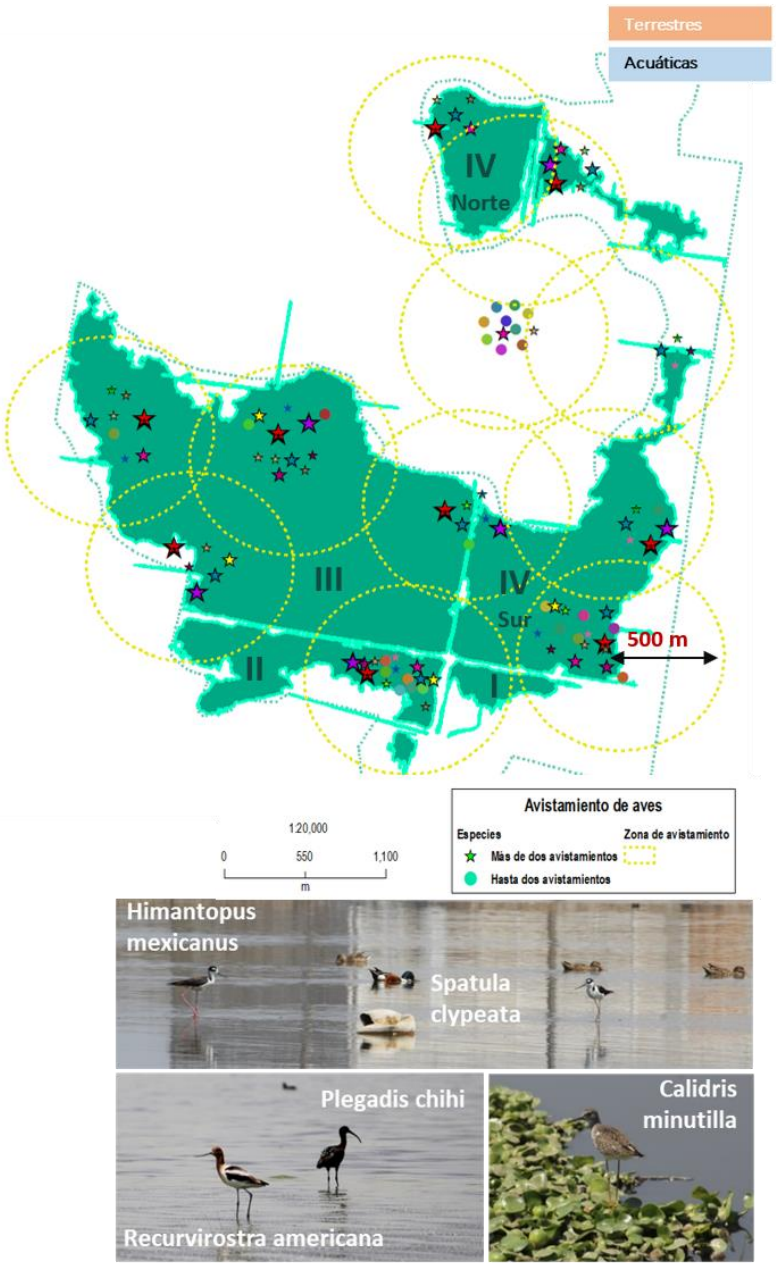


Figura 155. Degradación del suelo en la periferia del Lago Tláhuac-Xico.

4.2.1.4 Biodiversidad como indicador de la calidad del ecosistema

Aunque el Lago Tláhuac-Xico es hábitat de diversas especies, se ha destacado por ser considerada un Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA). En términos globales, se han reportado 235 especies de aves (registro histórico de 1987 a 2019), de las cuales 22 son endémicas y 15 se encuentran en alguna categoría de protección en la NOM-059-SEMARNAT-2010. Además, un número importante de ellas (40), está constituida por aves migratorias cuyas rutas de vuelo están protegidas por el Convenio Tripartita firmado por Canadá, México y Estados Unidos.

En el muestreo que fue realizado en abril del 2021 para este trabajo, se observaron 35 especies de aves (Figura 156), siendo la **zona IV norte** la de menor registro.



Especies de aves	Nombre común	No.
Agelaius phoeniceus	tordo sargento	3
Amazilia beryllina	colibrí berilo	5
Anas diazi	pato mexicano	34
Recurvirostra americana	avoceta americana	**148**
Bubulcus ibis	garza ganadera	2
Butorides virescens	garcita verde	1
Calidris minutilla	playero diminuto	37
Charadrius vociferus	chorlo tildío	43
Chondestes grammacus	gorrión arlequín	2
Circus hudsonius	gavilán rastrero	2
Cistothorus palustris	saltapared pantanero	3
Columbina inca	tortolita cola larga	2
Fulica americana	gallareta americana	**246**
Gallinula galeata	gallineta frente roja	24
Geothlypis trichas	mascarita común	2
Himantopus mexicanus	monjita americana	**110**
Hirundo rustica	golondrina tijereta	**114**
Limnodromus scolopaceus	costurero pico largo	15
Melospiza lincolnii	gorrión de lincoln	5
Oxyura jamaicensis	pato tepalcate	**548**
Phalaropus tricolor	faloropo pico largo	**143**
Plegadis chihi	ibis ojos rojos	16
Polioptila caerulea	perlita azulgris	5
Pyrocephalus rubinus	papamoscas cardenalito	3
Quiscalus mexicanus	zanate mayor	24
Setophaga coronata	chipe rabadilla amarilla	6
Spatula clypeata	**pato cucharon norteño**	**7643**
Spatula cyanoptera	cerceta canela	6
Spatula discors	cerceta alas azules	5
Sturnus vulgaris	estornino pinto	2
Tachycineta thalassina	golondrina verdemar	23
Tringa flavipes	patamarilla menor	4
Tyrannus vociferans	tirano chibiú	3
Vireo gilvus	vireo gorjeador	1
Zenaida asiatica	paloma alas blancas	2

Figura 156. Avifauna presente en el Lago Tláhuac-Xico, 2021.

La composición de plantas, sobre todo las terrestres, se encontró integrada exclusivamente por especies que son tolerantes a hábitats degradados.

En el caso de las especies acuáticas, se ubicaron principalmente en las zonas ribereñas de la parte sur, en las zonas III y IV sur y en la zona II, mientras que la zona IV norte tiene muchos espacios desprovistos de vegetación. De la caracterización que se realizó, en total se registraron 53 taxones vegetales y de ellos, el 70% está representado por especies invasoras con una dominancia evidente (Figura 157).

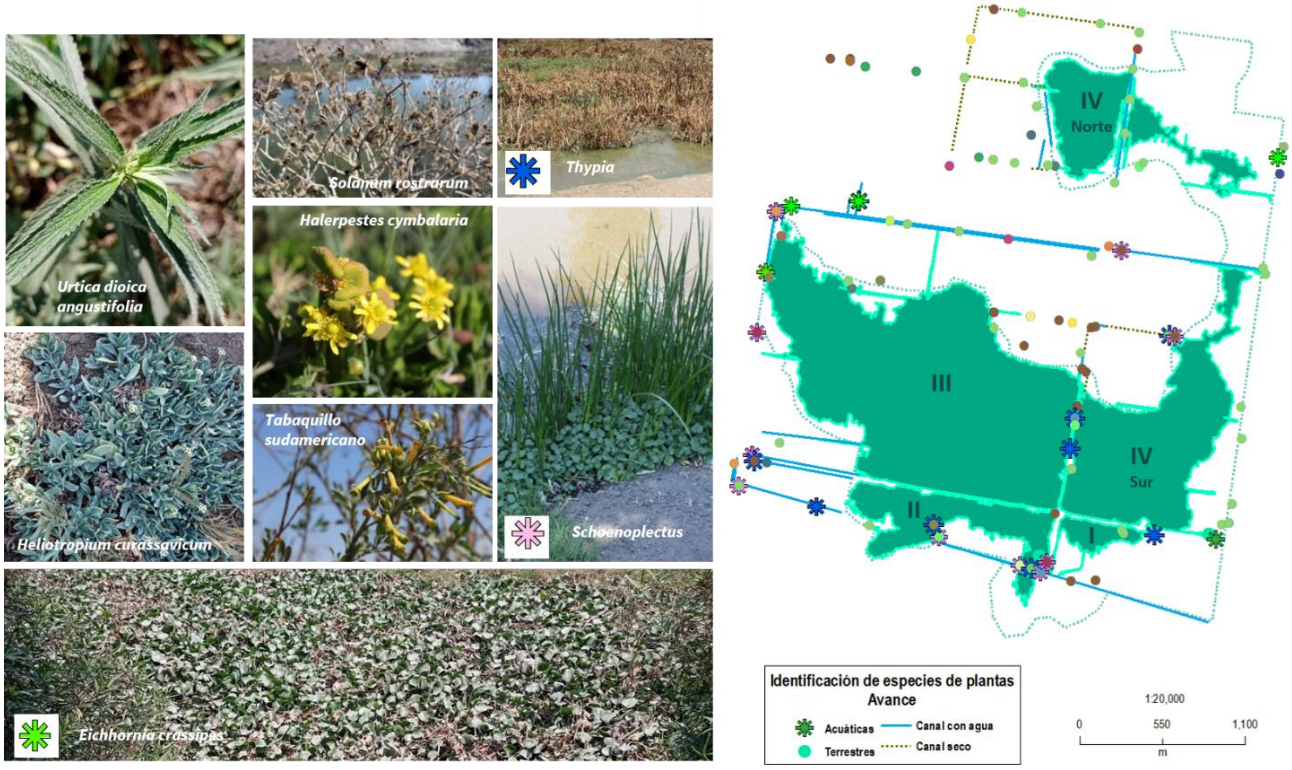
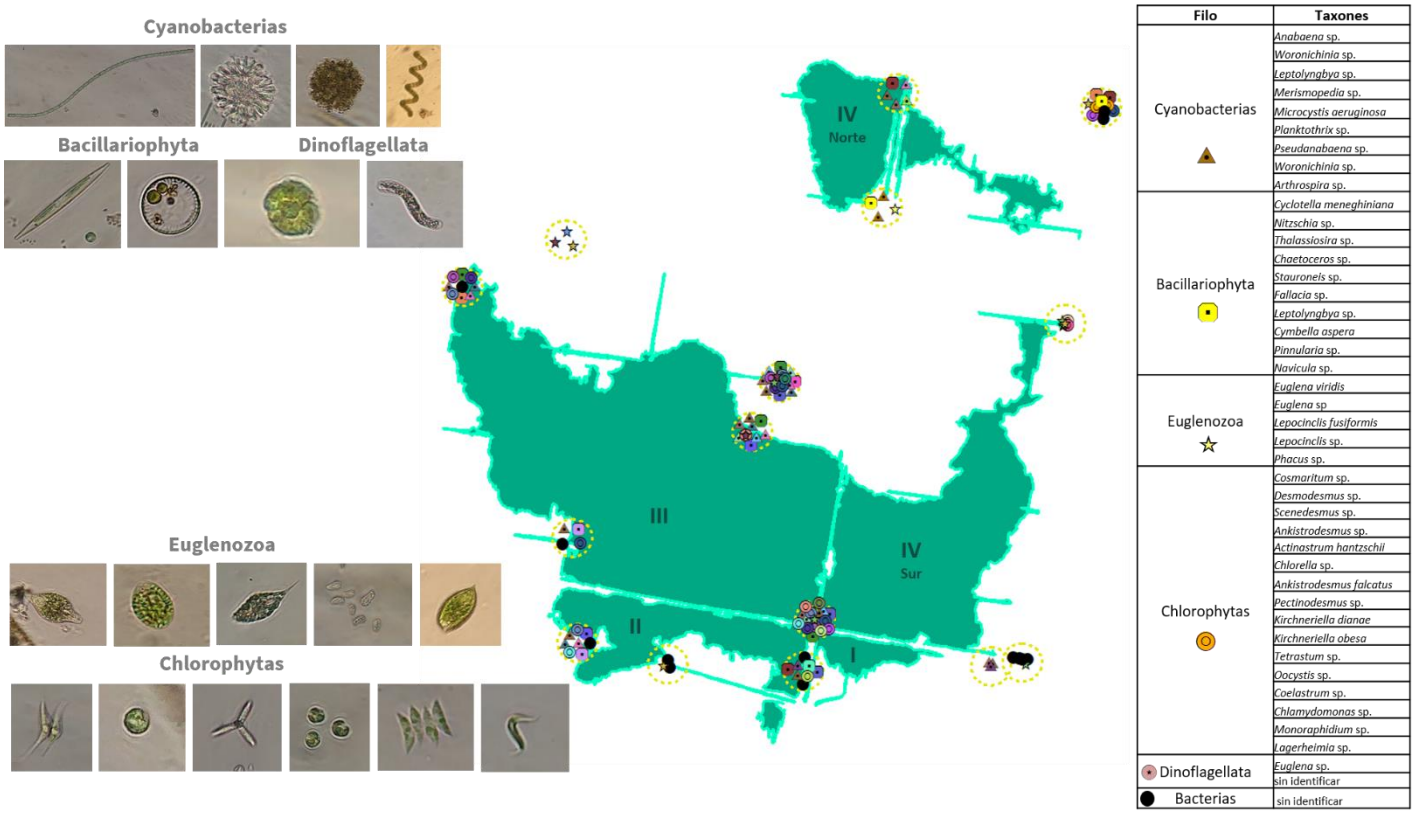


Figura 157. Vegetación presente en el Lago Tláhuac-Xico, 2021.

Debido a que las comunidades fitoplanctónicas son de los primeros grupos taxonómicos afectados por los cambios en las condiciones del agua, en este estudio se evaluó su diversidad taxonómica, densidad de individuos por grupo taxonómico, así como los grupos funcionales. Este último parámetro es de gran importancia, ya que los grupos están compuestos por taxones con morfología y fisiología similar que responden de manera conjunta a condiciones ambientales (Figura 158).



Filo	Taxones
Cyanobacterias	*Anabaena* sp.
	Woronichinia sp.
	Leptolyngbya sp.
	Merismopedia sp.
	Microcystis aeruginosa
	Planktothrix sp.
	Pseudanabaena sp.
	Woronichinia sp.
	Arthrospira sp.
Bacillariophyta	*Cyclotella meneghiniana*
	Nitzschia sp.
	Thalassiosira sp.
	Chaetoceros sp.
	Stauroneis sp.
	Fallacia sp.
	Leptolyngbya sp.
	Cymbella aspera
	Pinnularia sp.
	Navicula sp.
Euglenozoa	*Euglena viridis*
	Euglena sp
	Lepocinclis fusiformis
	Lepocinclis sp.
	Phacus sp.
Chlorophytas	*Cosmarítum* sp.
	Desmodesmus sp.
	Scenedesmus sp.
	Ankistrodesmus sp.
	Actinastrum hantzschii
	Chlorella sp.
	Ankistrodesmus falcatus
	Pectinodesmus sp.
	Kirchneriella dianae
	Kirchneriella obesa
	Tetrastum sp.
	Oocystis sp.
	Coelastrum sp.
	Chlamydomonas sp.
	Monoraphidium sp.
	Lagerheimia sp.
Dinoflagellata	*Euglena* sp.
Bacterias	sin identificar
	sin identificar

Figura 158. Comunidades fitoplanctónicas presentes en el Lago Tláhuac-Xico.

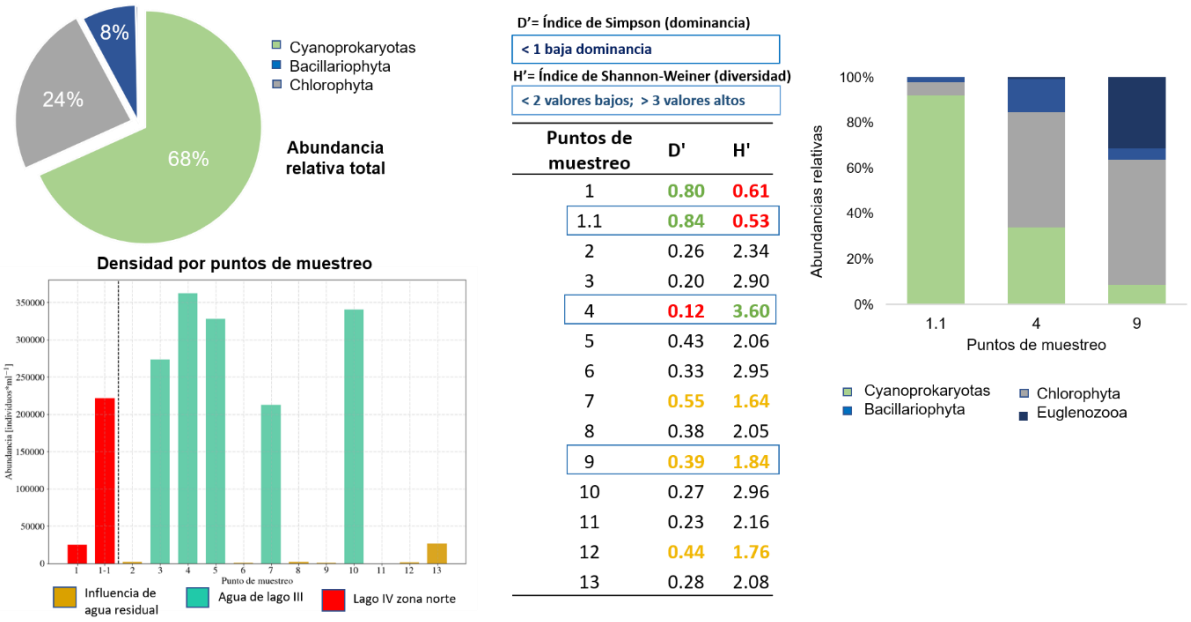
Se obtuvieron abundancias de millones de individuos por litro. Esta abundancia refleja una alta productividad característica de ambientes hipertróficos. La dominancia taxonómica estuvo representada por el grupo de las cyanoprokaryota. Este grupo tiene rasgos que han sido asociados a agua con mala calidad, turbia y con altos aportes de materia orgánica. Tanto las altas abundancias como la dominancia, nos indica la presencia de florecimientos algales nocivos de manera permanente y de grupos que causan problemas ecológicos y de salud, debido a la liberación de toxinas en el medio.

Los resultados también permitieron clasificar la calidad del agua según los diferentes niveles de degradación, como alta, mediana y baja (Figura 159):

- El nivel de alta degradación corresponde a la zona **IV norte** del Lago; con baja diversidad y alta dominancia.

- El nivel de mediana degradación son aguas con influencia inmediata de descargas residuales, en éste se presentaron los valores más bajos de abundancias, esto indica una baja productividad primaria por lo que existen mayormente procesos de degradación de materia orgánica, por ello el grupo que lo representa son las Euglenozooas que tienen la facilidad de asimilar este tipo de compuestos.

- El nivel de menor degradación es la sección III sur del Lago, con los valores más altos de diversidad que nos indica una mayor dinámica y reciclaje de nutrientes. También le corresponde mayores abundancias, por lo que es la zona de mayor productividad.



Puntos de muestreo	D'	H'
1	0.80	0.61
1.1	0.84	0.53
2	0.26	2.34
3	0.20	2.90
4	0.12	3.60
5	0.43	2.06
6	0.33	2.95
7	0.55	1.64
8	0.38	2.05
9	0.39	1.84
10	0.27	2.96
11	0.23	2.16
12	0.44	1.76
13	0.28	2.08

Figura 159. Análisis de densidad, biodiversidad y abundancias de microorganismos en el agua del Lago Tláhuac-Xico.

4.2.1.5 Cuantificación de residuos sólidos urbanos y de manejo especial

Se observó la presencia de residuos sólidos sobre todo en los caminos que dividen las tablas parcelarias, mayoritariamente de construcción (cascajo). Se encontraron al menos cinco puntos cercanos a las colonias aledañas con volúmenes mayores a 300 m^3 de cascajo. Se determinó que en todo el terreno que rodea el Lago de Tláhuac-Xico hay más de 20 mil m^3 de residuos. En el caso de algunas parcelas, su superficie total se encuentra completamente llena de estos residuos (1.5 metros de altura, Figura 160).

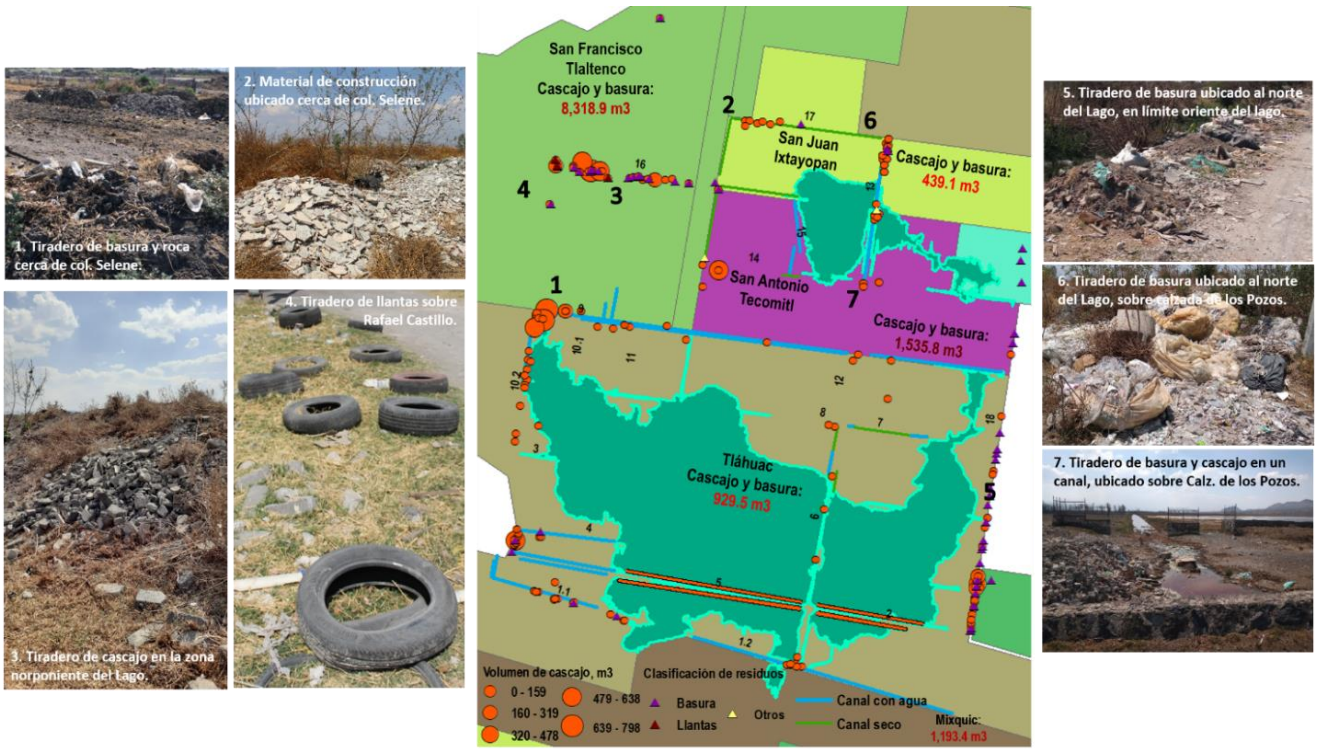


Figura 160. Ubicación y cuantificación de residuos en la periferia del Lago Tláhuac-Xico.

4.2.1.6 Zonificación de la calidad del ecosistema

Una vez obtenidos los primeros resultados de la caracterización ambiental del Lago Tláhuac-Xico, los datos obtenidos se analizaron en su conjunto para poder establecer una zonificación del lago y de esta forma realizar estrategias de restauración ecológica. A continuación, se presenta la propuesta de zonificación:

Conjunto 1. Corresponde a la zona más degradada, la sección norte IV del Lago. Se caracteriza por tener suelo ensalitrado, sin vegetación, agua con alta conductividad y comunidades de microorganismos con una alta dominancia de cianobacterias.

Objetivo: Disminuir la concentración de sales para el establecimiento de vegetación.
Estrategia propuesta: Dilución y lavado de sales de la zona IV norte.

Conjunto 2. Corresponde al agua con influencia directa de descargas residuales, con una saturación de comunidades vegetales invasoras y una baja productividad primaria.

Objetivo: Mejorar la calidad del agua de las entradas de aguas residuales.
Estrategia propuesta: Implementación de humedales de fitorremediación para el tratamiento del agua.

Conjunto 3. Corresponde a las zonas II, III y IV sur del Lago, donde existe una menor degradación y mejor calidad del agua, debido a que representa la zona de mayor diversidad biológica.

Objetivo: Mejorar el estado hidroecológico y paisajístico del Lago, aumentando el hábitat de la avifauna local y migratoria.

Estrategia propuesta: Extensión de vegetación hidrófila y ribereña.

Identificar y zonificar el sistema lacustre de acuerdo con las condiciones diferenciadas de degradación ambiental brinda una base importante para la futura y necesaria generación de un Plan de Manejo Integral que consolide el Lago de Tláhuac-Xico bajo una categoría de Protección Ambiental. Parte de ello, también deberá definir un ecosistema que sirva de referencia para establecer parámetros alcanzables y aproximar un tiempo estimado. **Por lo anterior, se seguirá trabajando para robustecer este análisis.**

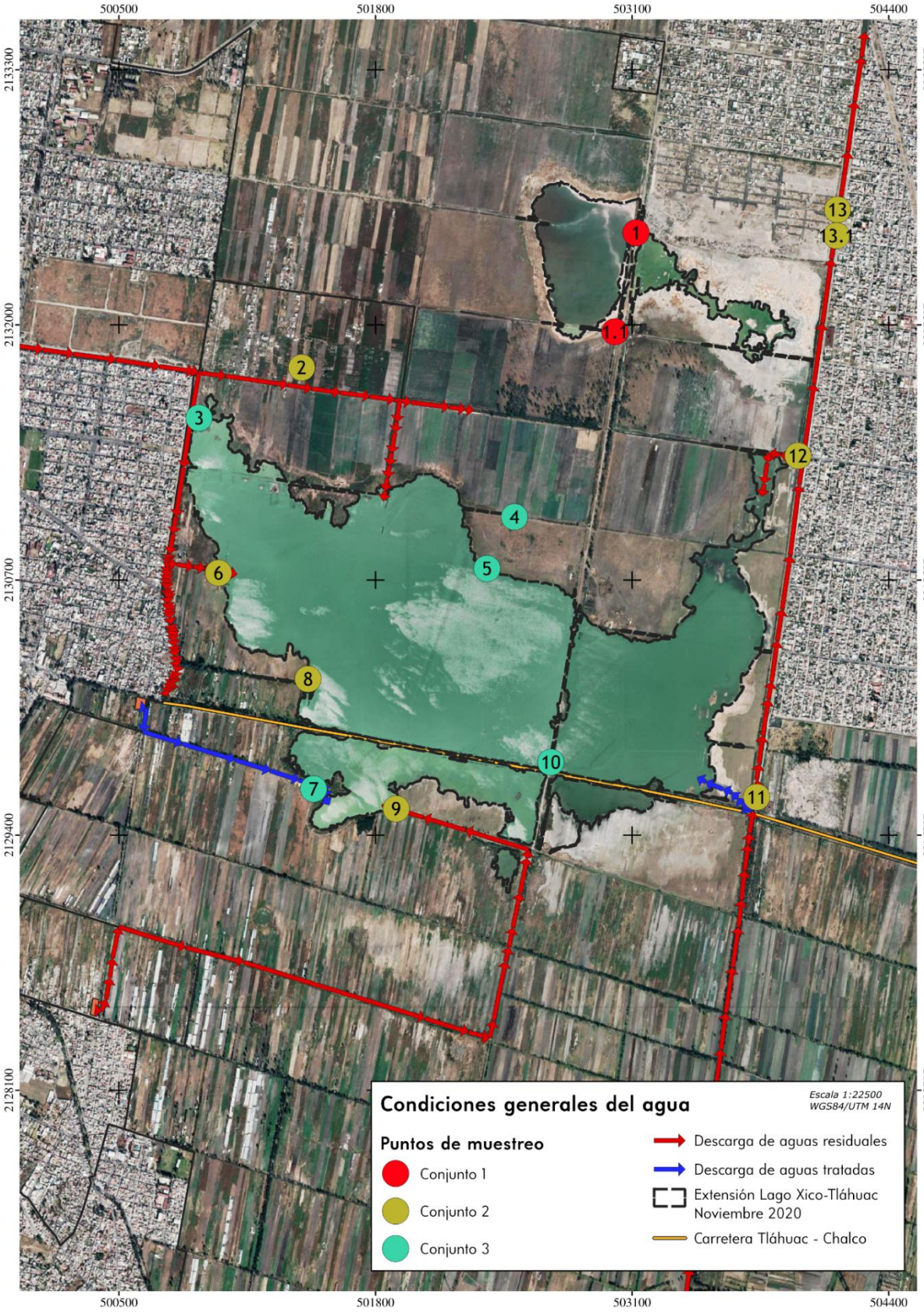


Figura 161. Zonificación de degradación y calidad del agua.

4.2.1.7 Acciones de rehabilitación ambiental en el Lago Tláhuac-Xico

Megatequios

Como parte de las actividades de rehabilitación del ecosistema, en el año 2021 la CORENADR coordinó y realizó megatequios en distintos puntos de la alcaldía Tláhuac.

Tequio Tláhuac-Xico

EL día 15 de mayo de 2021, con la participación de 680 brigadistas de la CORENADR, se logró el chaponeo de 23,403 m^2 en canales del Lago Tláhuac- Xico; retiro de 50 m^3 de material orgánico; retiro de 102 m^3 de basura inorgánica; recolección de 295 piezas de llantas; poda de 124 árboles; retiro de 80 árboles muertos en pie y 875 m^2 de restiro de tule.

Tequio en Tlaltenco

Del 19 al 27 de mayo de 2021 se llevaron a cabo actividades de saneamiento y retiro de cascajo, logrando el retiro de 936 m^3 de residuos especiales (cascajo); recolección de 370 piezas de llantas; así como la nivelación de 2,178 m^2 del terreno.

Tequio Río Ameca - Tláhuac

El 15 de mayo de 2021, se intervino parte del Río Ameca ubicado en los límites del pueblo de San Juan Ixtayopan. Con el apoyo de 247 brigadistas de la CORENADR, se limpiaron 300 m^2 de espejo de canal; chaponeo de 10, 510 m^2 de taludes; retiro de 184 m^3 de material orgánico; 75.84 m^3 de basura inorgánica; se sacaron del cauce 113 llantas; retiró de un árbol muerto en pie y se realizaron 79 podas de árboles por saneamiento forestal.

Asimismo, en el presente año 2022, la CORENADR ha llevado a cabo megatequios en distintos sitios de la alcaldía Tláhuac como parte de la conservación y restauración ecológica de esta zona.

San Juan Ixtayopan

Del 31 de marzo al 03 de abril del presente año se realizaron actividades de rehabilitación ambiental en la zona de tablas del ejido de San Juan Ixtayopan. Con la participación de 60 brigadas conformadas por 616 brigadistas, se logró la limpieza de espejo de 12,068 m^2; chaponeo de 27,436 m^2 de taludes; retiro de 34,695 m^3 de tule; 217 podas de saneamiento; retiro de 53 árboles muertos en pie o plagados, y retiro de 60 m^3 de material orgánico.

Ciénega de Tláhuac

El día 11 de marzo del presente año se realizaron actividades de limpieza de espejo, chaponeo y sanidad forestal en la red canalera de la Ciénega de Tláhuac. Para ello, se contó con el apoyo de 879 brigadistas que conforman 92 brigadas de la CORENADR. Logrando la limpieza de espejo de 17,842 m^2; chaponeo de 15,738 m^2; retiro de tule de 3,601 m^3; retiro de material orgánico de 194 m^3; retiro de material inorgánico de 68 m^3; retiro de 215 llantas; retiro de 68 m^3 de residuos sólidos urbanos (cascajo); podas de saneamiento de 178 árboles; levantamiento de fuste de 35 árboles, así como el derribo de 71 árboles muertos en pie.

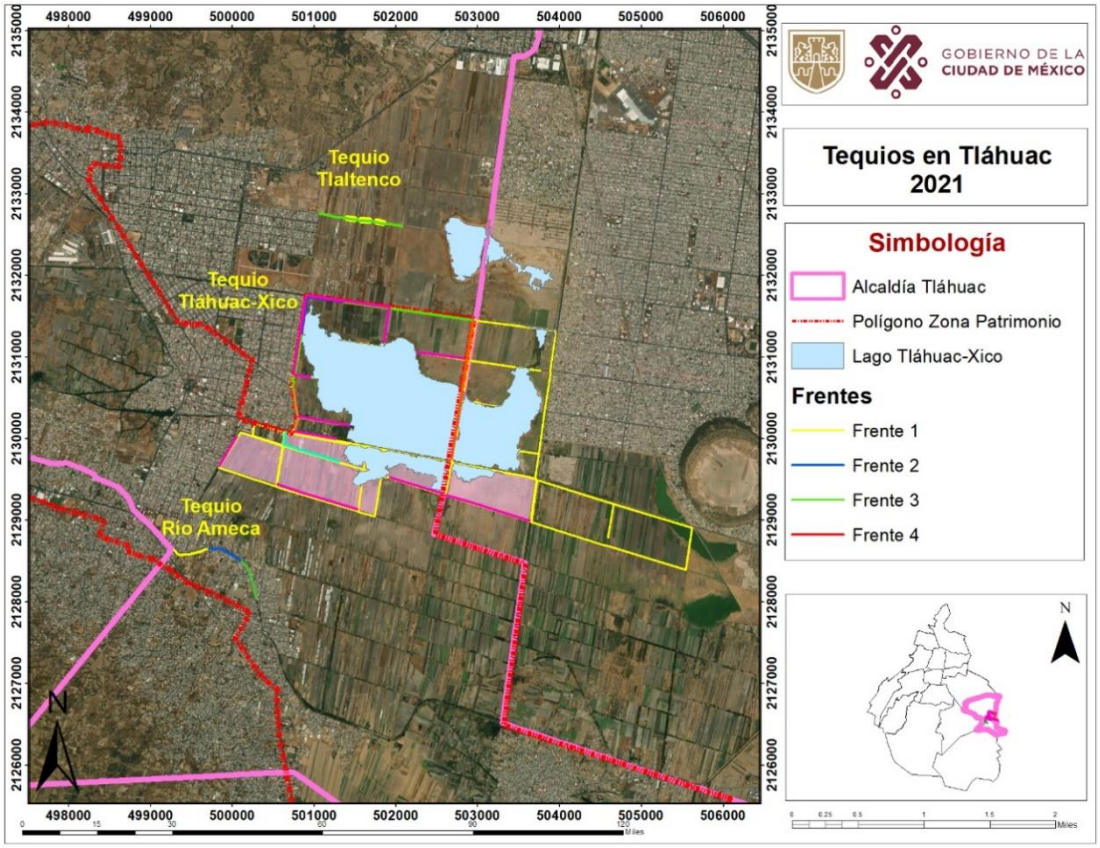


Figura 162. Tequios en Tláhuac, 2021.

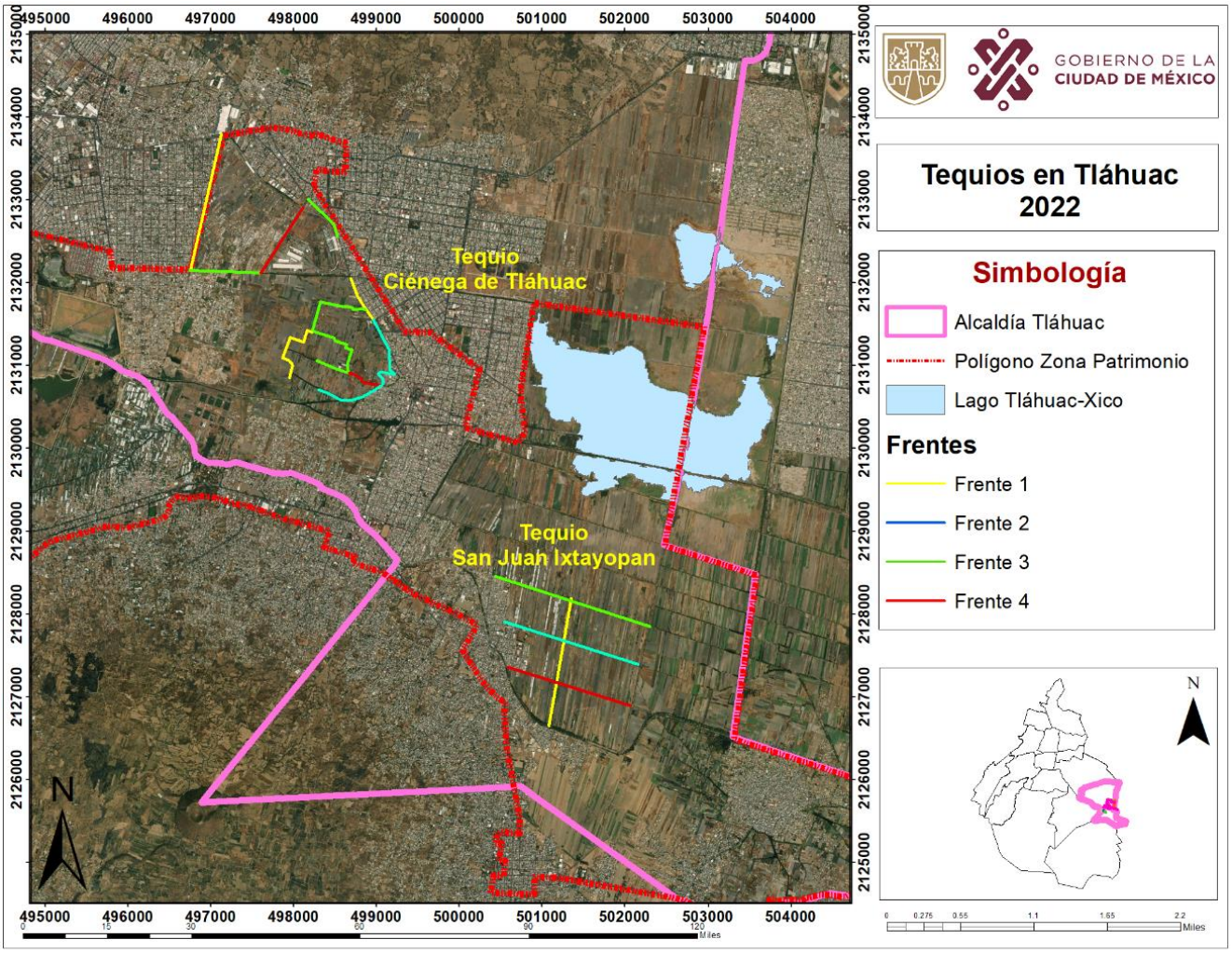


Figura 163. Tequios en Tláhuac, 2022.

4.3 Estudios de biodiversidad, calidad del agua y del suelo

4.3.1 Zona de estudio

Con la finalidad de profundizar en el diagnóstico ambiental de todo el sistema del Lago Tláhuac-Xico, se realizó un muestreo de biodiversidad (vegetación, aves e invertebrados), agua y suelos (Figura 164).

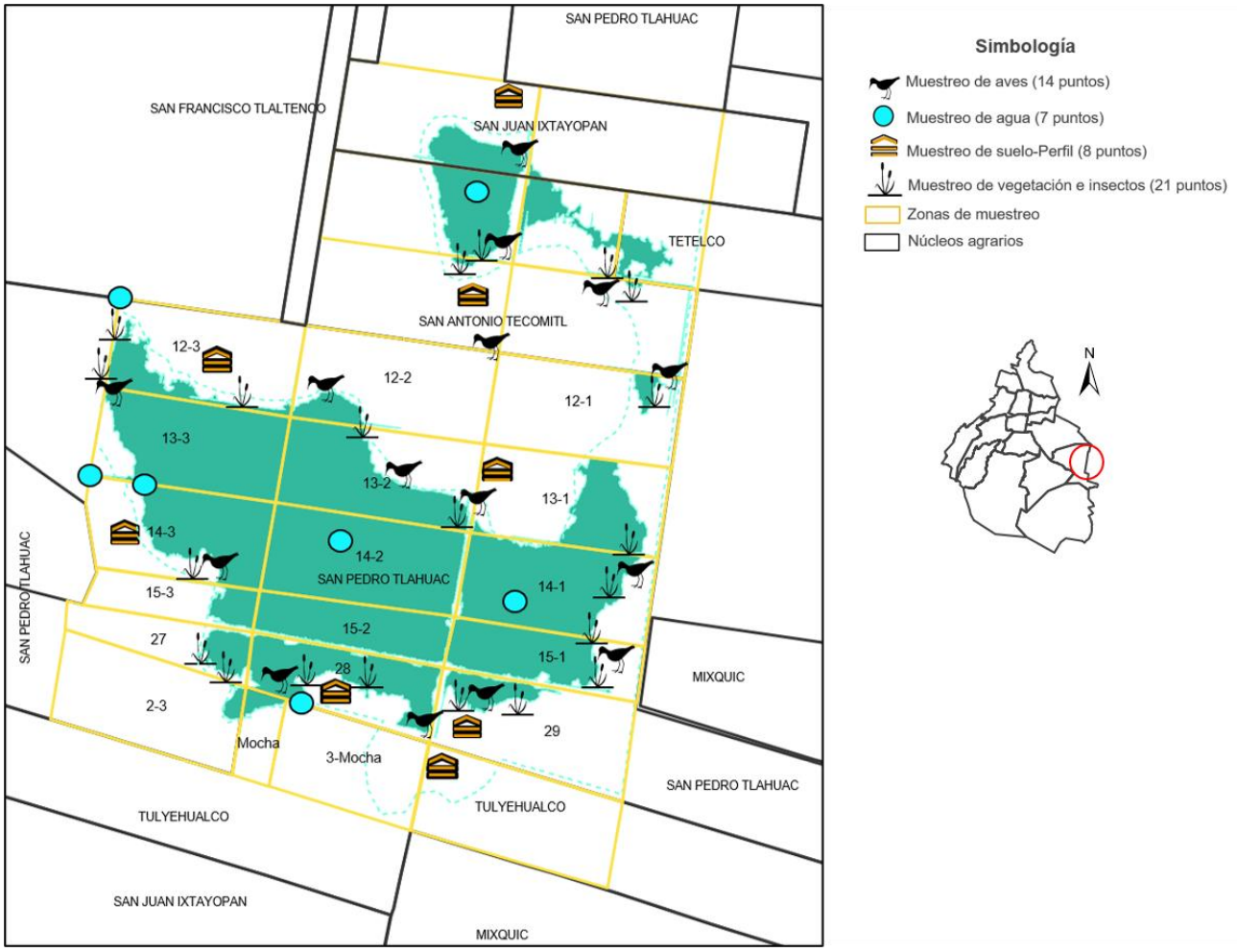


Figura 164. Ubicación de puntos de muestreo en el Lago Tláhuac-Xico.

4.3.2 Distribución y diversidad de especies

4.3.2.1 Introducción

Los humedales son uno de los ecosistemas más productivos y diversos del mundo. Constituyen un reservorio de especies endémicas y grupos taxonómicos que son muy sensibles a perturbaciones ambientales como los peces y los anfibios. Además, son un refugio de aves migratorias que desarrollan parte de su ciclo de vida en estos lugares.

La actual topografía del Lago Tláhuac–Xico ha sufrido una serie de cambios históricos importantes en los que los requerimientos de agua de la zona metropolitana de la Ciudad de México a principios de la década de los ochenta, han sido un factor determinante en el hundimiento de la planicie de Chalco y la conformación de lo que ahora se conoce como el Lago Tláhuac–Xico. Este sistema artificial, se ha convertido en uno de los pocos humedales de la Ciudad de México con capacidad para mantener altas poblaciones de aves acuáticas residentes y migratorias. Debido a ello, fue declarada un área de importancia para la conservación de las aves (AICA).

Debido a su importancia bio-cultural, también fue declarada como Patrimonio Mundial, Natural y Cultural de la Humanidad desde 1987. Sin embargo, a consecuencia de los procesos históricos de carácter natural y antropogénico que han modelado las condiciones ambientales del Lago, en este estudio se propone realizar una caracterización del sitio a partir de su biodiversidad y poder identificar las principales soluciones que ayuden a su restauración ecológica.



Figura 165. Pato mexicano (*Anas diazi*), muestreo 2022.

4.3.2.2 Metodología

La metodología de muestreo de vegetación, aves e invertebrados se describe a detalle en el Anexo XVIII.

4.3.2.3 Resultados

Vegetación

Se registraron un total de 26 taxones (Tabla 1, anexo XVIII). La vegetación hidrófila estuvo representada por cuatro especies: *Eichhornia crassipes, Schoenoplectus americanus, Typha latifolia* e *Hydrocotyle sp.* Siendo las especies de hierbas y pastos terrestres los dominantes.

En el caso de la riqueza de especies, la zona I tuvo menos especies que las otras tres secciones ($X2 = 43.1$, $P < 0.01$). El mismo patrón se presentó en el índice de diversidad de Shannon, excepto por la zona IV norte (Tabla 124).

Tabla 124. Riqueza y diversidad de especies estimadas a través del Índice de Shannon para las cinco secciones del Lago Tláhuac- Xico

Indicador	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV sur	Zona IV norte
Riqueza de especies	9	36	43	26	20
Índice de Shannon	4.7	5.3	6.3	5.2	4.3

Respecto a las abundancias, en la Zona I sólo se registró un individuo de *Schoenoplectus* sp, conocida como tule, siendo esta misma especie la dominante en la Zona II; este género forma parte de la vegetación típica de un humedal y sirve como barrera para proteger las orillas del Lago. En las zonas III y IV sur, la especie dominante fue *Eichornia crassipes*, el lirio acuático, especie exótica-invasora, aunque en algunos lugares ha sido utilizada como fitorremediadora.

Aves

Se registraron 68 especies (Tabla 2, anexo 1) y total aproximadamente 131 mil individuos de aves. Del total de especies observadas, 44 fueron residentes y 24 migratorias.

De las aves registradas es importante resaltar que, además de las migratorias, se documentó la presencia del pato mexicano (*Anaz diazi*), el cual es una especie endémica del país que se encuentra amenazada según la NOM-059-SEMARNAT-2010. También se detectó la presencia del colibrí *Amazilia beryllina,* el cual, por sus características de uso de hábitat, podría utilizarse como indicador de recuperación del ecosistema.

En cuanto a la riqueza de especies, ésta fue significativamente menor en las zonas de cultivo (6 especies) y centro silvopastoril (10 especies) que en el Lago ($X^2 = 13.1$, $P < 0.05$).

Tabla 125. Riqueza y diversidad de especies de aves, estimada a través del índice de Shannon para siete secciones del Lago Tláhuac–Xico

Indicador	Zona I	Zona II	Zona IV sur	Zona III	Zona IV norte	Cultivo	Zona silvopastoril
Riqueza de especies	11	29	24	35	19	11	10
Índice de Shannon	5.1	2.5	1.7	4.2	1.4	5.8	6.1

Respecto a las abundancias, estas fueron similares entre las zonas de cultivo y silvopastoril. En el caso de las diferentes secciones del Lago, el pato cucharón *Spatula clypeata*) presentó la mayor abundancia, con aproximadamente el 86% de los individuos registrados en todo el lago. En la zona de cultivos la especie más abundante fue *Hirundo rustica*, la golondrina común y en la silvopastoril fue *Setophaga coronata* conocida como chipe de rabadilla amarilla. Mientras que, el pato mexicano (*Anas diazi*) se encontró en todas las zonas del lago, excepto la zona IV norte (Figura 166 -C).

Las abundancias encontradas durante este muestreo, coinciden con las encontradas en el muestreo realizado por CORENADR en abril 2021. Sin embargo, durante este periodo, se registraron más especies, probablemente debido a que coincidió con la temporada de las especies migratorias.

Cambios en la abundancia y diversidad de la avifauna

En invierno de 2006, Ayala-Pérez y colaboradores registraron 40 especies y más de 25 mil individuos en el Lago Tláhuac-Xico (Figura 166-A). Documentando la presencia de tres especies de anátidos (patos): *Anas clypeata, Anas diazi* y *Oxyura jamaicensis;* con abundancias mayores a mil individuos.

En contraste, en el muestreo de la CORENADR en abril del 2021, se registraron un total de 30 especies y 9,222 individuos, menos del 50% individuos reportados por Ayala y colaboradores en 2006, siendo notable el cambio en la composición de especies y estructura (Figura 166-B). La especie más abundante fue *Spatula clypeata*, seguido de *Oxyura jamaicencis, Fullica americana*, y *Recurvirostra americana*.

Finalmente, en el muestreo de invierno del 2022, se registró la mayor abundancia del pato norteño (*Spatula clypeata)* con 78,306 individuos distribuidos en todo el lago, siendo la zona IV norte la más poblada (Figura 166-C). Seguramente este resultado se encuentra relacionado con la alta disponibilidad de nutrientes (eutrofización) y la proliferación de fitoplancton, alimento principal de esta especie.

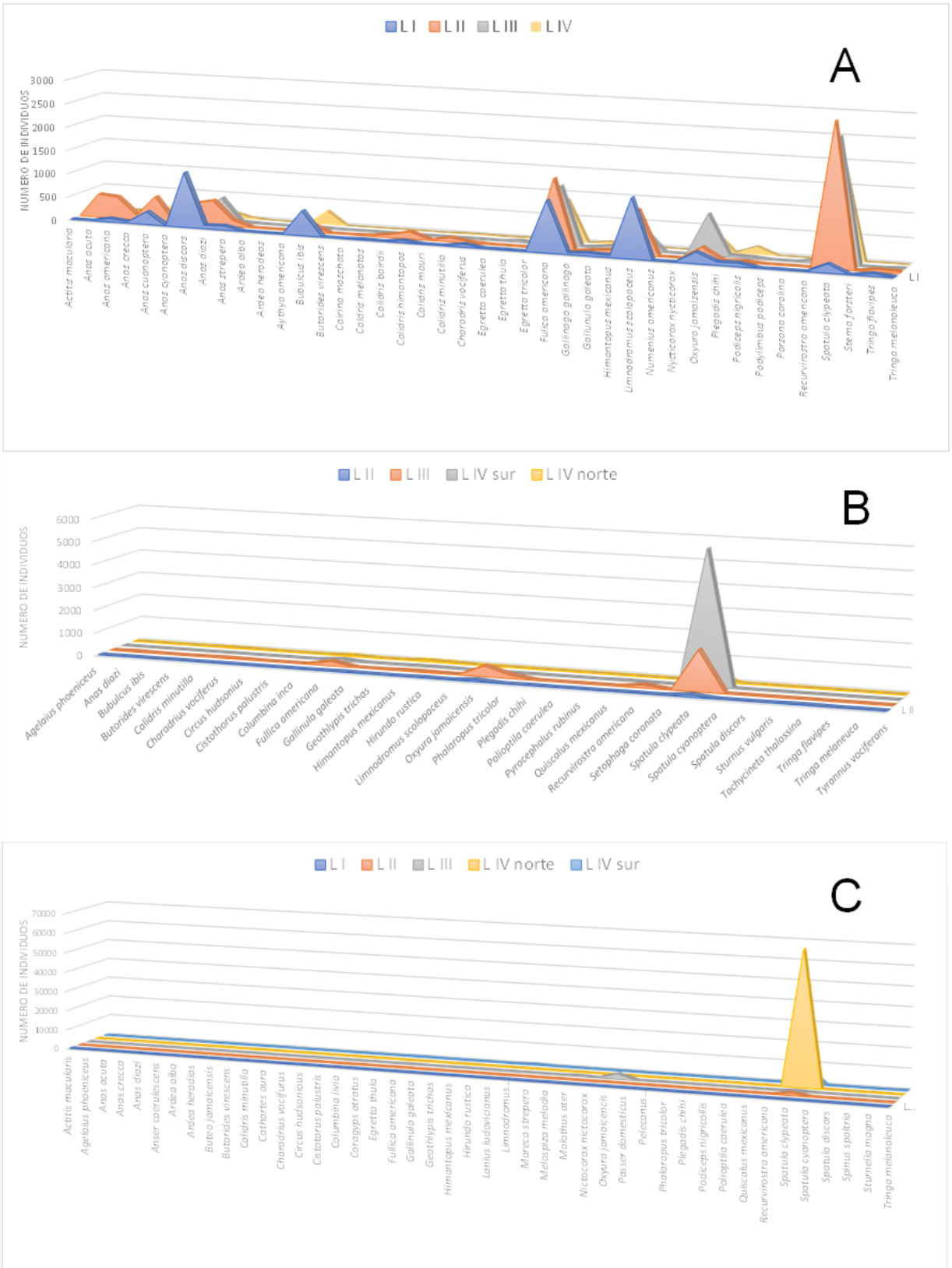


Figura 166. Variación en la distribución y composición de las aves del Lago Tláhuac–Xico; A) muestreo de invierno de Ayala y colaboradores (2006), B) caracterización ambiental de CORENADR (2021) y C) muestreo 2022.

Los datos del muestreo del 2021 y 2022, confirman que existe una notable reducción en la abundancia del pato mexicano (*Anas diazi*), el cual fue reportado como la segunda especie más abundante por Ayala-Pérez y colaboradores en invierno de 2006 (Figura 167). Cabe resaltar que, el muestreo del 2006 la zona I fue la zona con mayor presencia de dicha especie, la cual actualmente se encuentra seca.

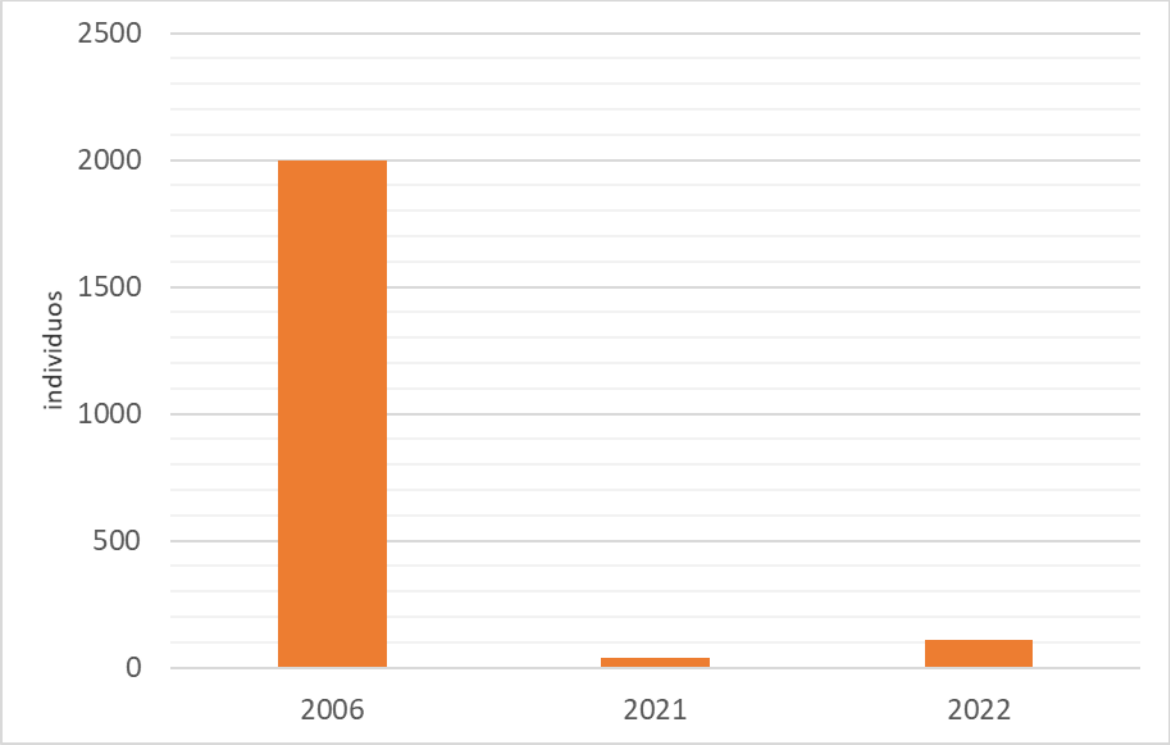


Figura 167. Número de individuos de Anas diazi registrados en el lago de Tláhuac–Xico, en diferentes años (2006, 2021 y 2022).

Las condiciones diferenciadas de cada zona del lago, influyen tanto en la distribución y abundancia de las especies, como en el tamaño y profundidad de las zonas, alimento disponible, grado de contaminación y variación de las propiedades físico-químicas del agua.

Invertebrados

Para obtener la línea base de los invertebrados de la zona de estudio, se realizó una primera búsqueda de datos históricos en el Portal de Geoinformación del Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad (SNIB). De 1992 al 2020, se encontraron 61 registros, 16 familias y 28 especies para la zona de estudio del Lago Tláhuac-Xico (Tabla 3, Anexo XVIII).

Durante el muestreo realizado en enero-febrero del 2022 (Tabla 4, Anexo XVIII) se registró un aumento respecto al histórico en: a) ejemplares colectados (39%); b) Phylla (34 %); c) familias (53%) y d) especies (42%). Dentro de los órdenes más importantes como indicadores de la calidad del agua se encuentran Gasteropoda, Rhynchobdellida, Diptera, Hemiptera, Coleoptera, Odonata y Neuroptera.

4.3.2.4 Conclusiones

- La vegetación está representada en su mayoría por hierbas y pastos tolerantes a condiciones altas de perturbación y contaminación como la salinidad.

- Existe una notable predominancia del pato cucharón (*Spatula clypeata*), sobre todo en la zona IV norte, que posee una alta disponibilidad de nutrientes (eutrofización) y proliferación de fitoplancton, lo cual está asociado a los hábitos alimenticios de esta especie y a una mala calidad ambiental.

- El registro de especies de aves migratorias y endémicas del país, demuestra que el Lago Tláhuac-Xico sigue siendo un importante refugio para este grupo taxonómico.

- La biodiversidad del Lago Tláhuac-Xico fue estimada a partir de la distribución y diversidad de vegetación, invertebrados y aves. Se encontró una diferenciación entre las zonas del Lago, siendo la zona norte la de menos diversidad de especies. Mientras que la zona sur, en donde existe más presencia de vegetación hidrófila, se observó una mayor presencia y diversidad de especies de aves e invertebrados.

- Es importante implementar estrategias de revegetación de las riberas, para aumentar el hábitat de especies prioritarias.

4.3.3 Calidad del agua

4.3.3.1 Introducción

El monitoreo de calidad de agua es una herramienta de vital importancia para el manejo y gestión hídrica. Su correcta ejecución permite evaluar las tendencias temporales y espaciales de la calidad o estado de dichos cuerpos. Por esta razón, es necesario plantear sitios clave y parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que permitan medir la presencia y concentración de contaminantes.

El presente estudio tiene el objetivo de realizar un diagnóstico de las condiciones actuales del Lago Tláhuac-Xico en materia de calidad de agua.



Figura 168. Muestreo de agua en el Lago Tláhuac-Xico, 2022.

4.3.3.2 Metodología

La metodología de muestreo de agua se describe a detalle en el Anexo XIX.

4.3.3.3 Resultados

Análisis de la calidad del agua en años anteriores

Parámetros fisicoquímicos

Temperatura. - El valor promedio de temperatura del Lago fue de 21 °C.
Químicos minerales. - El valor promedio fue de 9.56 de pH; dureza de 370 mg/L de $CaCO_3$; alcalinidad de 645.54 mg/L de $CaCO_3$ y conductividad eléctrica de 2075.95 µS/cm.

Los valores de Oxígeno disuelto (O.D.) a nivel superficial presentaron un promedio de 4.77 mg/L de O.D., mientras que a 0.50 m de profundidad la concentración de oxígeno se abate con un valor promedio de 0.54 mg/L, lo cual muestra una clara hipoxia hacia estratos inferiores en la columna de agua.

Sólidos. - Se halló una concentración de sólidos disueltos de 1794.37 mg/L, mientras que para sólidos suspendidos alcanzó un valor promedio de 567.03 mg/L.

Nutrientes. - Los valores promedio de nutrientes fueron los siguientes: Nitrógeno 28.3 mg/L, Fósforo 3.24 mg/L y DBO_5 40.61 mg/L. En apariencia el único parámetro fuera de

límite es la DBO_5. Sin embargo, al analizar los NO_3- así como los HPO_4+ y la DQO, se pone en evidencia la alta concentración de nutrimentos, los cuales alcanzaron valores promedio de 1.56 mg/L de NO_3-, 5.44 mg/L para HPO_4+ y 1024.84 mg/L de DQO. Estos valores se encuentran muy por encima de los recomendados para evitar el proceso de eutrofización.

Metales pesados. - El análisis de metales pesados contempló las concentraciones de Cadmio Total, Cobre Total, Níquel total, Plomo soluble, Cromo soluble, Zinc soluble, los cuales en ningún caso rebasaron el límite máximo permisible establecidos NOM-001-SEMARNAT-1996. Para el caso del Cadmio total se encontró un promedio 0.05 mg/L cuyo LMP es de 0.2 mg/L. El Cobre total tuvo un valor promedio de 0.15 mg/L con LMP de 4 mg/L. Para el Níquel total se encontró un promedio 0.10 mg/L con LMP de 2 mg/L. El Plomo soluble presentó un valor promedio de 0.20 mg/L con LMP de 0.5 mg/L. El Cromo soluble presentó un valor promedio de 0.20 mg/L con LMP de 1mg/L. Para el Zinc soluble se encontró un promedio 0.10 mg/L con LMP de 10 mg/L.

Parámetros biológicos. - Se obtuvo un promedio de 1,117.86 coliformes UFC en 100 mL, rebasando el límite de referencia (LR) de 1 000 UFC en 100 mL. La presencia de estos organismos denota una fuerte descarga de aguas residuales en el Lago.
El desglose de los resultados, se puede ver en la Tabla 1, anexo XIX.

Fitoplancton
Se identificaron 37 taxones distribuidos en 4 divisiones (Tabla 2, anexo XIX) de las cuales 16 fueron Chlorophytas (43%), 9 Bacillariophytas, 9 Cyanoprokaryotas (24% cada una), y 3 Euglenozooas (8%), de los cuales, cada taxón fue clasificado con su respectivo grupo funcional; estos grupos están compuestos por taxones con morfología y fisiología similar que responden de manera conjunta a condiciones ambientales (Tabla 5, sección de caracterización).

Las Chlorofytas fueron la división más representativa, asociadas con aguas ricas en nutrimentos y con una relación nitrógeno: fósforo alto. El grupo seguido fueron las Cyanoprokariotas y las Bacillariophytas; el primero tiene rasgos que proporcionan ventajas competitivas en aguas con mala calidad, turbias y con altos aportes de materia orgánica. Las Bacillariophytas a pesar de ser un grupo altamente distribuido se le asocia a lagos someros.

De manera general, se observó que el Lago es de tipo alcalino, con altas concentraciones de carbonatos y sales. También, con una alta concentración de nutrientes, por lo que se puede clasificar como un lago hipertrófico. Respecto al análisis de fitoplancton se registraron especies resistentes a altas condiciones de perturbación ambiental, como condiciones limitantes de luz y resistencia a altas concentraciones de pH y conductividad eléctrica. Existe una correlación entre mejor calidad de agua y mayor diversidad de microrganismos.

Muestreo de agua marzo 2022

Para esta segunda etapa se verificaron las entradas de agua registradas por CORENADR en 2021 (Figura 1, apartado de caracterización), confirmando el aporte principal al Lago por aguas residuales provenientes de San Juan Ixtayopan y del canal Riachuelo Serpentino. Por otro lado, a manera de complementar la información de años anteriores, los resultados de este muestreo incluyeron la zona IV norte.

Para una mayor comprensión de la calidad y dinámica del cuerpo de agua, los resultados de los parámetros fisicoquímicos (Tabla 3, anexo XIX) se dividieron en dos grupos. Por un lado, las muestras relacionadas con los afluentes de agua residual al Lago, y por otro las muestras correspondientes al sistema lacustre. Resaltando que la zona I se encontró seca.

Parámetros fisicoquímicos

Afluentes de agua residual

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos mostraron concentraciones elevadas de iones con una conductividad eléctrica promedio de 1726.5 µS/cm y una alcalinidad promedio de 673.65 mg/L (CaCO3).

En cuanto a la carga de sólidos totales promedio se registró una carga elevada con un valor de 1053 mg/L. Los principales aportes de contaminantes orgánicos para el caso de la materia nitrogenada son en forma de nitrógeno inorgánico con un valor promedio de 45.19 mg/L, siendo mayor la carga aportada por la descarga de agua proveniente de Riachuelo Serpentino con 54.24 y 36.1 mg/L para el aporte proveniente de San Juan Ixtayopan, mientras que el NO_2^- presentó valores muy similares con 6.16 mg/L en promedio. En cuanto al fósforo se registró un promedio de 10.44 mg/L en ambas zonas.

La materia carbonosa que ingresa por estos afluentes presentó valores muy similares entre la materia biodegradable medida como DBO_5 y la no biodegradable medida como DQO; con valores promedio de 215.5 mg/L para la biodegradable, y de 173.4mg/L para la no biodegradable. Los valores de coliformes fecales y totales fueron muy elevados en ambos afluentes, evidenciando la contaminación antrópica que presentan los afluentes al Lago.

Los resultados de las entradas continuas al Lago Tláhuac-Xico provenientes del canal de Riachuelo Serpentino y el afluente proveniente de San Juan Ixtayopan, mostraron en general un aporte de contaminantes ligeramente menor en la zona sur que en la zona norte, sin embargo, en ambos puntos, la concentración de materia nitrogenada, fosfatada y carbonosa son elevadas, así como el aporte de minerales al sistema. De tal manera que la acumulación de estos en el sistema lacustre Tláhuac-Xico al ser un sistema prácticamente endorreico han contribuido a la alcalinización e hipertrofización del Lago.

Sistema Lacustre Tláhuac-Xico

Temperatura. - Se obtuvo una temperatura promedio de 15 °C. El Lago se clasificó como tropical oligomíctico, debido a que este tipo de cuerpos de agua presentan una temperatura del agua superficial que oscila entre 20° y 30° C, manteniéndose constante durante todo el año.

Químicos minerales. - Los resultados de la zona lacustre (Tabla 4, anexo XIX), mostraron un valor promedio de pH de 8.69 UpH; dureza total promedio de 637 mg/L de $CaCO_3$; alcalinidad de 2029.75 mg/L de $CaCO_3$ y conductividad eléctrica 2242.50 µS/cm, cuyos valores están muy por encima de los valores de referencia en cuanto a concentración de sales. De tal manera que las condiciones del Lago son alcalinas con una elevada concentración de sales en las cuatro secciones analizadas del Lago. El oxígeno disuelto (O.D.) a nivel superficial presentó un promedio de 3.81 mg/L de O.D., mientras que a 0.50

m de profundidad la concentración de oxígeno promedio fue de 0.72 mg/L, mostrando una clara hipoxia hacia estratos inferiores en la columna de agua.

Sólidos. - El valor promedio para sólidos disueltos fue de 6114.50 mg/L, mientras que para sólidos suspendidos alcanzo un valor promedio de 536.50 mg/L, estos valoren están sumamente por encima del límite máximo permisible.

Nutrientes. - Los valores promedio encontrados de Nitrógeno fueron de 32.45 mg/L, Fósforo 6.13 mg/L y DBO_5 de 99.75 mg/L; HPO_4+ de 5.44 mg/L; y DQO de 573.25 mg/L. Estos valores se encuentran muy por encima de los recomendados para evitar el proceso de eutrofización.

Metales Pesados. - Para el caso del Cadmio total se encontró un promedio 0.05 mg/L cuyo LMP es de 0.2 mg/L. El Cobre total tuvo un valor promedio de 0.10 mg/L con LMP de 4 mg/L. Para el Níquel total se encontró un promedio 0.33 mg/L con LMP de 2 mg/L. El Plomo soluble presentó un valor promedio <0.20 mg/L con LMP de 0.5 mg/L. El Cromo soluble presentó un valor promedio <0.20 mg/L con LMP de 1mg/L. Para el Zinc soluble se encontró un promedio <0.10 mg/L con LMP de 10 mg/L. Estas concentraciones en la columna de agua están fuertemente relacionadas con las altas concentraciones de carbonatos y sales presentes en el lago, los cuales favorecen la precipitación de estos y su estabilización en la zona bentónica del lago.

Parámetros Biológicos. - El análisis arrojó como resultado un promedio de 90,000 coliformes como UFC en 100 ml, rebasando el LR de 1,000 UFC en 100 mL. La presencia de estos organismos denota la fuerte descarga de aguas residuales en el lago.

Análisis de Fitoplancton

En total se determinaron 20 taxones diferentes (Tabla 4, anexo XIX) distribuidos en cuatro divisiones: Cyanoprokaryota, Chlorophyta, Bacillariophyta y Euglenozooa. A cada taxón se le asignó un grupo funcional, obteniendo siete taxones para el grupo I, seguido del grupo III con cuatro, grupo V con tres y grupos IV, VI y VII con dos cada uno.

La clasificación por grupos funcionales está relacionada con la diversidad morfométrica, lo que conlleva a adaptaciones fisiológicas y la disponibilidad de recursos y energía (Tabla 126).

Tabla 126. Grupos morfológicos funcionales (MBFG) encontrados en el lago Tláhuac-Xico, según Kruk et al. 2010 y la descripción de sus características

MBFG	Características y comportamiento ecológico
Grupo I	Organismos pequeños con flagelos, tienen altas tasas de renovación.
Grupo III	Organismos filamentosos con estructuras que permiten regular su flotabilidad (aerotopos). Tienen baja vulnerabilidad al pastoreo y una alta superficie de exposición, adaptados a condiciones limitantes de luz.
Grupo IV	Organismos de mediano tamaño, sin estructuras especializadas.
Grupo V	Con presencia de flagelos, algunos son mixotróficos tienen tolerancia a concentraciones reducidas de nutrientes disueltos y a los aportes de materia orgánica.
Grupo VI	Presencia de estructuras silíceas sin flagelos y se hunden fácilmente.

Grupo VII	Organismos protegidos por mucílago, algunos producen sustancias alelopáticas.

El índice de Shannon-Wiener asume que todas las especies están representadas en las muestras e indica que tan uniformes son en cuanto a abundancia. Los valores inferiores a 2 se consideran bajos en diversidad y superiores a 3 altos. Encontrando que los máximos se presentaron para la zona IV sur (H'=2.15), seguido de la zona III (H'=1.97) y los más bajos para Riachuelo después del humedal (H'=0.50,
Tabla 127). La degradación de los ambientes y el desarrollo de los procesos eutróficos, tienen por consecuencia la reducción de la diversidad y la heterogeneidad de las especies.

Los valores de diversidad obtenidos muestran que hay variaciones en la composición de la comunidad fitoplanctónica que pueden estar relacionados con las condiciones ecológicas de cada sitio.

Tabla 127. Valores de diversidad de acuerdo con el índice de Shannon-Wiener (H') por sitio

Muestra	Sitio	H'
M0	Zona II	0.73
M1	Canal Riachuelo Serpentino	0.98
M2	Canal Riachualo Serpentino después del humedal	0.50
M4	Zona III	1.97
M5	Zona IV norte	1.33
M6	Canal San Juan Ixtayopan	1.40
M8	Zona IV sur	2.15

Respecto a las abundancias, los valores más altos de abundancias totales corresponden a las barras azules (Figura 169), los máximos fueron de 149,600 indv.ml-1 en la zona III, seguidos del canal Riachuelo Serpentino después del humedal con 116,000 indv.ml-1. Esta relación cercana entre ambos sitios podría deberse a que la zona III se encuentra influenciada directamente por el flujo continuo de Riachuelo Serpentino.

Los valores más bajos están marcados con barras amarillas, con 195 indv.ml-1 en Riachuelo Serpentino (no se observa la barra debido a que los valores son demasiado bajos) y 3,000 indv.ml-1 en canal San Juan Ixtayopan.

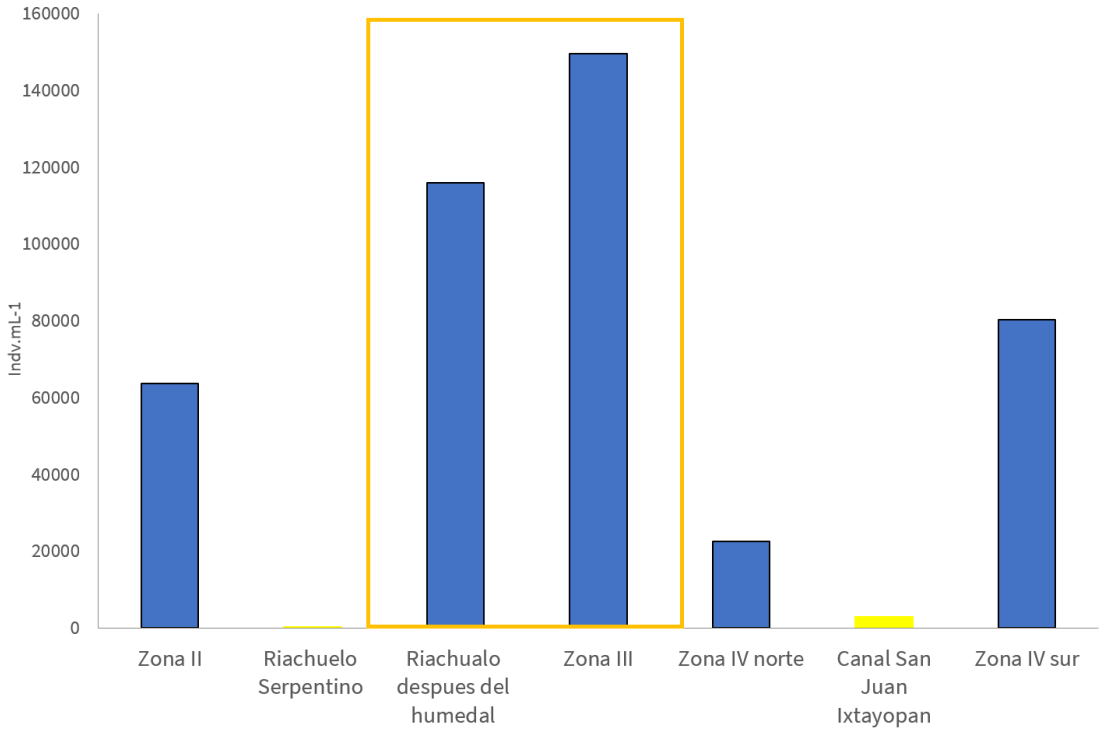


Figura 169. Abundancias totales de los diferentes sitios dentro del Lago; el recuadro naranja marca una relación entre ambos sitios, las barras azules son los mayores valores y las barras amarillas los menores valores, los valores de Riachuelo Serpentino son muy bajas para visualizarse.

Las abundancias obtenidas son debidas al crecimiento y reproducción muy elevadas del fitoplancton, de esta manera la presencia observada de florecimientos algales nocivos que pueden permanecer de manera fija debido a la incorporación excesiva y constante de nutrientes.

4.3.3.4 Conclusiones

- El aporte de aguas residuales y la acumulación de contaminantes hacia el Lago Tláhuac-Xico ha ocasionado un detrimento en la calidad del agua en el sistema lacustre.
- El análisis de calidad de agua realizado a partir de los datos de 2019 y 2022, ha confirmado que el sistema lacustre presenta una condición hipertrófica, teniendo altas concentraciones de contaminantes tales como el nitrógeno, fósforo y materia carbonosa en grandes cantidades.
- La baja profundidad del Lago y las altas tasas de evaporación, han favorecido la acumulación de sales y la alcalinización del Lago.
- Existe una variación en la composición de fitoplancton que puede estar asociada a la estacionalidad del Lago, junto con la presencia de taxones que persisten a pesar de esta variación. Además, su diversidad y presencia por grupo funcional, están correlacionadas con la calidad del agua, funcionando como un bioindicador.

Calidad del suelo

4.3.3.5 Introducción

La importancia del suelo radica en su transcendencia para el mantenimiento de los ecosistemas y su relevancia en el funcionamiento de los sistemas de agricultura sustentable e infraestructura urbana; desempeña múltiples funciones tales como, producción de alimento, fuente de materiales, registro histórico de la cuenca, banco de germoplasma, sumidero de carbono, ciclado de nutrientes y agua.

El cambio de uso de suelo, es la principal razón de la pérdida de servicios ambientales, teniendo efectos en la dinámica del suelo que están asociados principalmente a actividades productivas como la agricultura y la ganadería y al proceso de urbanización, actividades presentes en la zona del Lago Tláhuac-Xico.

La calidad del suelo se ha considerado una herramienta útil para detectar problemas de degradación o para evaluar la salud de diferentes ecosistemas. Es por ello que el propósito del siguiente apartado es realizar descripciones de suelo para determinar los servicios ecosistémicos que proveen los suelos en la periferia del Lago Tláhuac-Xico y con ellos establecer la calidad del suelo.



Figura 170. Zona de cultivo en la periferia del Lago Tláhuac-Xico.

4.3.3.6 Metodología

La metodología del muestreo de suelo se describe a detalle en el anexo XX.

4.3.3.7 Resultados

Descripciones del suelo

De manera general los suelos alrededor de la zona IV norte (perfil 1 y 2), presentaron un horizonte de textura C y CA y un color similar; sugiriendo el mismo origen por compartir el posible material parental. Fueron suelos profundos con un contenido medio de materia orgánica en los horizontes superficiales.

Los suelos comprendidos entre las zonas IV norte y III y IV sur, presentaron un horizonte superficial neutro y horizontes subsuperficiales ligeramente alcalinos (perfiles 4 y 5), además de la menor cantidad de carbonatos de calcio en los horizontes superficiales.

Los suelos de la de la periferia a las zonas I y II presentaron la menor profundidad, alrededor de los 50 cm, siendo los más cercanos al manto freático (perfiles 6, 7 y 8). Estos sitios presentaron condiciones moderadas a muy limitadas de drenaje, siendo susceptibles al ascenso capilar de agua y sales desde el manto freático.

La descripción detallada de cada perfil se desglosa en el anexo XX.

Evaluaciones ecológicas

Con base en la información recabada en campo se realizaron estimaciones generales denominadas evaluaciones ecológicas (Tabla 1, anexo XX); considerando el balance hídrico, capacidad de aireación y contenido de nutrientes en el suelo.

Después de estandarizar los valores obtenidos en la evaluación ecológica, se buscaron suelos que tuvieran valores estandarizados similares (Tabla 2, Anexo XX). Esta labor se apoyó en la construcción de gráficas en forma de estrella; en el entendido que figuras o patrones similares representan sitios que tienen los mismos valores en las evaluaciones ecológicas.

Como resultado, los suelos de la periferia del Lago Tláhuac- Xico se clasificaron en tres grupos, que se describen a continuación

Grupo 1

Descripción

- Localizados en la parte oriente de las zonas IV norte (P2) y II sur (P3 y P5).
- Suelos profundos; presentan el manto freático a más de 150 cm de profundidad.
- Tienen una alta capacidad para almacenar agua; cuentan con los valores más altos de volumen de poros total.
- Tienen poca materia orgánica y nutrientes; asociado a las actividades agrícolas que no incluyen la incorporación de enmiendas orgánicas dentro de su plan de manejo.

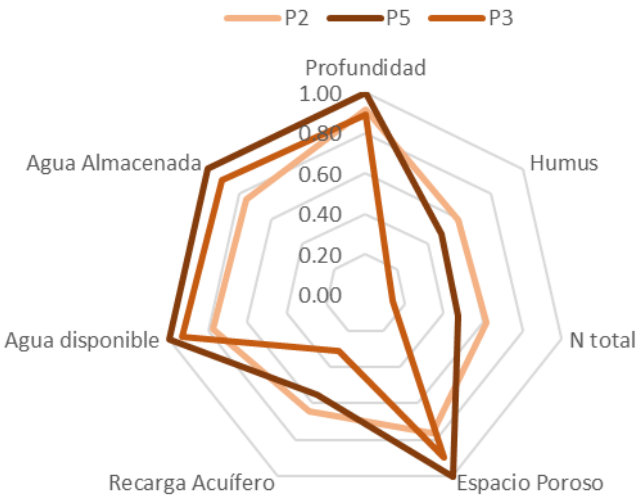


Figura 171. Descripción del suelo para el Grupo 1.

Grupo 2

Descripción

- Localizados en la parte central de las zonas III y IV sur (P4 y P6).
- Suelos someros; presentan el manto freático a 50 cm de profundidad.
- Tienen la más baja capacidad para almacenar agua; presentan los valores más bajos de volumen de poros total.
- Tienen muy poca materia orgánica y nitrógeno.
- Poseen una buena capacidad de aireación, que se refleja en la capacidad de exportar agua hacia la zona saturada.

Figura 1.

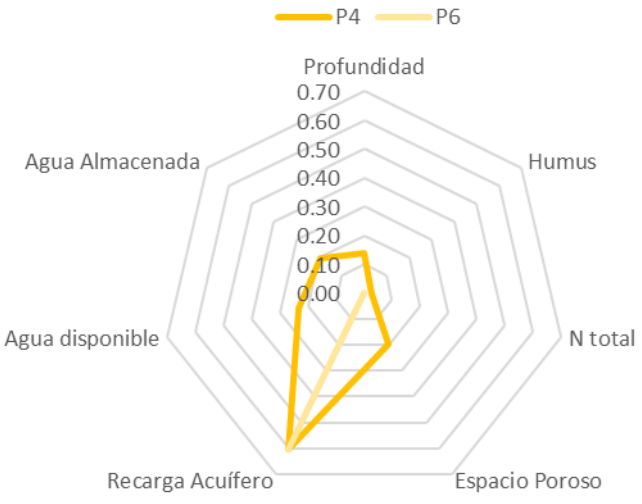


Figura 172. Descripción del suelo para el Grupo 2.

Grupo 3

Descripción

- Localizados en la parte norte de la zona IV norte (P1) y al sur de la zona I (P7 y P8)
- Poseen una profundidad intermedia; presentan el manto freático a una profundidad variable.
- Tienen la mayor cantidad de materia orgánica y nitrógeno en el suelo.
- Tienen un valor intermedio de volumen de poros total y agua disponible para las plantas, con un potencial variable para exportar agua a la zona saturada.
- Cuentan con la más baja capacidad para almacenar agua, materia orgánica y nitrógeno.

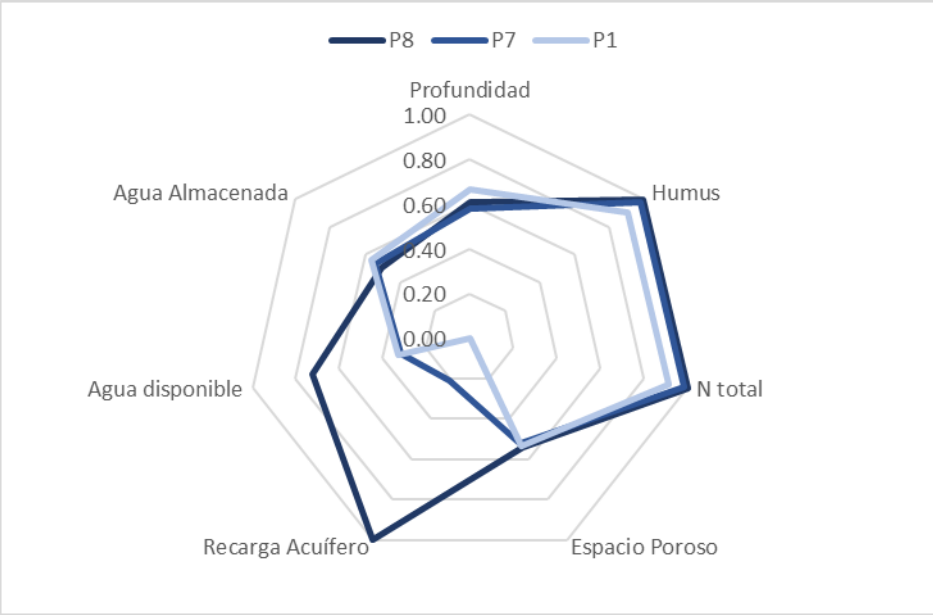


Figura 173. Descripción del suelo para el Grupo 3.

4.3.3.8 Conclusiones

- Los suelos de la periferia del Lago Tláhuac-Xico se caracterizan por tener texturas francas limosas y franco arcillosas, y son suelos ligeramente alcalinos.
- Tienen un drenaje natural moderado debido a las texturas finas del suelo.
- Se encontraron tres grupos de suelos basados en servicios ecosistémicos que proveen:
- Grupo 1: suelos profundos con alta capacidad para almacenar agua, pero con poca materia orgánica y nutrientes.
- Grupo 2: suelos poco profundos con baja capacidad para almacenar agua y buena capacidad de aireación que se refleja en la capacidad de exportar agua hacia la zona saturada.
- Grupo 3: suelos con el mayor contenido de materia orgánica, poseen una capacidad intermedia para almacenar agua y son suelos de profundidad intermedia.

4.4 Zonificación del ecosistema

A partir del conjunto de resultados obtenido, se realizó una zonificación para conocer el comportamiento espacial del ecosistema.

Inicialmente se realizaron zonificaciones de acuerdo con cada factor estudiado en el diagnóstico (biodiversidad, calidad del agua y del suelo), tomando la división de las tablas ejidales como unidades de paisaje (Figura 1, anexo XXI). Posteriormente se analizaron los resultados en conjunto para obtener una zonificación integral.

4.4.1 Zonificación del ecosistema de acuerdo con la distribución y diversidad de especies

A partir la riqueza de especies de todos grupos taxonómicos registrados (aves, plantas, invertebrados y microorganismos), se realizó un análisis de componentes principales (Figura 2, anexo XXI). Como resultado de dicho análisis se obtuvo una zonificación regionalizada (Figura 174).

De manera más particular, se encontró que las Tablas 12-3, 15-1 y Tecómitl-3 presentaron la mayor riqueza de aves, las Tablas 13-3 y 14-1 de invertebrados y las Tablas 28 y la 3-mocha de vegetación. En el caso de los taxones de microorganismos, las Tablas 13-3 y 12-2 fueron las más diversas (Figura 3, anexo XXI).

Una diferencia importante que se ha encontrado en todos los análisis incluyendo éste, es la marcada diferencia que existe entre la zona IV norte y el resto de las zonas del Lago. En este caso, las zonas I, II, III y IV sur, son las que presentan la mayor diversidad de especies y la IV la menor. Esta diferencia se puede relacionar con la presencia-ausencia de vegetación en la periferia de las zonas y a su vez, con la degradación del suelo y la calidad del agua.

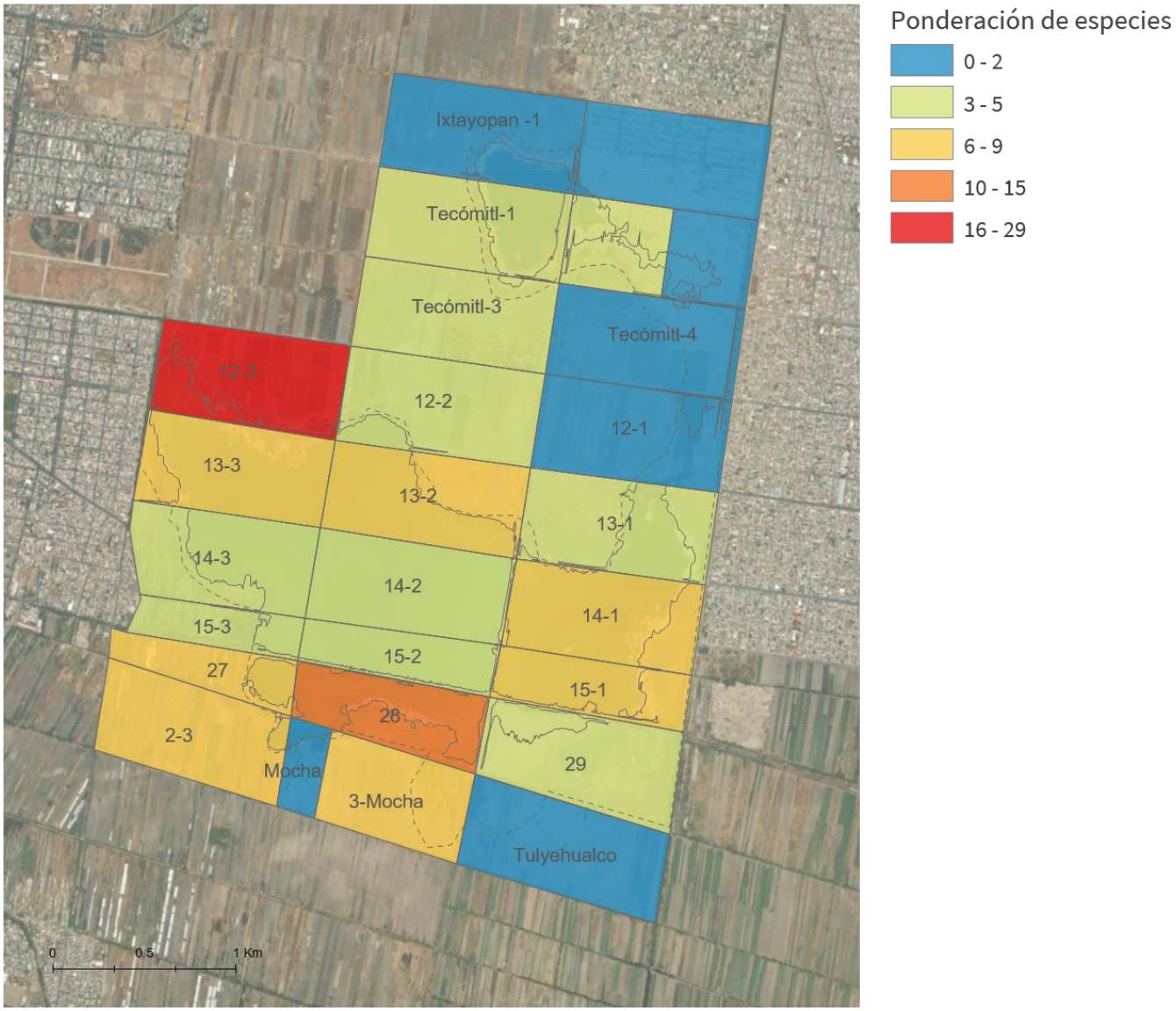


Figura 174. Zonificación de las tablas del Lago basada en un índice que pondera la riqueza de especies documentada.

4.4.2 Zonificación del cuerpo de agua de acuerdo con su calidad

La calidad de agua en el Lago Tláhuac-Xico tiene una elevada concentración de contaminantes orgánicos y minerales, sin embargo, las condiciones en el Lago no son homogéneas. A continuación, se presenta una zonificación de acuerdo con el tipo y grado de contaminación.

4.4.2.1 Zona II

Ubicada en la zona suroeste del Lago Tláhuac-Xico, después de la zona I, es la de menor extensión. Es alimentada con flujos continuos de afluentes de aguas residuales provenientes de San Juan Ixtayopan y escorrentías de riego agrícola aledañas a la zona. Se encuentra sólo interconectada con la zona III hacia al norte.

Constituye la porción que presenta la menor concentración superficial de O.D. Los principales contaminantes de la zona II son el HPO4+ y la materia carbonosa media como DQO. No obstante, es la que presenta mejor calidad de todas las zonas del lago.

4.4.2.2 Zona III

Ubicada en la zona oeste, es la que tiene una mayor extensión. Es alimentada con flujos continuos de afluentes de aguas residuales provenientes del canal Riachuelo Serpentino y escorrentías de riego agrícola aledañas a la zona. Se encuentra sólo interconectada con la zona II hacia al sur y con la zona IV sur hacia el este. Es la que presenta la mayor cantidad de oxígeno superficial con un valor de 4.85 mg/L y desciende a 0.12 mg/L a los 0.50 m de profundidad.

Presenta condiciones similares a la zona II. Sin embargo, en cuanto a la materia carbonosa biodegradable medida como DBO_5 presenta concentraciones elevadas con un valor de 317 mg/L, lo cual representa 17 veces más de lo encontrado en la zona II en donde la materia carbonosa biodegradable se encuentra en niveles inferiores a los límites permisibles, mientras que la materia carbonosa no biodegradable, medida como DQO, presentó las mismas concentraciones que la zona II.

4.4.2.3 Zona IV sur

Es la segunda zona con mayor extensión. Es alimentada con flujos continuos provenientes de la zona III e intermitentes de la zona I.

Las altas concentraciones de Fósforo Total llegan alcanzar el cuádruple de concentración del resto de las zonas con un valor de 10.03 mg/L.

La materia carbonosa biodegradable se encuentra en los niveles más bajos de todo el Lago Tláhuac-Xico (15 mg/l de DBO_5). La materia carbonosa no biodegradable medida como DQO presenta las concentraciones promedio 305 mg/L, siendo la segunda zona con las concentraciones más elevadas.

4.4.2.4 Zona IV norte

Ubicada en la zona norte del Lago Tláhuac-Xico. Se alimenta con flujos intermitentes provenientes de la zona IV sur cuando el tirante de agua permite su comunicación hacia el oriente del Lago. Su carácter endorreico, las altas tasas de evaporación y la falta de flujo ocasionan que la zona sea alcalina y muy somera, con apenas 0.30 m de profundidad promedio.

Es la zona más deteriorada y contaminada ya que presenta el mayor pH con un valor de 9.40, los mayores valores de dureza (9.26 mg/L de CaCO3), alcalinidad (2914 mg/L de CaCO3) y conductividad eléctrica (2030 ms/cm).

Presenta las mayores concentraciones de Nitrógeno orgánico (61.28 mg/L) de todo el sistema lacustre siendo casi el triple del Nitrógeno Total registrado en la misma zona. La materia carbonosa biodegradable se encuentra en los niveles más bajos de todo el Lago (19 mg/l de DBO_5). Sin embargo, la materia carbonosa no biodegradable medida como DQO presenta las concentraciones promedio más elevadas con 1689 mg/L. Las bajas

concentraciones de O.D. así como las concentraciones de DQO, muestran que este lago es el que presenta mayor nivel de hipoxia en el Lago Tláhuac-Xico.

De acuerdo con la información analizada, en función de la concentración de contaminantes y la diversidad de éstos, se establece de manera descendiente la calidad de cada zona.

- Zona II
- Zona III
- Zona IV sur
- Zona IV norte

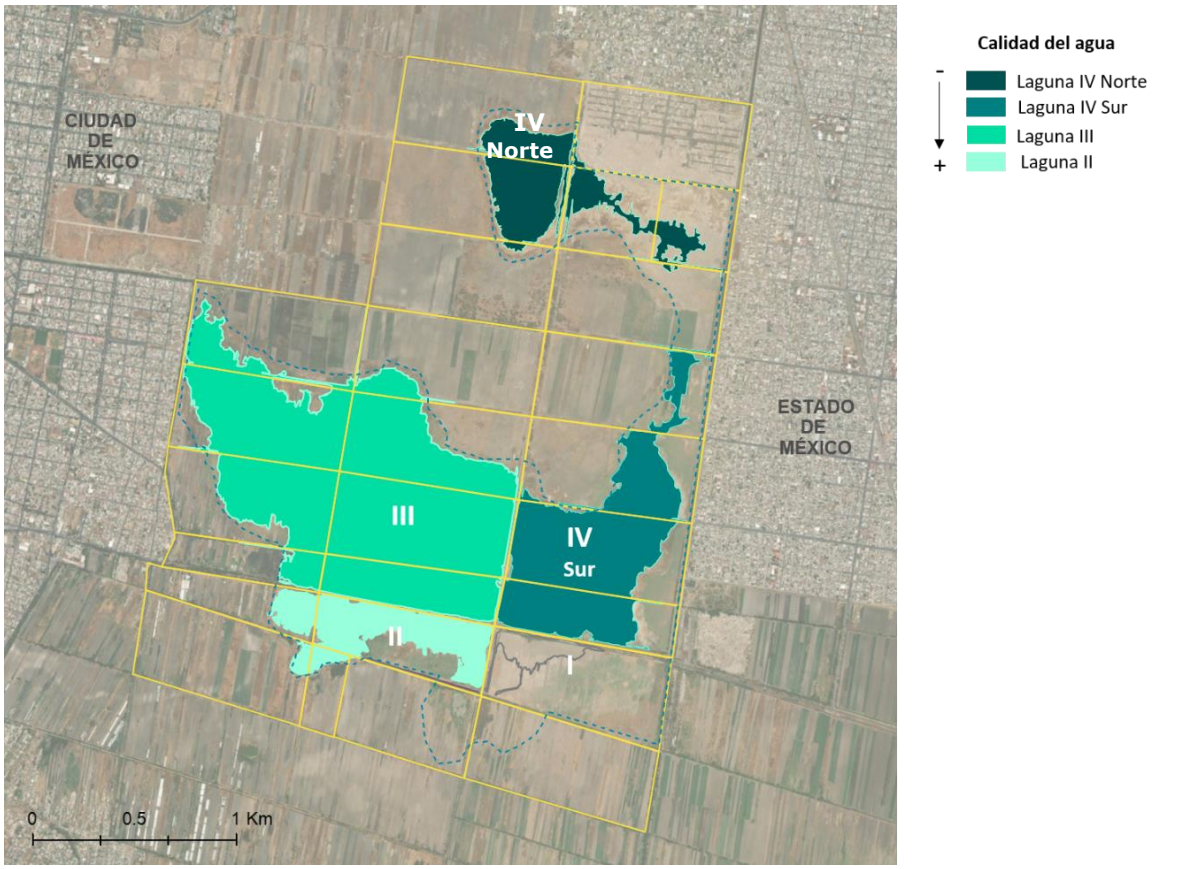


Figura 175. Zonificación de la calidad del agua del Lago Tláhuac-Xico.

4.4.3 Zonificación de la calidad del suelo

4.4.3.1 Clasificación de suelos

Utilizando la Base de referencial Mundial del Recurso Suelo y la información de la caracterización del suelo, se clasificó a los suelos dentro del grupo de los Solonchaks. Este tipo de suelos están influenciados por la cercanía a cuerpos de agua superficiales o cerca del manto freático, enriquecidos con sales de origen evaporítico y con pH neutro a ligeramente alcalino.

Para obtener la zonificación del suelo, se construyó una matriz con los datos de las descripciones del suelo. En total se obtuvieron 3 grupos con propiedades similares,

clasificados a su vez en tres tipos de suelo: Solonchaks gléyico (perfiles 1, 2 y 3), Solonchak cálcico (perfiles 4 y 5) y Solonchak mólico (perfiles 6, 7 y 8). En la Figura 176, se observa la distribución de los tipos de suelo de cada zona del Lago.

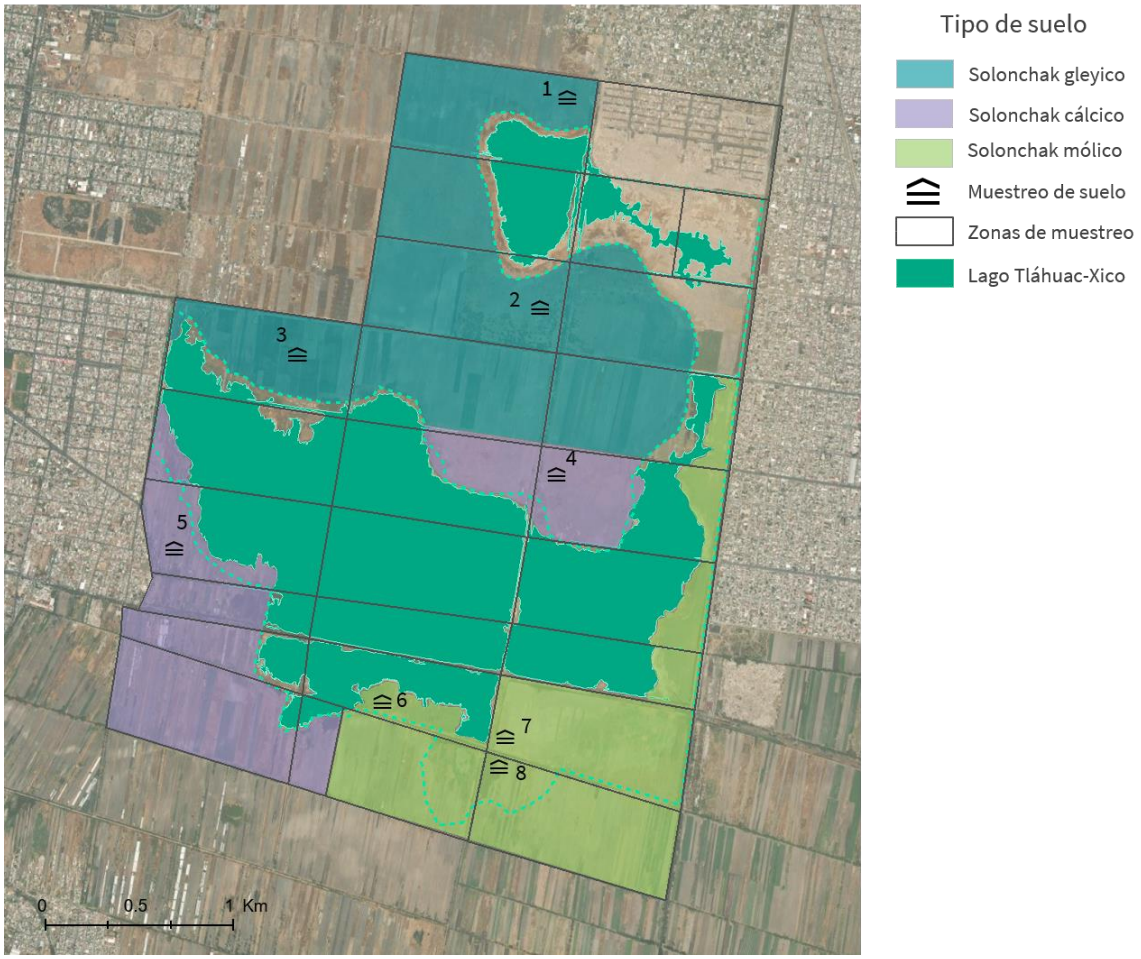


Figura 176. Mapa de caracterización por tipos de suelo en la periferia del Lago Tláhuac-Xico.

4.4.3.2 Calidad del suelo

Para la zonificación de la calidad del suelo, se construyó una matriz con los datos de los resultados de las evaluaciones ecológicas (Figura 4, anexo XXI). Como resultado se obtuvo la distribución de los tres grupos de calidad de suelo (Figura 177) con las siguientes características:

- Calidad 1: suelos profundos con alta capacidad para almacenar agua, pero con poca materia orgánica y nutrientes.
- Calidad 2: suelos poco profundos con baja capacidad para almacenar agua y buena capacidad de aireación que se refleja en la capacidad de exportar agua hacia la zona saturada.
- Calidad 3: suelos con el mayor contenido de materia orgánica, poseen una capacidad intermedia para almacenar agua.

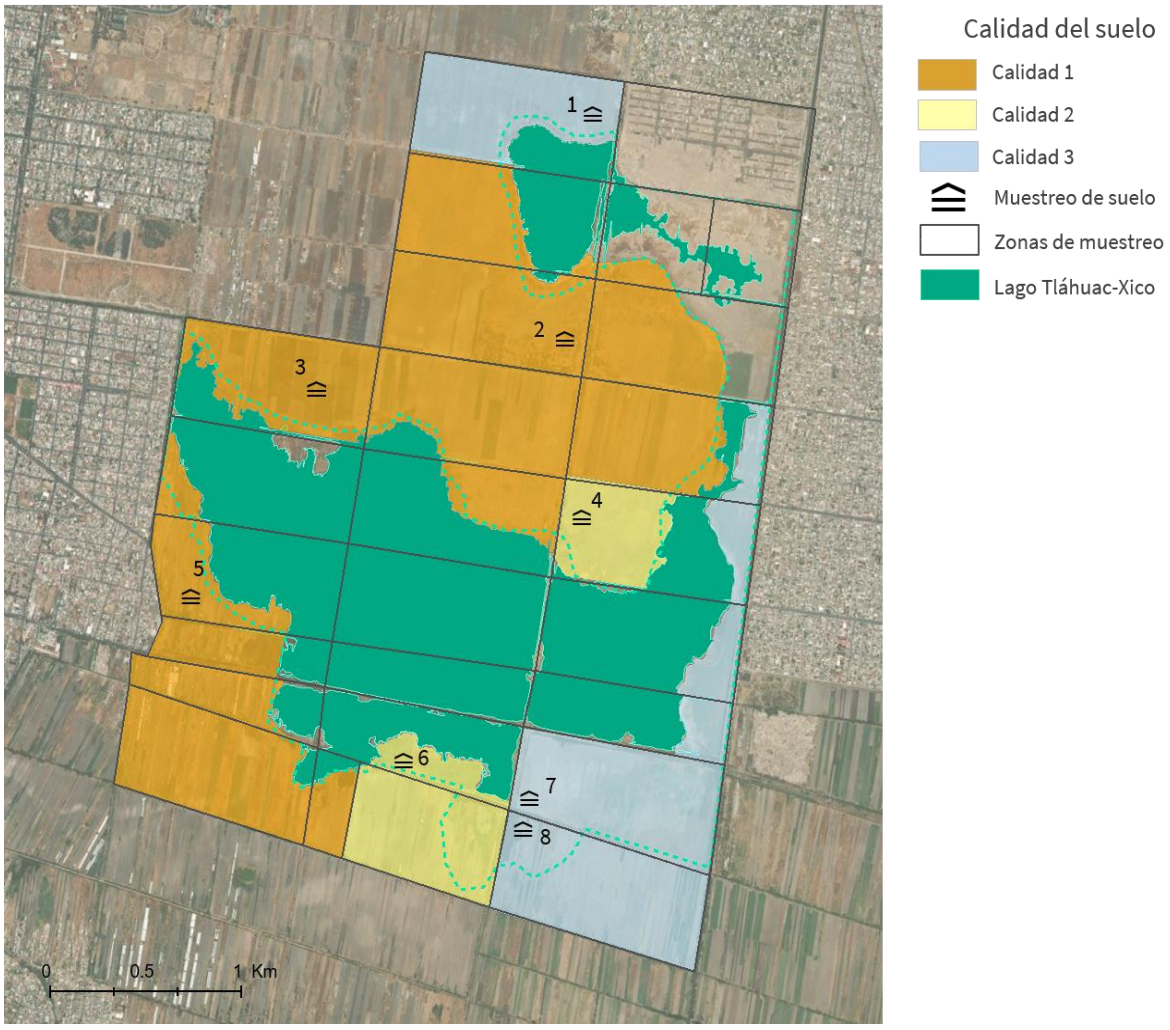


Figura 177. Mapa de la calidad de los suelos en la periferia del Lago Tláhuac-Xico.

4.4.3.3 Relación del uso de suelo actual y su calidad

En la zona norte, con tipo de suelo Solonchaks gléyicos, se observaron dos calidades de suelo, la calidad 1 y la calidad 3. Las actividades agrícolas realizadas en la zona con calidad de suelo 1 no representan algún riesgo para la dispersión de contaminantes, pues tienen un drenaje limitado. Por otro lado, en la zona sur, con una calidad 3, se presentaron suelos con alto contenido de materia orgánica y nutrientes.

En la zona con Solonchaks cálcicos, se presentaron dos calidades de suelo, 1 y 2. En esta zona las actividades agrícolas pueden representar un riesgo de lixiviación de contaminantes al acuífero; sobre todo en los sitios con calidad 2 que se distingue por tener la mayor capacidad de recargar el acuífero.

Por último, en los Solonchaks mólicos encontramos a suelos con calidad 2 y 3. De manera general son suelos someros y en el caso de los sitios con calidad 2 cuentan con una alta capacidad de recargar el acuífero. Lo anterior lo hacen muy susceptibles a la lixiviación de contaminantes.

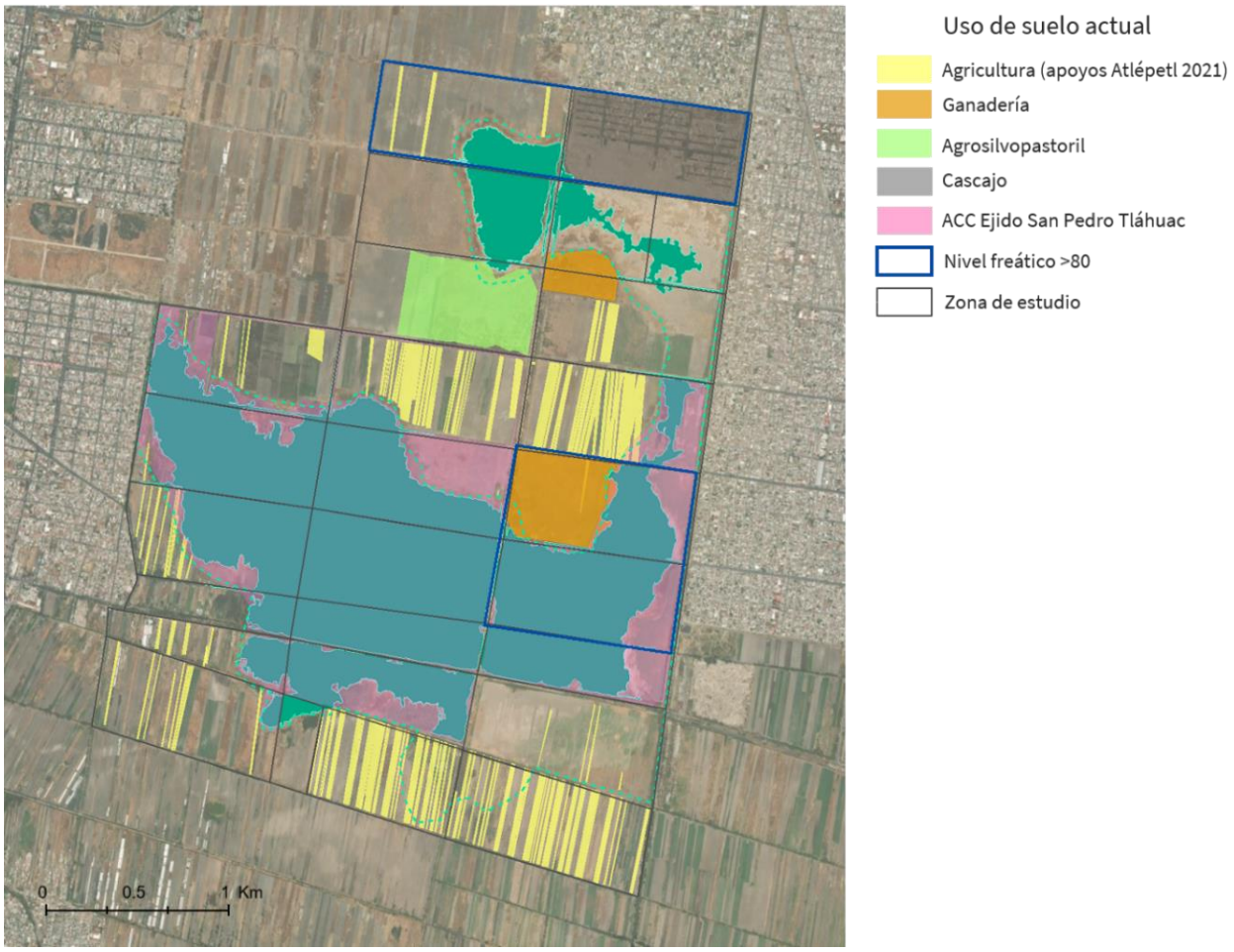


Figura 178. Mapa del uso actual del suelo en la periferia del Lago Tláhuac-Xico.

4.4.4 Zonificación integral

Al analizar de forma conjunta todos los parámetros, la zonificación es muy parecida a lo descrito con antelación y, por lo tanto, el comportamiento ecológico es particularmente diferente entre la zona IV norte y las otras. El resultado más importante de esta correlación es la existencia entre una mayor diversidad biológica y una mejor calidad de agua (Figura 179).

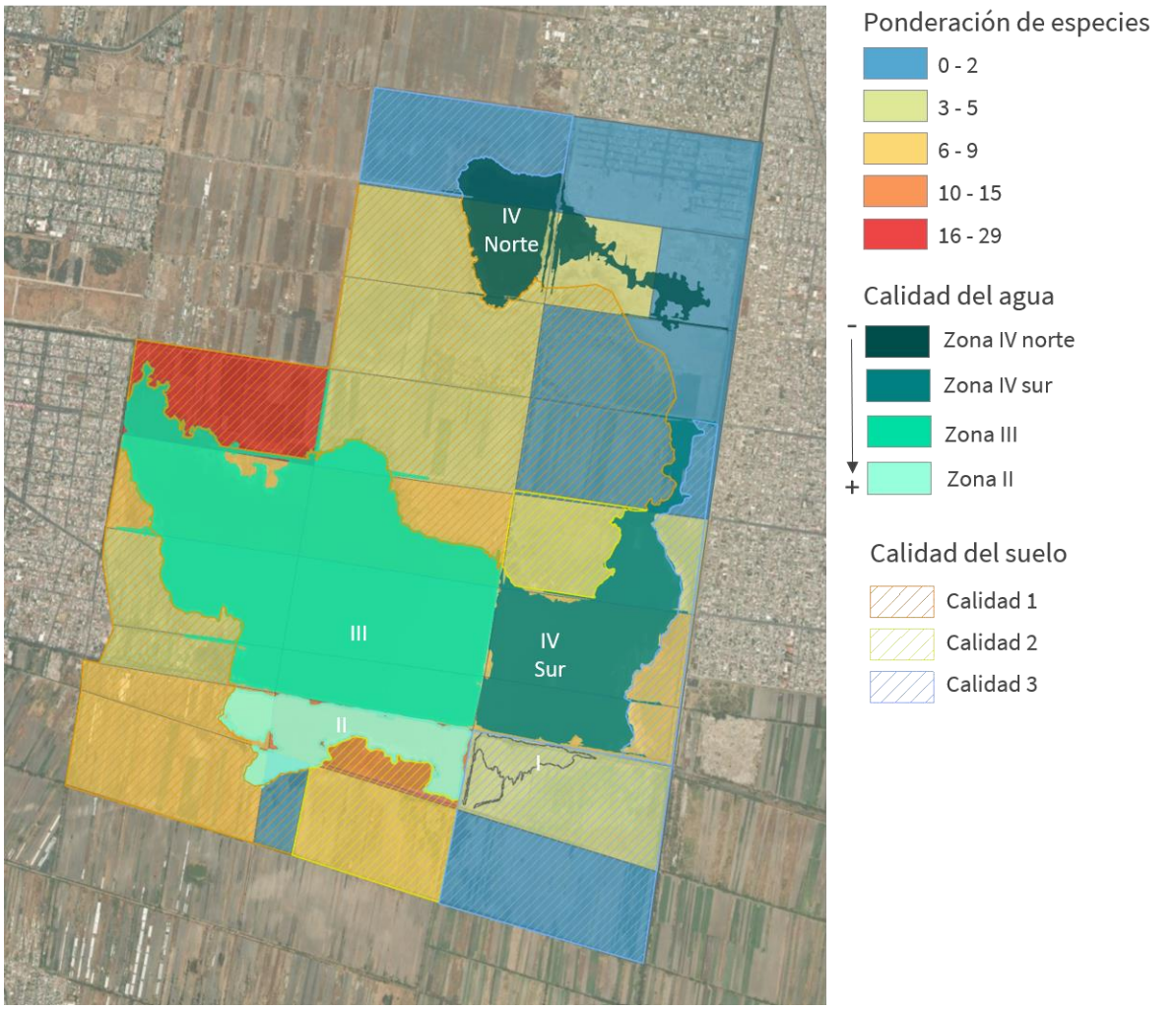


Figura 179. Zonificación general del Lago Tláhuac - Xico, acorde con la calidad del suelo, agua y diversidad de especies.

4.5 Estrategias de restauración socioambiental

De acuerdo con la zonificación del ecosistema se proponen estrategias de restauración, considerando ensambles ecológicos con especies que tengan altas probabilidades de establecimiento y permanencia para favorecer la sucesión ecológica.

4.5.1 Aumento de la cobertura vegetal hidrófila y terrestre

Se propone revegetar la orilla de cada zona del Lago con plantas acuáticas, dando estructura al substrato y de manera paralela favorecer la depuración del agua.

4.5.1.1 Zonas I y II

Se sugiere revegetar al menos el 30% de las orillas e idealmente el 70%. Posteriormente, cuando las condiciones del agua mejoren las especies colocadas se dispersarán de manera natural cubriendo los espacios que queden sin planta y ya sin substrato artificial.

Además, se colocarán humedales flotantes que permitirán enriquecer el hábitat para las aves, invertebrados y otros organismos que lleguen a las zonas del Lago. Este enriquecimiento consistirá en establecer en diferentes densidades estructuras flotantes que serán el soporte de plantas acuáticas.

En sincronía se propone revegetar las riberas con pastos, herbáceas, arbustos y árboles que propiciarán la restauración del suelo y favorecerán la conformación de microhábitat para otras especies.

Se plantea el uso de plantas acuáticas enraizadas emergentes en contenedores. Se propone revegetar de 45% a 90% de la orilla.

La revegetación terrestre será a partir del establecimiento de especies precursoras como pastos y arbustos que soporten las condiciones de sal de la zona. Estos crearán microclimas adecuados que permitirán el inicio de la sucesión.

4.5.1.2 Zonas III y IV sur

Después del trabajo de profundización que llevará a cabo la Comisión Nacional del Agua, se propone iniciar la restauración y contención de las orillas de las zonas mediante el establecimiento de plantas acuáticas enraizadas emergentes en densidades de 5-7 individuos por metro cuadrado. Se continuará colocando las enraizadas sumergidas en tapetes de 5-10 individuos hasta alcanzar revegetar del 60 al 90% de la orilla.

En conjunto con la rehabilitación del suelo, es importante establecer pastos y arbustos para favorezcan la reestructuración del suelo y la sucesión ecológica y posteriormente reforestar con árboles que enriquezcan el hábitat para la biodiversidad.

4.5.1.3 Superficies a intervenir

Las superficies a intervenir contemplan dos porcentajes de revegetación. Se contempla sembrar las plantas con una distribución espacial donde el 30% de la superficie tenga vegetación, permitiendo que los espacios vacíos se colonicen de manera natural. En esta opción la restauración es económicamente más barata, pero también es más lenta, ya que se privilegian los procesos naturales.

Por otro lado, la opción de revegetar un 75% es más intensa y rápida, aunque económicamente es necesario invertir más recursos, las zonas a restaurar son rápidamente colonizadas.

Independientemente de la inversión en cualquiera de las estrategias, la selección depende de los requerimientos de las zonas. Por ejemplo, las zonas I y II no requieren de un trabajo urgente de revegetación de las orillas. Por otro lado, las zonas III y IV sur, después de la profundización, si lo requieren.

Tabla 128. Superficies a revegetar en las estrategias de restauración de la biodiversidad.

Bordes vegetación hidrófita			
Zona	perímetro (m)	**30%**	**75%**
I	2772	831.6	2079
II	1202	360.6	901.5
III	5025	1507.5	3768.75
IV Sur	2778	833.4	2083.5
IV Norte	2032	609.6	1524
Bordes Zonas (vegetación terrestre)			
Zona	**perímetro (m)**	**30%**	**50%**
I	2772	831.6	1386
II	1202	360.6	601
III	5025	1507.5	2512.5
IV Sur	2778	833.4	1389
IV Norte	2032	609.6	1016

4.5.1.4 Paleta vegetal

Para la revegetación de las zonas se proponen una serie de especies que por sus características funcionales pueden conformar ensambles de plantas estables que puedan mantenerse al largo plazo, haciendo más rentable el proyecto y al mismo tiempo favoreciendo la construcción de hábitat para la biodiversidad.

La paleta vegetal está compuesta por especies de hidrófitas que servirán para la revegetación de las orillas de la zona y la construcción de los humedales flotantes. Asimismo, se enlistan especies terrestres con diferentes formas de vida que soportan las altas cantidades de sales y degradación del suelo. Se proponen especies formadoras de microhábitat para que estas mismas favorezcan la sucesión natural a mediano y largo plazo.

Tabla 129. Paleta vegetal propuesta para la revegetación de las orillas de las zonas y los bordes de éstas.

Especie	***Grupo Funcional***
Potamogeton illinoensis	Hidrófita
Typha domingensis	Hidrófita
Hydrocotyle verticillata	Hidrófita
Nymphaea gracilis	Hidrófita
Juncus effusus	Hidrófita
Schoenoplectus americanus	Hidrófita
Phragmites australis	Hidrófita
Buddleja chordata	Arbusto
Senecio salignus	Arbusto
Heliotropium curassavicum	Herbácea
Distichlis spicata	Pastos
Eleocharis macrostachya	Pastos
Fraxinus uhdei	Árbol
Salix bonplandiana	Árbol

En cuanto a las especies acuáticas, están representadas especies de tres hábitos: enraizadas emergentes, enraizadas sumergidas y flotantes enraizadas. De éstas, al iniciar la revegetación se elegirán las más adecuadas dependiendo de la zona, el grado de degradación y el flujo de agua.

4.6 Mejoramiento de suelos

4.6.1 Rehabilitación de suelos salinos con drenaje subterráneo

Debido a las condiciones de alta salinidad de la zona norte del Lago Tláhuac-Xico, se plantea la rehabilitación de los suelos salinos con el fin de favorecer el establecimiento y desarrollo de la vegetación. Su diseño y construcción se presentan como una tecnología alterna para un adecuado control de la salinidad y alcalinidad.

Se propone un sistema de drenaje subterráneo parcelario. La primera aproximación está basada en la metodología de Namuche-Vargas (2018), quienes proponen dos espaciamientos: 25 y 50 m a una profundidad de 0.7 m con una pendiente de 0.01 %. La tubería utilizada en la instalación deberá tener un diámetro de tres pulgadas, corrugada, flexible, ranurada y sin filtro. El agua que se usará para el lavado del suelo se conducirá desde Riachuelo Serpentino de la cual se utilizará un gasto de 11 l/s. Se recomienda no usar filtros dentro de la tubería debido a las texturas del suelo que tiende a contener más del 30% de arcillas (texturas franco-arcillosas). Con base en la capacidad de almacenamiento de agua de estos suelos se proponen láminas con rangos de 20-30 cm, para lo cual se consideraron cinco lavados, con intervalos de 15 días.

4.6.2 Mejoramiento de suelos para reforestación

La propuesta del trabajo considera la inclusión de una planta arbustiva halófita del género *Tamarix* para la reforestación de áreas degradadas por suelos salinos y con drenaje natural deficiente para intervenir 36.7 ha. Como estrategia complementaria a la reforestación se ha propuesto la introducción de una especie herbácea halófita *Distichlis spicata*. El uso de *Tamarix* tiene una ventaja adicional debido a que se puede propagar desde la semilla. Ambas especies halófitas han sido propuestas para la plantación y reforestación de suelos con niveles elevados de sales en el suelo y niveles freáticos someros.

La reforestación de la zona deberá consistir en la propagación y establecimiento de *Distichlis spicata* hasta una cobertura del 80%. Los árboles de *Tamarix chinensis* deberán tener un arreglo de tres bolillos a 3 m; lo que nos da una cantidad de alrededor de 1,200 plantas por hectárea. Además de agregar composta hasta alcanzar el 4% de materia orgánica.

4.6.3 Reforestación de bordes

Es necesario implementar una cobertura vegetal con apoyo de especie arbóreas que permitan la disminución de la cantidad de sales acumuladas en el suelo debido a que limitan el crecimiento de algunos cultivos. Los trabajos se llevarán a cabo en las zonas III y IV sur como complemento de la vegetación terreste con una superficie a intervenir de 17.2 ha.

La reforestación de la zona consistirá en la propagación y establecimiento de *Distichlis spicata* hasta una cobertura del 80%. Los árboles de *Tamarix aphylla* deberán tener un arreglo lineal con un espaciamiento de 2.5 m; lo que nos da una cantidad de alrededor de 1,200 plantas por ha. Las plantas tendrán una altura mínima de 1.20 m.

Como estrategia de apoyo al establecimiento de la plantación y prevenir el ascenso capilar de sales, se colocará una capa de cascajo triturado con un diámetro de 20 mm, con un espesor de 15 cm antes de la construcción del borde.
Se agregará composta hasta alcanzar el 4% de materia orgánica.

Se establecerán parcelas de monitoreo de la supervivencia de las plantas. La superficie de las plantas pilotos será de 1000 m^2, donde se medirán el diámetro en la base del tronco y altura de los individuos en la parcela piloto. En estas parcelas pilotos se realizarán muestreos para evaluar el avance de la restauración y el porcentaje de supervivencia. El muestreo del suelo se realizará mediante muestreo compuesto superficial con al menos 14 submuestras, a una profundidad de 0-40 cm de profundidad. EL muestreo se realizará en zig-zag procurando cubrir la totalidad de la parcela piloto.

4.6.4 Mejoramiento del suelo para agricultura

Para la zona del Lago Tláhuac-Xico, se identificó que el origen de la salinidad es el intemperismo de minerales primarios del material parental y de los minerales secundarios del suelo además de la mala calidad del agua que se acumula en el Lago. Lo anterior produce una acumulación de sodio intercambiable dentro del complejo de intercambio catiónico; lo cual impide el desarrollo normal de la cobertura vegetal. Es por ello que la estrategia clave de esta propuesta es la adición de yeso para reemplazar el sodio del complejo de intercambio. Mediante esta técnica se plantea intervenir 44 hectáreas.

El inicio de la estrategia se llevará a cabo con el establecimiento de la cobertura vegetal con apoyo de la especie arbórea adecuada, que ayudará también a disminuir la cantidad de sales acumuladas en el suelo debido a que limitan el crecimiento de algunos cultivos.

La cantidad de yeso a aplicar a una profundidad de 40 cm será de 23 toneladas de yeso por hectárea y se agregará composta hasta alcanzar el 4% de materia orgánica. Para evaluar el avance de la estrategia se realizará un muestreo compuesto superficial con al menos 14 submuestras, a una profundidad de 0-40 cm de profundidad. El muestreo deberá realizarse en zig-zag procurando cubrir la totalidad de la parcela intervenida.

Una forma de monitorear todas las estrategias mencionadas, es midiendo la conductividad eléctrica del suelo, la cual se medirá en el extracto de saturación, pH y cationes intercambiables. Con las variables antes mencionadas se calculará el porcentaje de sodio intercambiable; el cual se debe de mantener por debajo de 10%. Con esta información se calculará la lámina total de lavado que está basado en el contenido de sales del suelo por lavar considerando una profundidad de 0.70 m; en el contenido de sales permisibles para que un cultivo se desarrolle sin problema.

4.7 Humedal de Fitoremediación en la Zona II

Se proponen el establecimiento de un sistema de humedales que sea capaz de tratar el agua residual proveniente de San Juan Ixtayopan, así como barreras de vegetación a las márgenes de las zonas que mitiguen el aporte de contaminantes por arrastre o acarreo superficial provenientes de las zonas agrícolas aledañas.

Los Humedales Artificiales (HA) son sistemas de depuración biológica de aguas residuales que basan el proceso de degradación de contaminantes mediante la interacción de sus constituyentes principales. Este tipo de sistemas pueden dividirse en dos tipos en función de su tipo de flujo, pueden ser Humedales Artificiales de tipo Subsuperficial (HAFSS) y Humedales de tipo Superficial (HAFS). Los HAFSS se caracterizan porque el flujo de agua discurre de forma subterránea, favoreciendo que el agua a tratar no quede expuesta al ambiente y permiten la depuración de cargas elevadas de contaminantes, mientras que los HAFS son sistemas inundados con espejo de agua expuesto al ambiente y son acompañados de extensa vegetación de hidrófitas. Sin embargo, estos últimos tienen menor capacidad de depuración por lo cual son empleados para los pulimentos de los HAFSS, pero los HAFS mantienen un mejor entorno paisajístico de lugar y son propicios para la preservación de la vida silvestre ya que proveen de un nicho ecológico para diversos tipos de organismos.

La zona destinada para los sistemas de humedales se encuentra en la zona II dentro de la Tabla agrícola 28 y contará con superficie disponible de 10 ha. El sistema ocupará un área total de tratamiento de 8.5 ha y una superficie activa con base a humedales 5.7 ha.

En la siguiente tabla se desglosan las especificaciones del diseño conceptual para los sistemas de Humedales.

Tabla 130. Especificaciones por Módulo en el sistema de humedales de la Zona II del Lago Tláhuac-Xico.

Módulo	Área efectiva de tratamiento	Descripción
Pretratamiento	3 000 m^2	Sistema de cribado y sedimentación
Módulo Primario HAFSS	12 000 m^2	3 celdas de HAFSS de 3000 m2 (90 m x 33 m) 2 celdas de HAFSS de 1500 m2 (45 m x 16.5 m) Profundidad de la celda 0.80 m Material de empaque a emplear (agregado mineral Riolita)
Módulo Primario HAFS	4 300 m2	4 celdas circulares de 18 m de radio, sin material de empaque
Módulo Secundario HAFSS	15 000 m^2	5 celdas de HAFSS de 3000 m2 (90 m x 33 m) Material de empaque a emplear (agregado mineral Riolita + calcita)
Módulo Terciario HAFSS	15 000 m^2	5 celdas de HAFSS de 3000 m2 (90 m x 33 m) Material de empaque a emplear (agregado mineral Riolita).

4.7.1 Componente vegetal

La vegetación en los humedales artificiales comprende el empleo de diversas especies vegetales hidrófitas según la vocación del sistema. Para su selección se consideraron los siguientes criterios:

- Capacidad de remoción de sedimentos.
- Tolerancia a los niveles de sedimentos y calidad del agua.
- Adaptabilidad a los medios de soporte con concentración mineral.
- Profundidad de la raíz adecuada (entre 0.40 y 0.60 m)
- Fuerza de empuje moderada de crecimiento en raíz.
- Resistencia a un amplio rango de temperaturas, en particular a los registrados en el lugar.
- Tolerancia a exposición prolongada a los rayos directos del sol.
- Resistencia a concentraciones variables de contaminantes.
- Compatibilidad con la biopelícula de microorganismos.
- Sencillez de manipulación.
- Facilidad de propagación.
- Disponibilidad a lo largo del año.
- Estética (color, talla y tamaño).
- Facilidad de mantenimiento, transporte nutrimentos disponibles, luz y humedad).
- Condiciones del componente acuático (movimientos de la columna de agua).
- Diseño del sistema.

De tal manera que para para el Módulo primario de HAFSS, las especies a emplear son de características depuradoras, mientras que para el caso del Módulo Secundario y Terciario de HAFSS se emplearán:

- *Prhagmites australis* (carrizo)
- *Juncus effusus* (tulillo o junco)

Mientras que las cuatro celdas del Módulo primario de HAFS1 emplearán siete especies depuradoras de contaminantes:

- *Pistia stratiotes* (lechuga de agua)
- *Wolffia globosa* (lenteja de agua)

Tabla 131. Organismos vegetales para los sistemas HAFSS y HAFS.

Especie	Número de ejemplares
Schoenoplectus californicus	8 000
Prhagmites australis	8 000
Juncus effusus	8 000
Pistia stratiotes	4 000
Wolffia globosa	8 kg

Las fichas técnicas de las especies se encuentran en el anexo XXII.

4.7.2 Beneficios esperados

En los últimos años, los HA se han convertido, a escala mundial, en una alternativa altamente viable con respecto a los sistemas convencionales de depuración de aguas residuales. Estos son sistemas activos de depuración en los que se imitan los procesos físicos, químicos y biológicos típicos de un humedal natural, pero diseñado y construido con el propósito principal de tratar aguas residuales de origen doméstico y similares, y confinándolo a un espacio definido.

Los beneficios que han motivado el creciente interés por esta tecnología son los siguientes:

- Proporcionan un tratamiento eficaz, eliminando de las aguas residuales un amplio número de contaminantes: materia orgánica, nutrientes, microorganismos patógenos, metales pesados, etc.
- Sus costos de inversión, operación y mantenimiento son significativamente menores que los de los sistemas convencionales de tratamiento.
- Proporcionan un tratamiento secundario y/o terciario, produciendo un agua reutilizable en muchos casos.
- La generación de subproductos (lodos) es mucho menor que la de los sistemas tradicionales. A valores a menores a un 20 % con respecto a los lodos activados, en términos comparativos.
- Soportan las fluctuaciones de caudal o de carga contaminante.
- Están bien integrados dentro del paisaje y contribuyen al desarrollo de vida silvestre.
- Tienen la posibilidad de ser utilizados para fines didácticos y de educación ambiental.
- Poseen facilidad de operación, lo que hace factible que jardineros o trabajadores habituados a actividades propias de parques o espacios verdes realicen las tareas de operación y mantenimiento (no requieren de mano de obra calificada).
- Calidad de agua acorde con los requerimientos establecidos con las normas nacionales internacionales vigentes.
- Su diseño puede ser modular, lo cual favorece la obtención de un agua tratada con distintas calidades para diferentes reúsos (riego de áreas verdes, descarga en cuerpos de agua, etc.).
- El diseño modular de este tipo de tecnologías facilita que se puedan construir por etapas; en el caso de que no se cuente con los recursos suficientes o si se tiene programado un crecimiento de la demanda del tratamiento de aguas residuales a futuro.
- El tiempo de vida útil está por encima de los 25 años.
- Ofrecen resultados satisfactorios, cuando son alimentados con aguas que contengan detergentes, materiales tóxicos, metales y/o hidrocarburos.
- Si son operados correctamente no hay generación de malos olores, ni presencia de mosquitos.
- No requieren de la adición de productos químicos o suplementos para mejorar la calidad del agua.



Figura 180. Ubicación de estrategias de restauración ecológica en el Lago Tláhuac-Xico.

4.7.3 Guía de bioindicadores para monitoreo de la calidad del ecosistema

Los bioindicadores son organismos que se encuentran interactuando con factores bióticos y abióticos (ensambles ecológicos) que nos permiten evaluar la calidad de un medio terrestre o acuático. El uso de estos organismos permite evaluar el estado ecológico en el que se encuentra un cuerpo de agua en un momento determinado, observar su evolución en el tiempo reduciendo costos económicos e incluir otros impactos en el ambiente.

Los bioindicadores se clasifican como: a) de respuesta o b) de acumulación (Tabla 132). Los organismos indicadores de respuesta brindan información acerca de las condiciones del ecosistema, factores como humedad, pH o presencia de compuestos específicos, mientras que los organismos utilizados como indicadores de prueba o de monitoreo, muestran respuestas a largo plazo sobre las tendencias que prevalecen en el sistema acuático y son sensibles a los cambios estacionales o a variaciones en la estructura trófica del sistema.

Para llevar a cabo un estudio con bioindicadores, se deben de determinar a los organismos de monitoreo y los de prueba. Estos organismos, incluyen a todos los organismos empleados en seguimientos cuantitativos y cualitativos de los niveles de contaminantes de un ecosistema y sus posibles repercusiones sobre el mismo. Por otra parte, los organismos de prueba son utilizados principalmente en el uso de pruebas de laboratorio en el área de toxicología; muchas de estas pruebas se realizan con el fin de evaluar el nivel de riesgo al que se encuentra al exponerse a distintos niveles de un contaminante (Tabla 132).

Para establecer la calidad de un cuerpo de agua por medio de bioindicadores se pueden utilizar diferentes índices de diversidad como: a) Shannon- Weaver, b) Simpson y c) Margalef.

Tabla 132. Clasificación de bioindicadores para monitoreo de calidad de agua en cuerpos lacustres.

Grupo	Bioindicador de acumulación	Bioindicador de monitoreo	Bioindicador de prueba	Descripción
Fitoplancton	X	X		El aumento en los índices de abundancia denota un deterioro en los cuerpos de agua, e inciden directamente en el detrimento de macrófitas, así como de invertebrados y peces.
Macrófitas	X	X		La disminución en los índices de abundancia y diversidad denotan un deterioro en los cuerpos de agua; pueden ser empleados para el estudio de bioacumulación por medio de bromatologías.

Invertebrados		X	X	La disminución en los índices de abundancia y diversidad denotan un deterioro en los cuerpos de agua; pueden ser empleados para el estudio de toxicología asociado a cargas de contaminantes específicos.
Anfibios	X	X	X	La disminución en los índices de abundancia y diversidad o la ausencia de estos grupos denotan un deterioro en los cuerpos de agua, pueden ser empleados para el estudio de toxicología asociado a cargas de contaminantes específicos
Peces	X	X	X	La disminución en los índices de abundancia y diversidad o la ausencia de estos grupos denotan un deterioro en los cuerpos de agua, pueden ser empleados para el estudio de toxicología asociado bioacumulación y biomagnificación de contaminantes.
Aves	X	X	X	La disminución en los índices de abundancia y diversidad, la ausencia o presencia de estos grupos denotan un deterioro en los cuerpos de agua, pueden ser empleados para el estudio de toxicología asociado bioacumulación y biomagnificación de contaminantes.

De acuerdo con las condiciones de calidad de agua descritas en este documento sobre el Lago Tláhuac-Xico el establecimiento de indicadores biológicos deberá estar dirigidos a la evaluación de mejoramiento de la calidad del agua a partir de la implementación de las medidas de mitigación de contaminantes. Para el establecimiento de dichos indicadores se proponen a priori los siguientes parámetros expuestos (Tabla siguiente).

Tabla 133. Bioindicadores propuestos para el seguimiento de la calidad de agua posterior a la implementación de las estrategias de restauración del Lago Tláhuac-Xico.

Grupo	Unidades	Frecuencia de evaluación	Parámetro a evaluar	Tendencia deseable	Respuestas de bioindicador
Fitoplancton	Células /m^3	2 veces por temporada estacional	Índices de Shannon-Weaver, Simpson y Margalef, Abundancia relativa por grupo funcional	Disminución de la abundancia, aumento de la diversidad	Disminución de la abundancia por mitigación de ortofosfatos y materia nitrogenada que ingresa al sistema (una vez tratado el caudal por los HA) al cuerpo de agua de la zona II
Zooplancton	Individuos / 10 m^2	2 veces por temporada estacional	Índices de Shannon-Weaver, Simpson. Abundancia relativa por grupo funcional	Aumento de la abundancia, aumento de la diversidad	Aumento de la abundancia y diversidad por mitigación de la abundancia del fitoplancton
Macroinvertebrados acuáticos	Individuos / 10 m^2	2 veces por temporada estacional	Índices de Shannon-Weaver, Simpson. Abundancia relativa por grupo funcional	Aumento de la abundancia, aumento de la diversidad	Aumento de la abundancia y diversidad por mitigación de la abundancia del fitoplancton y aumento del zooplancton, mayor concentración de O.D. en la columna de agua.
Macrófitas	Individuos / m^2	2 veces por año (Lluvias – estiaje)	Abundancia relativa por grupo funcional y cobertura.	Aumento de la abundancia, aumento de la diversidad	Aumento en la abundancia y diversidad de vegetación hidrófita, metabolización a biomasa de nutrimentos en el agua generados por el propio ecosistema, transferencia de materia y energía a través de la cadena trófica.

Peces	Unidades por lance	2 veces por año (Lluvias – estiaje)	Abundancia relativa por grupo funcional	Presencia y aumento de la abundancia y diversidad	Establecimiento de comunidades de peces indicadoras baja concentración de contaminantes y materia carbonosa, concentraciones de O.D en la columna de agua necesarias para sustentar las poblaciones.
Aves	Conteos por avistamiento	2 veces por temporada estacional	Abundancia relativa por grupo	Aumento de la abundancia, aumento de la diversidad	Mejoramiento del hábitat para las aves, aumento de las poblaciones establecidas en el sitio y llegada de aves cuyos requerimientos de establecimientos están asociadas a una mejor calidad de agua.

4.7.4 Características de los bioindicadores de agua

Las sustancias tóxicas disueltas en el agua afectan diferencialmente a los organismos que habitan en ella, por eso pueden ser considerados monitores o centinelas. En algunos organismos las sustancias tóxicas afectan el sistema respiratorio; o bien acumular metales pesados en los tejidos. Dentro de los grupos encontrados en los muestreos del área los chironomidos (Orden Diptera) son tolerantes a la contaminación orgánica e inorgánica como metales pesados, y los hirudineos (Orden Rhynchobdellida) son tolerantes a una alta concentración de materia orgánica. En contraste, otros grupos indican ambientes no contaminados a moderadamente contaminados como los anisópteros (Orden Odonata), chrysopteros (orden Neuroptera), y belostomatidos (Orden Hemíptera) ya que éstos son poco tolerantes o intolerantes a espacios contaminados con materia orgánica.

El grupo de los gasterópodos es un excelente bioindicador; sus hábitos bentónicos, potencial biótico, tolerancia a diferentes grados de los contaminantes y la permanencia de éstos en el ambiente; hacen que, al exponerse a una fuente de contaminación constantes, sean desplazados por otra especie más tolerante. Pero si la calidad mejora estas especies pueden recolonizar ese espacio. Los gasterópodos encontrados son indicadores de ambientes moderadamente contaminados.

En cuerpos de agua dulce, los ensambles ecológicos de los invertebrados acuáticos con el tipo de vegetación y calidad de agua permiten reconocer la calidad del ecosistema. La facilidad de monitoreo y el bajo costo económico y la baja invasión de las técnicas de muestreo e identificación permitieron su aplicación en el proyecto de monitoreo de la calidad del Lago Tláhuac- Xico.

El Lago Tláhuac-Xico presenta una distribución heterogénea de la calidad de agua y de la vegetación, las cuales pueden correlacionarse con una distribución diferencial de invertebrados (Figura 181).

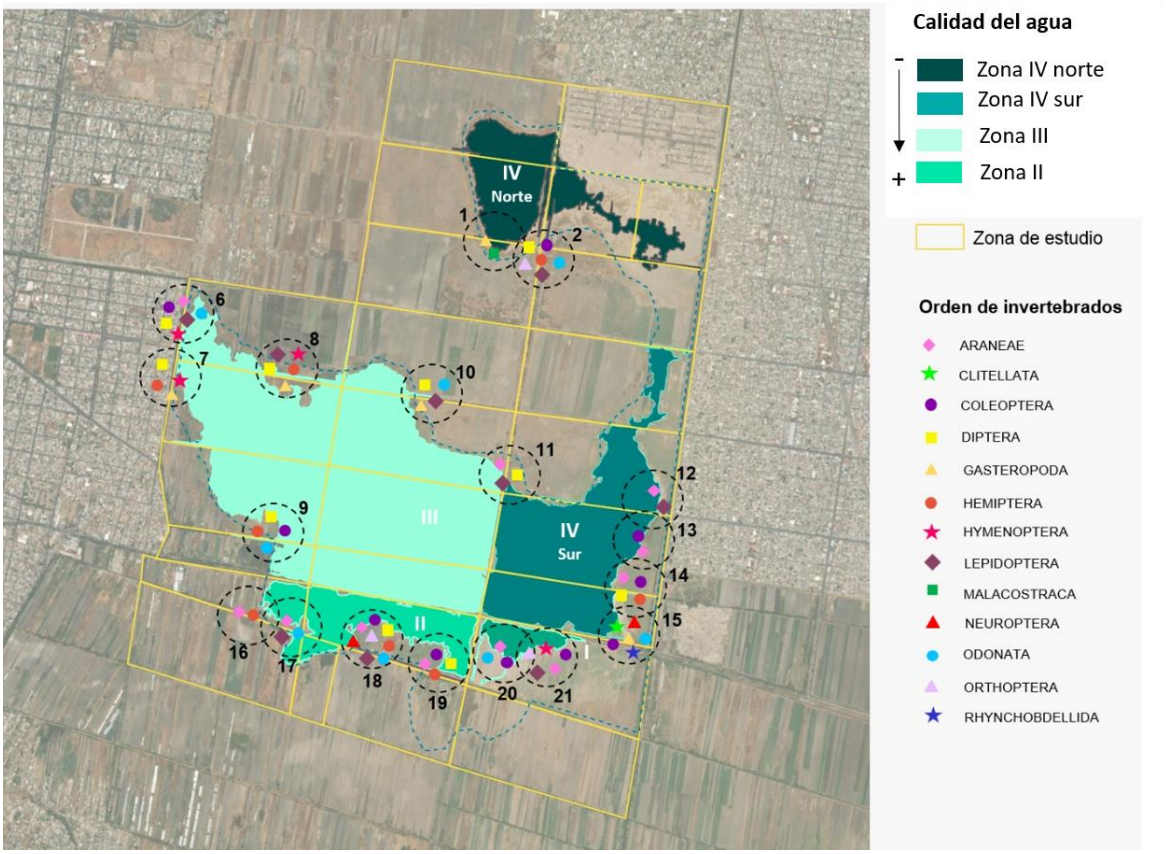


Figura 181. Distribución de órdenes de invertebrados de acuerdo con la calidad de agua en el Lago Tláhuac – Xico.

Los sitios con mayor abundancia de *Schenoplectus* presentaron el mayor número de invertebrados filtrados como chironomidos (Orden Diptera), estos organismos son tolerantes a la contaminación orgánica e inorgánica como metales pesados. Estos organismos se encuentran en sitios con la menor calidad de agua. En contraste, con mayor presencia de *Hydrocotile* presentan el segundo lugar en abundancia de invertebrados acuáticos como el escarabajo depredador *Dytiscus marginalis*, escarabajo acuático, cuya presencia es indicador de una estructura trófica más compleja que la encontrada en los sitios con abundancia de *Schenoplectus* (Figura 182).

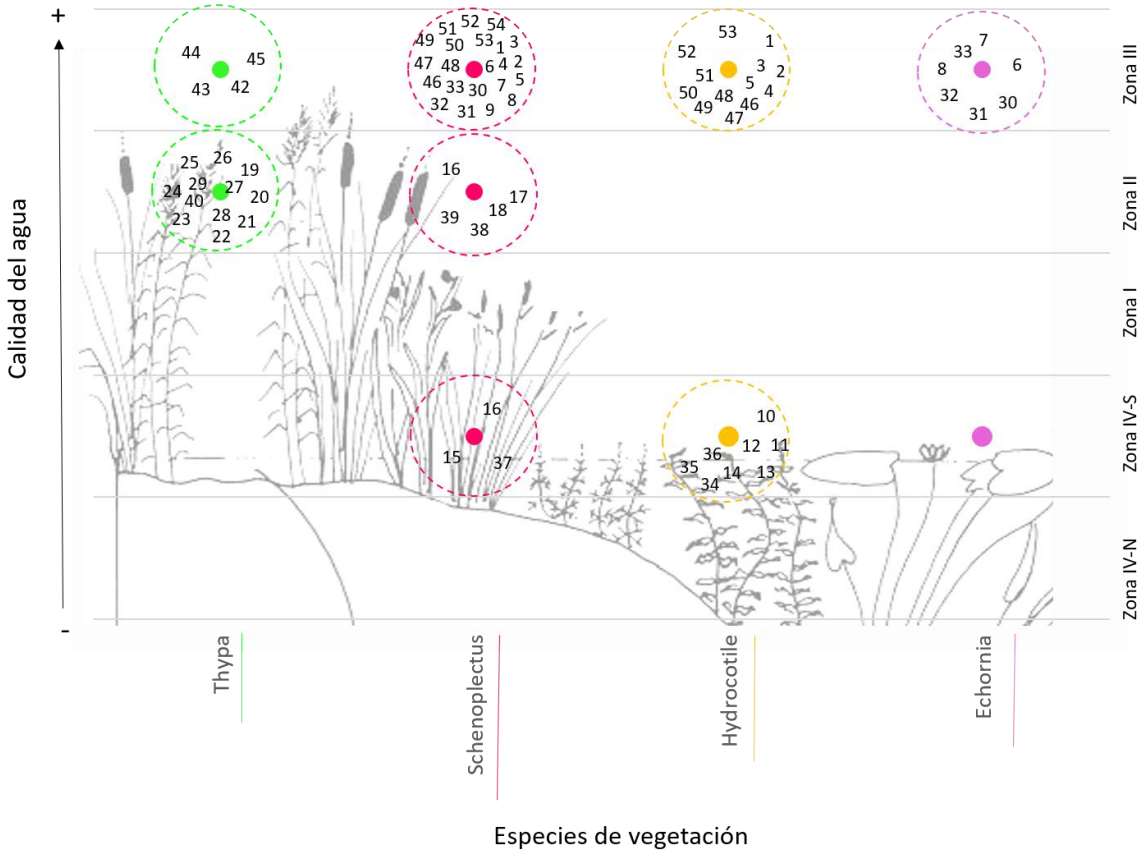


Figura 182. Especies distribuidas por tipo de vegetación y calidad de agua en el Lago Tláhuac – Xico. La correlación del ID con del género y especie de invertebrados se puede visualizar en el Anexo XXIII.

Los organismos como indicadores biológicos de la calidad de agua para el Lago de Tláhuac—Xico se dividen en aquellos que se encuentran en ambientes: A) Moderadamente contaminados (*Stagnicola attenuata, Gundlachia sp.*; *Planorbella tenue*); B) Tolerantes a químicos y metales pesados (*Tanypus sp., Chironomus sp., Chrysoperla carnea*); C) Tolerantes a materia orgánica (*Eristalis sp., Dixella sp.*); D) Poco tolerantes (*Dytiscus marginalis, Chrysoperla carnea, Pantala flavescens*) y E) Facultativos (*Limnogeton sp., Ischnura sp, Sympetrum corruptum, Rhionaeschna multicolor*) (Anexo XXIV).

Los organismos facultativos pueden encontrarse en ambientes de buena a media calidad de agua, por sus hábitos alimenticios indican sitios de transición en la calidad del agua. Estos organismos son depredadores y necesitan una estructura compleja, ya que presentan fuertes requerimientos alimenticios. La complejidad de esta estructura es un buen indicador de la calidad de agua (Tabla 134).

Tabla 134. Registro de especies acuáticas depredadoras, registradas en el Lago de Tláhuac-Xico (enero—febrero 2022).

Orden	Familia	Especie
HEMIPTERA	Belostomatidae	*Limnogeton sp.*
ODONATA	Coenagrionidae	*Ischnura sp.*
	Libelluidae	*Pantala flavescens*
	Libelluidae	*Sympetrum corruptum*

	Aeshnidae	*Rhionaeschna multicolor*
COLEOPTERA	Noteridae	*Hydrocanthus sp*
	Dystiscidae	*Dytiscus marginalis*
NEUROPTERA	Chrysopidae	*Chrysoperla carnea*

Otro factor importante para el mantenimiento de la estructura del Lago es la estructura vegetal a la orilla, la cual delimita y evita la pérdida de suelo. En estas áreas se establen interacciones ecológicas importantes entre plantas e invertebrados como la herbívora, polinización, degradación y depredación; que indican la calidad de este ecosistema las poblaciones. Los órdenes de Lepidoptera, Hymenoptera, Orthoptera y Aracnae, son buenos indicadores biológicos sobre la estructura vegetal alrededor del cuerpo de agua.

En los bordes internos la presencia de vegetación como el tule (*Schoenoplectus americanus*), además de retener suelo, filtrar y generar espacio de resguardo y alimentación para varias especies, también puede inhibir el aumento en el tamaño poblacional de algunos insectos como los dípteros o bien otras plantas que afectan al ecosistema como el lirio acuático (*Pontederia crassipes*).

4.7.5 Proyecciones

La propuesta de restauración vegetal sobre la especie Hydrocotile posiblemente favorezca el establecimiento de una estructura de interacciones biológicas con mayores requerimientos nutricionales. Esto es, se registre disminución en el tamaño poblacional de filtradores como las larvas cola de ratón (Familia: Syrphidae) y moscos (Familia: Chironomidae) y aumente de escarabajos buceador (Familia: Dystiscidae), chinches depredadoras (Familia: Belostomatidae) y libélulas (Anisoptera) y caballitos del diablo (Familia: Libelluidae, Sympetrum, Aeshnidae).

La restauración vegetal con la especie Hydrocotile posiblemente favorezca el establecimiento de una estructura de interacciones biológicas con mayores requerimientos nutricionales. Esto es, se registre disminución en el tamaño poblacional de filtradores como las larvas cola de ratón (Familia: Syrphidae) y moscos (Familia: Chironomidae) y aumente de escarabajos buceador (Familia: Dystiscidae), chinches depredadoras (Familia: Belostomatidae) y libélulas (Anisoptera) y caballitos del diablo (Familia: Libelluidae, Sympetrum, Aeshnidae).

4.7.6 Corredores hidro-culturales

Se ha conceptualizado el desarrollo de parques lineales, que se constituyan como corredores hidro-culturales en torno a la infraestructura hidráulica existente en la zona, como una alternativa para la dotación de espacios para el fomento de la convivencia y la apropiación social de este espacio, a través de un equipamiento que incluya la instalación de infraestructura recreativa y contemplativa del paisaje local.

Se tiene previsto que el mobiliario recreativo, deportivo y lúdico sea acorde a la relevancia cultural e histórica que prevalece en la zona, así como la integración de diseños urbanísticos e intervenciones paisajísticas mimetizadas con el ecosistema local, creando un entorno de protección y contemplación para la biodiversidad regional.

Estas propuestas de infraestructura verde, habrán de constituirse como corredores hidro-culturales, los cuales incrementarán la oferta de espacio público el cual es escaso en la región.

Las intervenciones en infraestructura verde que se proponen comprenden los transectos de:

1. Corredor Calzada de los Pozos – Rafael Castillo
2. Parque Lineal Avenida Acapol
3. Parque Fluvial Río Ameca - Avenida Acueducto
4. Parque Lineal Centro – Embarcadero - Avenida Juan Palomo



Figura 183. Propuesta integral del Proyecto Parques lineales.

4.7.7 Reconocimientos, decretos, nombramientos y declaratorias

Los pueblos originarios de Tláhuac son depositarios de un patrimonio natural y cultural invaluable, que incluye vestigios arqueológicos, zonas chinamperas, bosques, humedales y otros sistemas acuáticos como el Lago Tláhuac-Xico. Cabe mencionar que estos pueblos y sus zonas chinamperas y lacustres, son parte de la Zona de Monumentos Históricos decretada desde 1986, y asimismo, es una Zona Patrimonio de la Humanidad desde 1987 por la UNESCO; también tiene otras distinciones, como ser un sitio AICA (Área de Importancia para la Conservación de las Aves) por la CONABIO, y también reconocidos en sus zonas chinamperas como un sitio SIPAM (Sistema Importante del Patrimonio Agrícola Mundial) según la FAO.

Si bien existe una oferta turística en la región, las limitantes de conectividad, infraestructura básica y la insuficiente planeación para articular los distintos elementos, reducen la posibilidad de brindar una verdadera propuesta turística integral para la región, como, por ejemplo, el desarrollo del Turismo de Naturaleza, que abarca el Turismo Rural, el

Turismo de Aventura y el Ecoturismo, como opciones viables de desarrollo económico sustentable.

La zona de “tablas” o parcelas con suelos de origen lacustre que corresponden al Estado de México, aunque en su mayoría pertenezcan a los ejidos de Tláhuac, cuentan con un decreto por parte del gobierno estatal como Área Natural Protegida Santuario del Agua “Lagunas de Xico”; sin embargo, no cuenta con un plan de manejo y decenas de hectáreas de esta ANP estatal, han sido rellenadas con cascajo.

Finalmente destaca que, desde la CORENADR, se busca ampliar el polígono decretado por la UNESCO como Zona Patrimonio de la Humanidad, hacia otras áreas como son la Sierra de Santa Catarina, el volcán Teuhtli y el Parque Estatal Santuario del Agua “Lagunas de Xico”. Asimismo, se trabaja para declarar como Humedal de Importancia Internacional bajo la Convención Ramsar, al Lago Tláhuac-Xico, sorteando el requisito de tener el cuerpo de agua saneado.



Figura 184. Imagen objetivo sección II Lago Tláhuac-Xico.

4.7.8 Centro Ecoturístico Humedales de Tláhuac

La CORENADR elaboró el Plan Maestro Conceptual “Centro Ecoturístico Humedales de Tláhuac” cuya propuesta es necesario extender a otros ejidos, pero que sienta las bases para el desarrollo ecoturístico de la región. Entre otras cosas, el Plan Maestro propone crear un acceso emblemático al Parque Ecoturístico, conectar los dos cuerpos de agua por medio de un puente diseñado para ser un referente urbano y que ayude a fortalecer la identidad del ejido de San Pedro Tláhuac.

El acceso actual al ejido de San Pedro Tláhuac es modesto, no cuenta con una señalización clara ni con bahía de ascenso y descenso. Tampoco está habilitado para recibir visitantes en su condición actual.



Figura 185. Acceso emblemático con puente que conecta las zonas II y III del Lago Tláhuac-Xico.

El Plan Maestro también sugiere una serie de servicios básicos, comerciales, productivos y de investigación, además de senderos, miradores, el arco puente de bienvenida, estacionamiento y vestíbulo.

Actualmente la única zona destinada a las actividades turísticas, es la llamada “tabla mocha”, zona destinada por el ejido para actividades recreativas. Este espacio cuenta con tres cabañas de adobe sin uso actual y en malas condiciones, tres bancas ubicadas estratégicamente como miradores y se ubica en la zona II del Lago Tláhuac–Xico. Destaca que el acceso es por la entrada donde se ubica el Rebombeo El Tequesquite, y que el acceso a visitantes se encuentra sin mobiliario adecuado o banquetas, y está ocupado por el paradero de camiones Tláhuac.



Figura 186. Plan maestro conceptual “Centro ecoturístico Humedales de Tláhuac”.

4.8 Sistema Hidroagrícola

4.8.1 Centro Ecoturístico Humedales de Tláhuac

En el año 2005, los ejidatarios de San Andrés Mixquic, San Juan Ixtayopan, San Pedro Tláhuac, y Santiago Tulyehualco se organizaron, para gestionar y reclamar su derecho al agua, integrándose en una asociación civil que solicitó la creación de un distrito de riego con agua residual tratada para uso en las zonas agrícolas de los cuatro núcleos ejidales. Para ello, diseñaron un Plan Rector que les permitiera gestionar el financiamiento para mejorar la infraestructura de riego existente, la cual abastecía de manera deficiente a los ejidos referidos y parte de la zona chinampera de San Andrés Mixquic.

El principal abastecimiento del agua residual tratada para la zona de riego señalada, proviene de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Cerro de la Estrella, que produce un caudal a nivel terciario de aproximadamente 2,200 L/s y que se conduce a la zona agrícola de las alcaldías de Tláhuac y Xochimilco, mediante un acueducto de 72” de diámetro.

En la zona agrícola de Tláhuac, actualmente se dispone de cinco estaciones de rebombeo del agua tratada:

- Paso del Toro: cuenta con seis equipos de bombeo sumergibles de 50 HP y tres redes principales de distribución del agua tratada en los ejidos de San Pedro Tláhuac, Tulyehualco y Mixquic, así como a las zonas chinamperas de San Andrés Mixquic y Tetelco. Esta estación de bombeo se encuentra en óptimas condiciones de operación, adicionalmente se cuentan con tres equipos de bombeo de 50 HP de reserva, listos para ser usados ante cualquier emergencia que se presente en las instalaciones sin afectar a la operación del rebombeo y a la zona agrícola.
- El Tequesquite: cuenta con ocho equipos de bombeo con capacidades de 75 HP y dos tuberías principales que distribuyen el agua tratada a los ejidos de San Pedro Tláhuac, Tulyehualco y San Juan Ixtayopan. Actualmente el rebombeo funciona sin ninguna anomalía, además se tienen tres equipos de bombeo de 75 HP de reserva con el objetivo de no suspender el suministro de agua tratada a la zona agrícola en caso de falla de alguno de los instalados.
- San José (Tabla 12-3): cuenta con una bomba horizontal con motor eléctrico de 25 HP y una tubería principal para abastecer al ejido de San Pedro Tláhuac en las Tablas 12-3 y 12-2. Esta instalación se encuentra en óptimas condiciones.
- Revolución: cuenta con tres equipos de bombeo; dos de 50 HP y uno de 30 HP, para abastecer a la zona chinampera de San Pedro Tláhuac. Actualmente las instalaciones se encuentran en muy malas condiciones:
- De los tres equipos de bombeo solo operan dos de manera alternada, y la eficiencia de operación es de regular a mala.
    - Bardas cuarteadas.
    - Los tableros de control se encuentran a la intemperie.
    - Subestación eléctrica con menor capacidad al necesario.
- Ciénega: en el año 2021 se integró al Sistema Hidroagrícola esta nueva estación de rebombeo que opera con el excedente de agua proveniente de Canal de Chalco para el riego de las parcelas de la Ciénega de Tláhuac. Éste cuenta con dos bombas

horizontales accionados a un motor de 60 HP. La instalación es relativamente nueva y opera con un equipo y otro más de respaldo en caso de emergencia.

Adicionalmente al abastecimiento de agua residual tratada de la PTAR Cerro de la Estrella, se dispone del volumen de las plantas de tratamiento locales en Tetelco, Mixquic, El Llano y la Lupita, así como del suministro de agua para riego de los Pozos Tecómitl 3 y Tecómitl 19, estos últimos abastecen al Llano de San Antonio Tecómitl y zona chinampera de Tetelco, respectivamente.

4.8.2 Problemática

El acceso al agua de buena calidad para su utilización en el riego de las parcelas con producción agrícola en la zona de Tláhuac, implica el suministro permanente de agua residual tratada, así como el adecuado funcionamiento de la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella, que es la principal fuente de abastecimiento; las condiciones óptimas para la operación de las estaciones de rebombeo de agua residual tratada y de las redes de conducción y distribución del agua de riego.

El principal problema de la zona de riego radica en la contaminación del agua tratada de los canales con agua residual o aguas combinadas provenientes de los escurrimientos del Río Ameca o por descargas de colectores locales. Son aguas negras que, debido a la necesidad de los productores de la región, las extraen directamente del drenaje y las emplean para el riego de sus cultivos, sobre todo en la época de estiaje.
Los puntos críticos que se identifican en la zona son:

1. Contaminación de las aguas de Río Amecameca generada por descargas domésticas e industriales provenientes de diferentes fuentes de contaminación en el Estado de México.
2. Inundaciones en parcelas agrícolas. En tiempo de lluvias, debido a la acumulación de sedimentos y a los excedentes de agua combinada provenientes del Río Amecameca, el Canal General se desborda afectando directamente las parcelas agrícolas que se encuentra a sus costados.
3. El déficit de agua tratada, obliga a los productores a regar con aguas residuales en los Llanos de Tecómitl (colector Barranca Seca), Mixquic (colector Ameca) y en la tabla 1-1 del Ejido Mixquic, Barrio Santa Cruz.



Figura 187. Riego con aguas residuales, Paraje El Llano de Tecómitl (colector Barranca Seca).



Figura 188. Riego con aguas residuales, Paraje El Llano de Mixquic (colector Ameca).

1. Sitios de contaminación de agua tratada con aguas residuales:

- Los colectores colapsados en las calles Felipe Ángeles y Vado, en el Barrio de San Agustín, Mixquic, propician que el agua residual se vierta hacia los canales de agua tratada. Adicionalmente, existen descargas domiciliarias directas al canal.
- Los colectores colapsados en calle Abasolo, en el Barrio de San Miguel Mixquic, propician que el agua residual se vierta hacia los canales. Adicionalmente existen descargas domiciliarias directas al canal.
- Derivado de la posible fractura en el sistema de drenaje del colector Tetelco Mixquic, se ha formado un área inundada de alrededor de cuatro hectáreas en el paraje La Habana.
- Debido al desbordamiento de los canales en el ejido de Tulyehualco por el exceso de aguas que provienen de la Planta de Bombeo de La Lupita ubicada en San Juan Ixtayopan, se inundan terrenos de cultivo en la colindancia con el ejido de San Pedro Tláhuac.



Figura 189. Contaminación de los canales en los parajes de San Agustín y San Miguel, Mixquic.



Figura 190. Zona inundada en paraje La Habana, Mixquic.



Figura 191. Zona inundada en el Ejido de Tulyehualco, en la colindancia con el ejido de Tláhuac.

1. Inundación de parcelas en el paraje Axolocalco con agua tratada por falta de válvulas de seccionamiento.

4.8.3 Zona de riego actual, superficie y volumen requerido

El sistema hidroagrícola se integra por las fuentes de abastecimiento, ya sean Plantas de Tratamiento de Agua Residual, Estaciones de Rebombeo y/o pozos destinados para el riego agrícola, líneas de conducción, líneas de distribución a secciones, áreas de riego y/o tablas, hasta llegar a nivel parcela, en donde el agua se entrega a las personas usuarias a través de hidrantes. La operación del sistema se vuelve muy complejo principalmente por la escasa disponibilidad de agua residual tratada, lo que ha propiciado el tandeo en la distribución de agua de riego, alternando el funcionamiento de las estaciones de rebombeo y estableciendo diferentes horarios de operación, dependiendo de la superficie cultivada y las necesidades de riego. Para mejorar la eficiencia en el funcionamiento del sistema, adquiere gran importancia la organización de los usuarios del agua, su involucramiento en el conocimiento de la operación y su funcionamiento.

Por lo anterior, la CORENADR ha destinado los recursos necesarios para sustituir los equipos de bombeo que presentaban fallas o se encontraban fuera de operación; también ha realizado el esfuerzo por brindar el mantenimiento correctivo adecuado a los equipos instalados en las diferentes estaciones de rebombeo, así como el mantenimiento periódico a los sistemas electromecánicos a fin de tener en buenas condiciones las estaciones de rebombeo para abastecer del agua de riego a los diferentes núcleos agrarios. Adicionalmente ha realizado la sustitución de tramos de redes de conducción y/o distribución, así como la ampliación de tramos de tubería para hacer llegar el agua de riego a los sitios más retirados. En el 2021 realizó la habilitación de dos estaciones de rebombeo nuevas, una en Canal de Chalco para abastecer de agua de riego a la pequeña propiedad de San Pedro Tláhuac, en la Ciénega y otra en la Tabla 12-3 del ejido de San Pedro Tláhuac, para riego en las tablas 12-3 y 12-2 del mismo ejido; ha realizado la sustitución o instalación de válvulas de seccionamiento sobre las redes principales de conducción y distribución para mejorar la operación del sistema. También ha capacitado a una brigada encargada de la operación del sistema y en caso de presentarse fugas a lo largo de las redes, se encargan de la reparación inmediata de los daños, a fin de reanudar el servicio lo más pronto posible.

Las acciones previamente enunciadas tienen la finalidad de brindar un mejor servicio en al abastecimiento de agua para riego agrícola.

En lo que respecta al programa Altépetl Bienestar, entre los años de 2019 a 2022, la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural ha incorporado al riego aproximadamente 5 mil productores que laboran una superficie de 2,077 hectáreas de uso agrícola, en las alcaldías de Tláhuac y Milpa Alta.

Tabla 135. Acciones realizadas con el Programa Altépetl Bienestar de 2019-2020 al sistema hidroagrícola.

Año	Acciones	Actividades Realizadas	Ha Beneficiadas	Ha Beneficiadas Acumulables
2018	Superficie existente en 2018			958
2019	Rehabilitación de los módulos de rebombeo Paso del Toro y el Tequesquite.	• Mantenimiento correctivo a 14 equipos de bombeo (6 de 50 HP en Paso del Toro y 8 de 75 HP en El Tequesquite). • Mantenimiento preventivo a 14 arrancadores 6 de 50 HP en Paso del Toro y 8 de 75 HP en el Tequesquite)	390	1348
	Rehabilitación de las cajas de válvulas de la línea de conducción de 24" de diámetro del sistema de rebombeo "Paso del Toro" para abastecer de agua a la zona chinampera de Mixquic	• Mantenimiento de 11 cajas de válvulas de la línea principal de 24" de diámetro del rebombeo Paso del Toro. • Colocación una válvula de seccionamiento de 24" al final de la línea	149	1497
2020	Ampliación de la línea de riego del Sistema Hidroagrícola a la zona chinampera de San Nicolás Tetelco, Tláhuac, Ciudad de México.	• Sustitución de 550 metros de tubería de polietileno de alta densidad de 6" a 12", • Ampliación de 750 metros de tubería de 4" de diámetro hacia la zona chinampera de San Nicolas Tetelco. • Habilitaron 5 descargas de agua tratada para mantener los niveles del Lago	95	1592
	Construcción de un módulo de rebombeo para abastecimiento de agua en las tablas 12-1, 12-2 y 12-3 del Ejido de Tláhuac	• Se habilitó un rebombeo auxiliar con una bomba horizontal accionada por un motor eléctrico de 25 HP	100	1692
	Rehabilitación, Modernización, Tecnificación, y Equipamiento de Unidades de Riego (Gobierno de la CDMX-CONAGUA)	• Sustitución de 550 metros de la línea de conducción de 24" de diámetro del rebombeo Paso del Toro en Polietileno de Alta Densidad RD 17. • Ampliación de una línea de distribución de 8" de diámetro en un tramo de 500 metros de tubería hidráulica métrica PVC clase 7, con 10 hidrantes de 4". • Colocación de una válvula de seccionamiento de 20" de diámetro en la línea principal del rebombeo El Tequesquite.	170	1862

	Mantenimiento y equipamiento del sistema hidroagrícola de los ejidos del sur oriente de la Ciudad de México.	Se adquirieron los siguientes equipos: • 3 equipos de bombeo (bomba y motor) de 50 HP para el Rebombeo Paso del Toro • 3 equipos de bombeo (bomba y motor) de 75 HP para el Rebombeo El Tequesquite • Adquisición de equipos para estudio LIDAR y batimetría.	Complemento de las actividades de los años anteriores.	1862
2021	Rehabilitación de infraestructura y conservación de la zona productiva de San Antonio Tecómitl, Milpa Alta.	• La línea de conducción de 12" de diámetro del Pozo Tecómitl 3 al paraje El Llano. • Reposición de la base hidráulica del boulevard José López Portillo, que será afectado por el paso de la tubería. • Reparación y rehabilitación de hidrantes existentes en la zona de riego.	100	1962
	Tecnificación de la zona agrícola de la Ciénega de San Pedro Tláhuac con infraestructura de riego y equipamiento del rebombeo Revolución	• Colocación de un nuevo vertedor para el canal de Chalco • Habilitación de una caseta de protección • Rehabilitación de cárcamo y equipamiento de 2 bombas horizontales con motor eléctrico de 60 HP • Tecnificación de un Sistema de riego que incluye tubería principal, tubería de distribución e hidrantes.	100	2062
	Sustitución de línea de agua residual de la planta de rebombeo de aguas combinadas de San Nicolas Tetelco a la PTAR Tetelco.	• Sustitución de 1500 metros de tubería principal de 8" de agua residual del rebombeo de aguas combinadas Tetelco. • Mantenimiento correctivo a equipos de bombeo en el rebombeo de aguas combinadas Tetelco.	15	2077
	Mantenimiento preventivo a la infraestructura de los módulos de rebombeo Paso del Toro y El Tequesquite.	• Monitoreo de la red hidroagrícola con Tecnología LIDAR incluye: la adquisición de un equipo LIDAR. Mantenimiento correctivo de las instalaciones del módulo de rebombeo Paso del Toro; incluye: • Mantenimiento correctivo de dos bombas sumergibles de 50 HP • Mantenimiento correctivo a seis arrancadores de 50 HP	Complemento de las actividades de los años anteriores.	2077

		• Mantenimiento preventivo de grúa viajera de 1 Ton. Mantenimiento correctivo de las instalaciones del módulo de rebombeo El Tequesquite; incluye: • Mantenimiento correctivo de dos bombas sumergibles de 75 HP • Mantenimiento correctivo a ocho arrancadores de 75 HP • Mantenimiento preventivo de grúa viajera de 1 Ton.		
2022	Mantenimiento preventivo y correctivo a la infraestructura de los módulos de rebombeo Paso del Toro y El Tequesquite.	• Mantenimiento preventivo y correctivo de equipos de bombeos de 50 HP y 75 HP.	Complemento de las actividades de los años anteriores.	2077

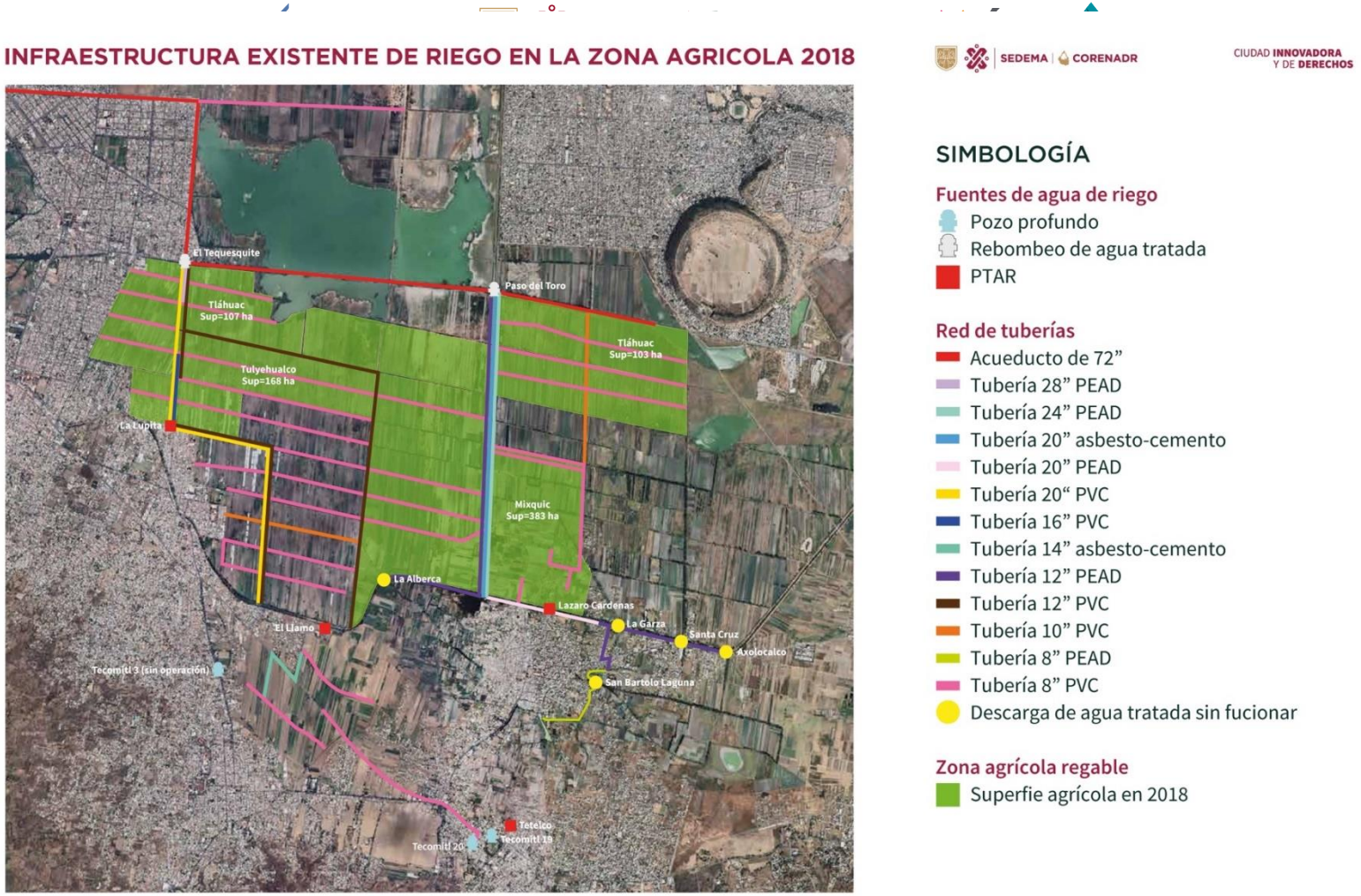


Figura 192. Infraestructura de riego existente en 2018

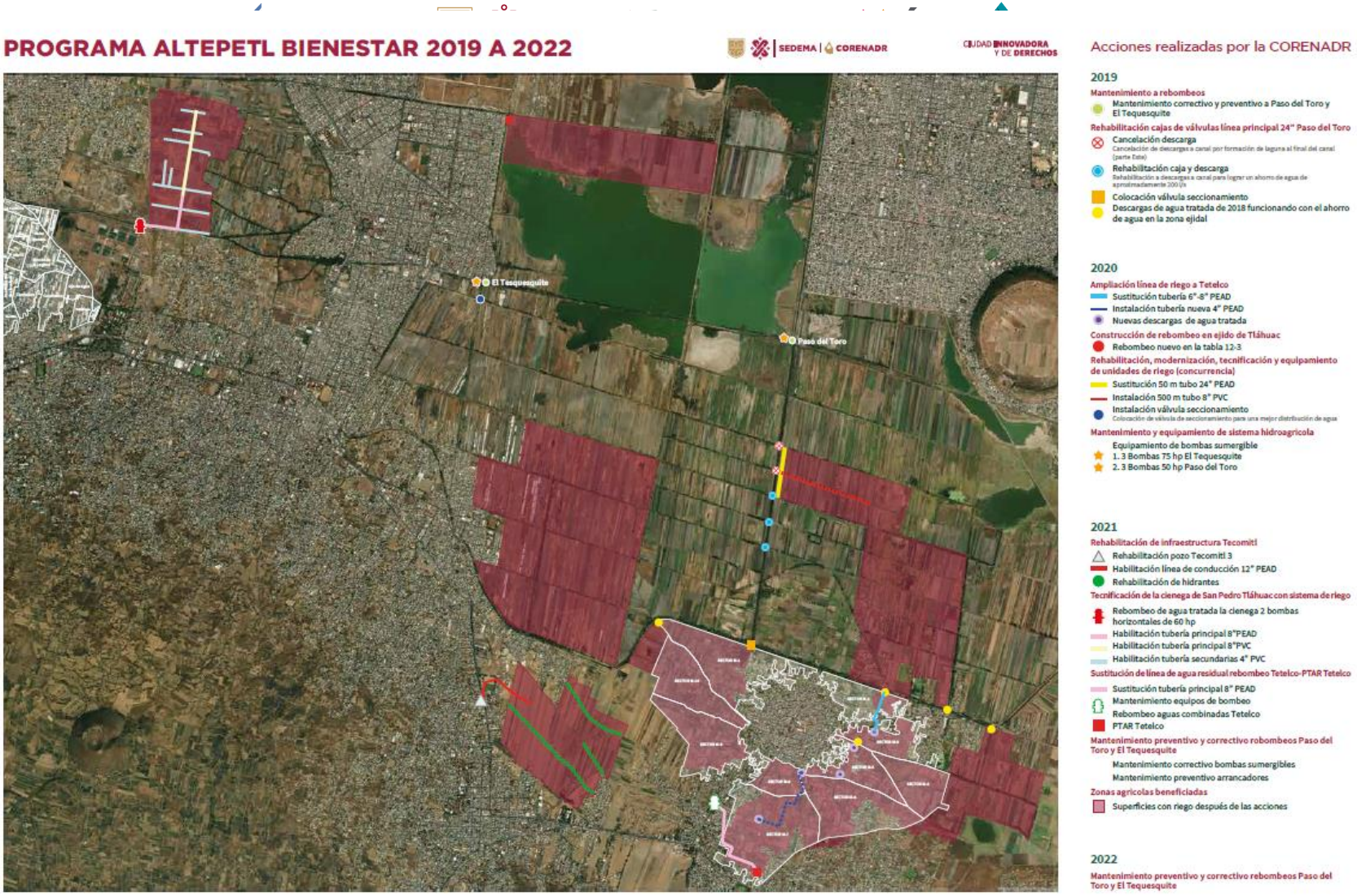


Figura 193. Acciones realizadas por la CORENADR en la zona agrícola de 2019 a 2022.

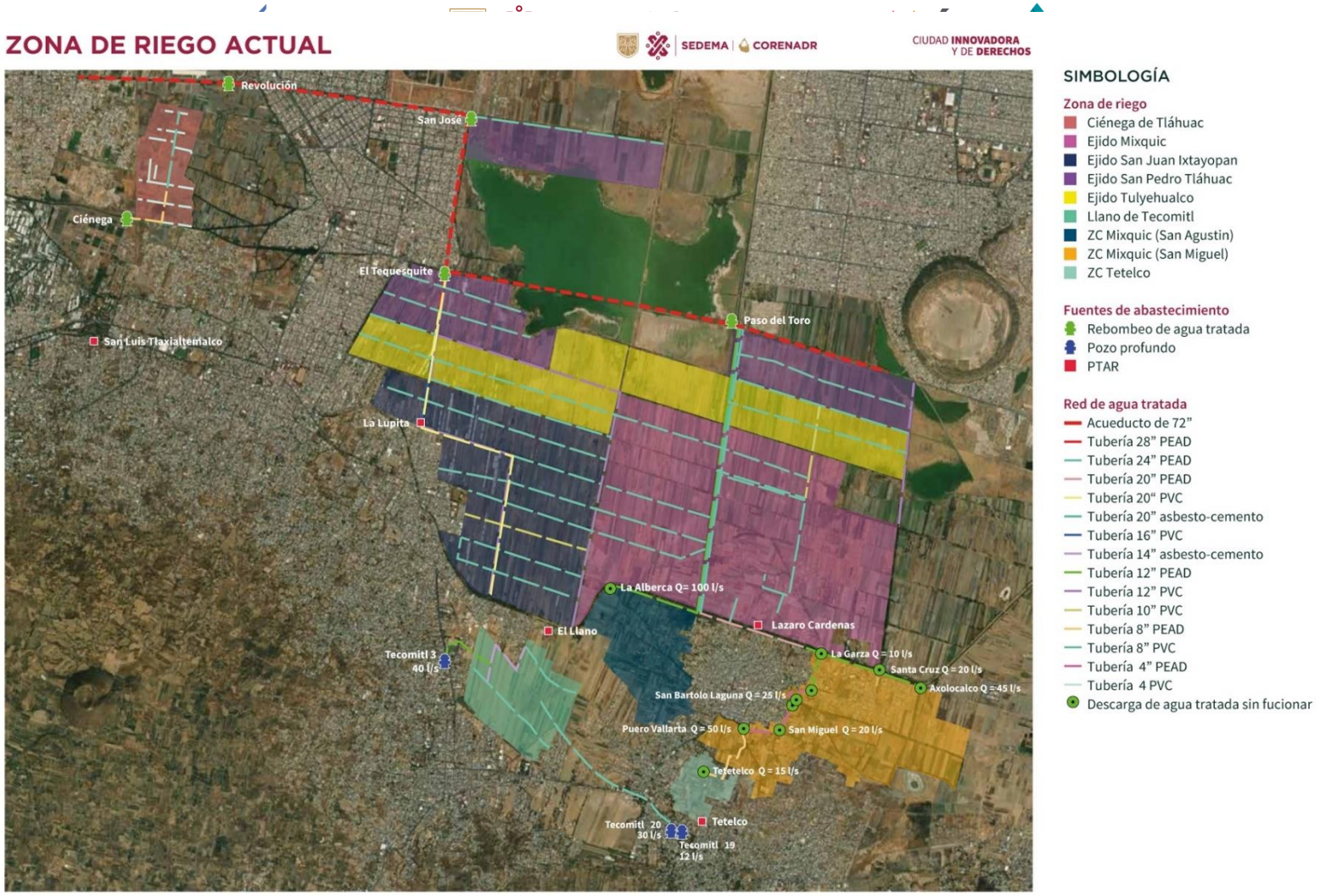


Figura 194. Zona de Riego actual.

Adicionalmente, para impulsar la producción agropecuaria, se han otorgado 4,654 apoyos en los ejidos de San Pedro Tláhuac, Tulyehualco, San Juan Ixtayopan, Mixquic y las zonas chinamperas de Mixquic y Tetelco, el Llano de Tecómitl y la Ciénega de San Pedro Tláhuac.



Figura 195. Unidades productivas apoyadas por el programa Altepetl.

Actualmente la zona con potencial para riego de los ejidos señalados y las zonas de chinampería abarca una superficie de 2,077 hectáreas, para las que se requiere un volumen de 2,077 L/s, conforme a la siguiente tabla:

Tabla 136. Caudal necesario para la zona de riego.

Caudal necesario por cada zona de riego		
Zona de riego	**Superficie Total (ha)**	**Caudal (L/s)**
Ejido Tláhuac	307	307
Ejido Tulyehualco	316	316
Ejido Mixquic	578	578
Ejido San Juan Ixtayopan	342	342
Chinampería de San Andrés Mixquic	304	304
Chinampería de San Nicolás Tetelco	30	30
Llano de Tecómitl	100	100
Ciénega de San Pedro Tláhuac	100	100
Total	**2077**	**2077**

Nota: El caudal se calculó considerando 1 L/s/ha en riego por gravedad

4.8.4 Operación actual con el caudal disponible

Con el fin de maximizar los beneficios del sistema de riego hidroagrícola en esta zona de la Ciudad de México, se realiza el manejo por tandeo a las distintas áreas de cultivo, mediante el empleo adecuado de las diferentes válvulas y seccionamientos. De esta forma se garantiza que más área y más productores reciben este beneficio.

El tandeo del agua residual tratada se lleva a cabo de la siguiente manera:

Tabla 137. Operación actual con el caudal disponible

Fuente de abastecimiento	**Ejido/paraje**	**Superficie total**	**Horarios de bombeo**		
			6 am a 12 pm	**12pm – 6 pm**	**6 pm -6 am**
		Ha	**Caudal (L/s)**	**Caudal (L/s)**	**Caudal (L/s)**
Rebombeo El Tequesquite	Ejido San Pedro Tláhuac	107	70		
	Ejido Santiago Tulyehualco	168	50		
	Ejido San Juan Ixtayopan	342	80		

Fuente de abastecimiento	Ejido/paraje	Superficie total	Horarios de bombeo		
			6 am a 12 pm	12pm – 6 pm	6 pm -6 am
		Ha	Caudal (L/s)	Caudal (L/s)	Caudal (L/s)
Rebombeo Paso del Toro	Ejido San Pedro Tláhuac	100		40	
	Ejido Santiago Tulyehualco	148		40	
	Ejido Mixquic	553	50	170	
	Paraje San Agustín, zona chinampera San Andrés Mixquic	100	50	50	100
	Paraje LA Garza, Zona chinampera San Andrés Mixquic	4			10
	Santa Cruz (tabla 1-1), San Andrés Mixquic	25			20
	Parajes de Axolocalco y Xila, San Andrés Mixquic	75			45
	Paraje San Bartolo, zona chinampera San Andrés Mixquic	45			40
	San Miguel, San Andrés Mixquic	40			20
	Puerto Vallarta y Ojo de Agua, San Andrés Mixquic	40			50
	Parte baja, zona chinampera de San Nicolás Tetelco	15			15
Rebombeo San José	Ejido Tláhuac (Tablas 12-3 y 12-2)	100	40	40	
TOTAL		**1862**	**340**	**340**	**300**

La red hidroagrícola cuenta con infraestructura que no depende la PTAR Cerro de la Estrella y que se resume en el siguiente cuadro:

Tabla 138 Operación actual de infraestructura hidroagrícola independiente de Cerro de la Estrella.

Operación actual de infraestructura hidroagrícola independiente de Cerro de la Estrella			
Infraestructura	**Paraje**	**Superficie**	**Horarios de bombeo**

		total	**3 veces por semana/ 4 horas de bombeo**	**2 veces por semana/ 2 horas de bombeo**	**12 horas Diarias**	**De 8 am a 3 pm de lunes a viernes**
		Ha	**Caudal (L/s)**	**Caudal (L/s)**	**Caudal (L/s)**	**Caudal (L/s)**
Pozo Tecómitl 3	Llano de Tecómitl	100	40			
Pozo Tecómitl 19	Parte Alta de la zona chinampera de San Nicolás Tetelco	15		12		
PTAR Tetelco					15	
Rebombeo Ciénega		100				60
Total		**215**				

4.8.5 Estrategias del Sistema Hidroagrícola

En el Sistema Hidroagrícola, actualmente se afinan los detalles para involucrar a las personas usuarias en el conocimiento y operación de toda la infraestructura del sistema, planteándose la definición de unidades y/o secciones de riego con los usuarios capacitados y debidamente organizados bajo alguna figura asociativa, llegando hasta la creación de sus reglamentos internos de operación, así como promover la transición hacia sistemas de riego más eficientes, sostenibles y prácticos, considerando el incremento en la demanda de agua tratada para riego, en beneficio de las labores agrícolas de la región.

Asimismo, como parte del proceso de restauración del Lago Tláhuac-Xico, se considera la construcción de dos plantas de tratamiento de agua residual, de las que parte del volumen tratado se destinará para incorporar nueva superficie al sistema hidroagrícola que permita a los productores ampliar sus zonas de riego y mejorar sus rendimientos en la producción, pero que además rescate la vocación primordialmente agrícola de esta región.

4.8.5.1 Incorporación de nuevas áreas al sistema

Con la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Chalco, que entregará 400 L/s para el riego de una superficie de 544 hectáreas, se construirá la infraestructura de riego necesaria en los ejidos de San Francisco Tlaltenco, Ampliación Tlaltenco, Ampliación Tecómitl y Ampliación San Juan. En la siguiente tabla se describe la superficie, por ejido, y el caudal necesario para el riego de las parcelas. Para la determinación del caudal se consideró un 1 L/s/ha, suponiendo que el agua se suministrará a nivel parcela por medio de hidrantes parcelarios.

4.8.5.2 Caudal necesario para la zona de riego

Tabla 139. Caudal para la zona de riego

Caudal necesario por cada unidad de riego		
Unidad de riego nuevo	**Superficie (ha)**	**Caudal (L/s)**
Ejido San Francisco Tlaltenco	246	246
Ejido Ampliación Tlaltenco	92	92
Ejido Ampliación San Juan Ixtayopan	79	79
Ejido Ampliación San Antonio Tecómitl	104	104
Total	**521**	**521**

Nota: El Caudal Se Calculó Considerando 1 L/s/ha en riego por gravedad.

4.8.5.3 Operación con caudal de las PTAR proyectadas

Tabla 140. Operación con el caudal de la PTAR Chalco.

Fuente de abastecimiento	Ejido/Paraje	Superficie Total	Horarios de bombeo		
			6 am	12 pm	6 pm
			12 pm	6 pm	6 am
		ha	Caudal (L/s)	Caudal (L/s)	Caudal (L/s)
PTAR Chalco	Ejido San Francisco Tlaltenco	246	200	200	
	Ejido Ampliación Tlaltenco	92	50	50	
	Ejido Ampliación San Juan Ixtayopan	79	50	50	
	Ejido Ampliación San Antonio Tecómitl	104	100	100	
	Desvío para Rebombeo Paso del Toro				200
	Desvío para El Llano de San Juan y Mixquic				200
	Total	**521**	**400**	**400**	**400**

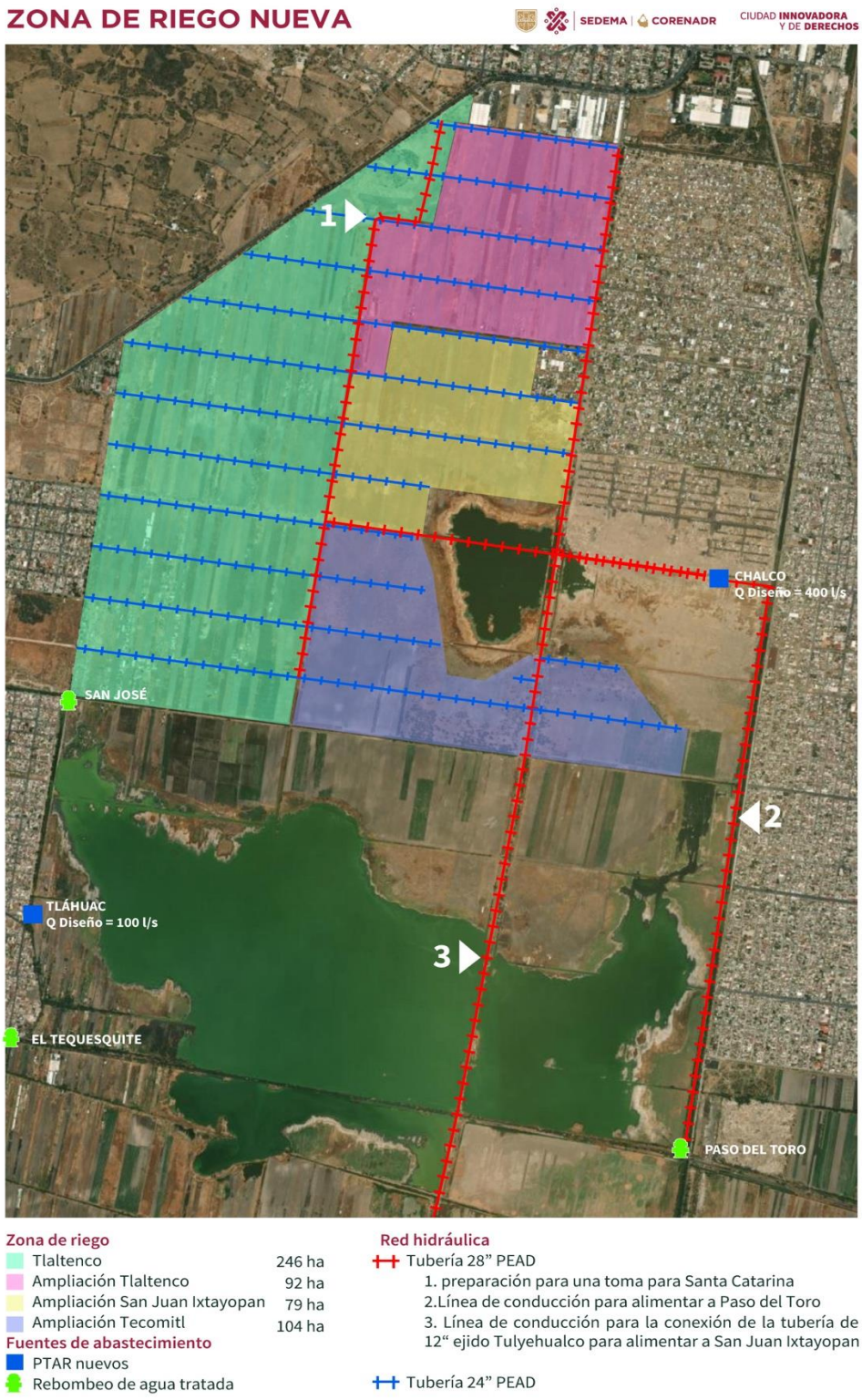


Figura 196. Operación de la nueva zona de riego con agua tratada de la PTAR Chalco.

4.8.5.4 Unidades de riego

Se propone definir como “Unidad de Riego” a la superficie con infraestructura de riego en la zona. Para ello, será necesario hacer un diagnóstico preciso del estado actual de los ejidos y evaluar la conveniencia de cambiar la organización productiva, así como proponer una estrategia para su ejecución.

Unidad de Riego propuesta

Tabla 141. Zona Agrícola que cuenta con infraestructura de riego.

Sección	Superficie (ha)	Fuente de Abastecimiento	No. Productores
Ejido San Andrés Mixquic	578	Rebombeo Paso del Toro	1803
Ejido San Pedro Tláhuac	307	Rebombeo Paso del Toro y El Tequesquite	651
Ejido Tulyehualco	316	Rebombeo Paso del Toro y El Tequesquite	560
Ejido de San Juan Ixtayopan	342	Rebombeo El Tequesquite	902
Zona Chinampera de Tláhuac	164	Rebombeo Revolución	328
Zona Chinampera de Mixquic	304	Rebombeo Paso del Toro	608
Zona Chinampera de San Nicolas Tetelco	30	Rebombeo Paso del Toro, Pozo Tecómitl 19 y PTAR Tetelco	68
Ciénega de San Pedro Tláhuac	100	Rebombeo Ciénega	200
Llano de San Antonio Tecómitl	100	Pozo Tecómitl 3	200
Llano de Tetelco	20	Pozo Tecómitl 20	40
TOTAL	2,261		5,360

Tabla 142. Zona Agrícola que no cuenta con infraestructura de riego.

SECCIÓN	Superficie (ha)	Fuente de Abastecimiento
Ejido San Francisco Tlaltenco y ampliación Tlaltenco	338	PTAR Chalco
Ejido Ampliación San Juan Ixtayopan	79	PTAR Chalco
Ejido Ampliación San Antonio Tecómitl	104	PTAR Chalco
Llano de Mixquic	15	PTAR Chalco
TOTAL	**536**	

Diseño hidráulico de una unidad de riego:

Requerimientos

1. Definición de la superficie (ha)

2. Fuente de abastecimiento (Q)

En las áreas nuevas propuestas para riego, de acuerdo con el Caudal disponible y la superficie a abastecer se realizará el diseño con:

- Infraestructura de bombeo.
- Tuberías (principales, secundarias y regantes).
- Estructuras de control (seccionamiento, desfogues, válvulas de aire).
- Estructuras cruce (cruce de caminos, canales, drenes).

Todas estas estructuras servirán para el mejor funcionamiento de la “Unidad de Riego”, y a su vez estarán divididos por subunidades o secciones con el objetivo de abastecer de agua de riego a toda la superficie que conforma la unidad.

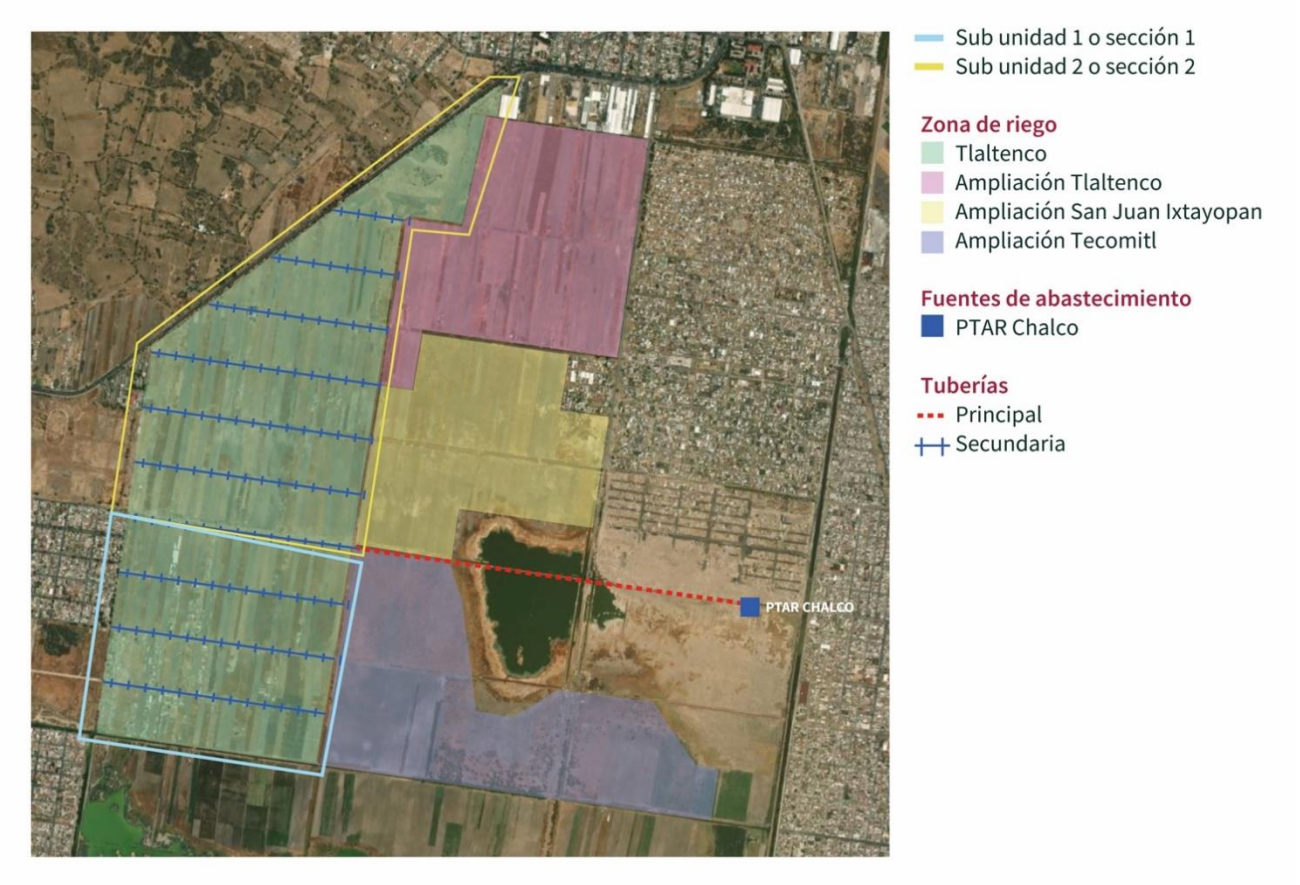


Figura 197. Ejemplo de la distribución del agua en las unidades de riego.

4.9 Uso de nuevas tecnologías LiDAR, batimetría y drones

4.9.1 Antecedentes

En el año 2019 la CORENADR adquirió equipos para estudios con tecnología LIDAR y batimétrica, adquiriéndose un Dron MD-1000, el cual debido a la emisión y escaneo de un haz laser de gran intensidad permite penetrar superficies hídricas y vegetales, siendo así, una herramienta imprescindible para la modelación de escenarios y toma de decisiones. También se realizó la adquisición de un catamarán de navegación autónoma Hydrone equipado con un kit de ecosonda SonarMite, los cuales generan datos que se procesan en gabinete para obtener la modelación batimétrica del Lago Tláhuac-Xico.

En 2022, para poder obtener un monitoreo del comportamiento del entorno hídrico y rural del Lago Tláhuac-Xico se adquiere el Dron Wingtra, el cual permite generar ortofotos de alta resolución de hasta 3.5 cm por pixel, curvas topográficas del entorno, así como la georreferenciación de problemáticas en el área del lago, entre los cuales se encuentra el posicionamiento de riesgos y cálculo de volúmenes de cascajo.

4.9.2 Tecnología Lidar

MdLiDAR1000 es un sistema totalmente integrado para la producción de nubes de puntos 3D optimizadas para aplicaciones de topografía, construcción, gas, petróleo y minería.

4.9.2.1 Levantamientos con LIDAR

Los vuelos realizados en el Lago Tláhuac-Xico, representan un área aproximada de 160 ha, con una densidad de 40 puntos por metro cuadrado. Los parámetros utilizados fueron los siguientes:

a. Altura de vuelo: 60 metros
b. Seguimiento de terreno: No
c. Velocidad máxima de vuelo y de aterrizaje: 6 m/s

Previo a la ejecución se colocó una coordenada base a partir de un equipo de antenas GNSS (Global Navigation Satellite System) en modo estático con lecturas antes, durante y una vez terminado el vuelo. Este proceso es vital para obtener una precisión de 5 cm en el levantamiento.

Resultados obtenidos

Se obtuvo una nube de 67,107,482 millones de puntos (Figura 198), en proyección UTM WGS84, Zona 14 N. Se identificó una densidad de 40 punto/m^2. A partir de este levantamiento es posible generar modelos de elevación y superficie de alta resolución con precisión de 5 cm.

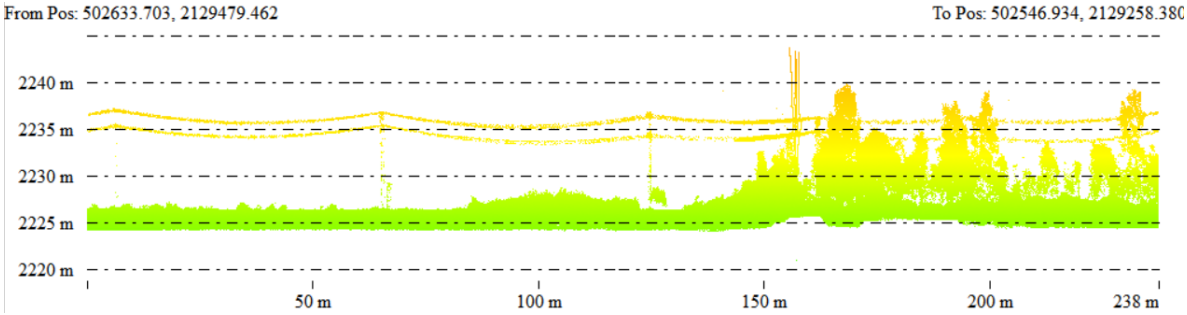


Figura 198. Representación de puntos Lidar de Lago Tláhuac-Xico y periferias.

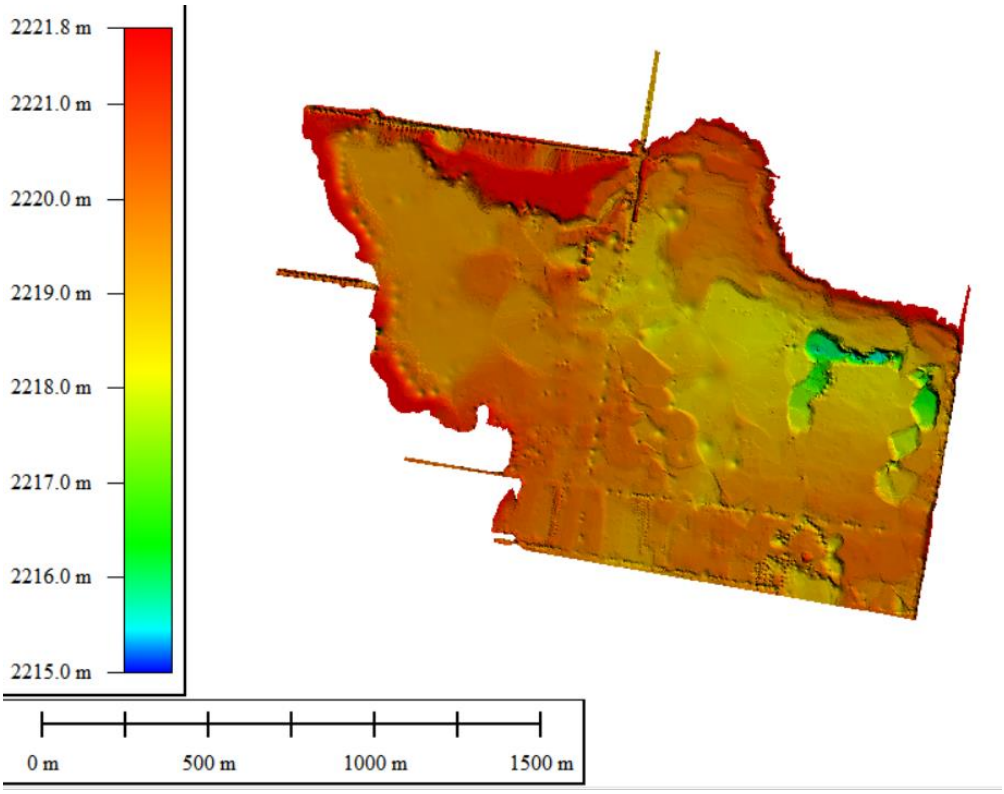


Figura 199. Representación 3D Modelo de Elevación Digital.

4.9.3 Tecnología batimétrica

Un estudio batimétrico es un levantamiento topográfico del relieve de superficies cubiertas de agua, es una representación detallada del fondo del cuerpo, el cual sirve para entender la morfología de la zona obtener insumos para diferentes proyectos. Para el estudio se utilizaron las siguientes tecnologías:

HyDrone es un bote con forma de catamarán portátil, controlada de manera autónoma y remota, desarrollada para aplicaciones de levantamiento hidrográfico que se usa en combinación con ecosonda.
Ecosonda SonarMite es un ecosonda de doble frecuencia portátil que combina transductores de baja frecuencia (28kHz) y alta frecuencia (200 kHz), el diseño único permite la penetración a través de los sedimentos blandos para detectar fondo duro, detectar la capa superficial, y funciona como una herramienta útil para la clasificación del fondo.

4.9.3.1 Levantamientos batimétricos

Cada levantamiento realizado, fue previamente planificado, considerando las condiciones climáticas de la zona, así como el levantamiento de control terrestre con equipo GNSS en modo estático, lo que permitió obtener 21 estaciones base de coordenadas conocidas (Figura 201).

- Previo a la ejecución de cualquier levantamiento programado, fue necesario colocar una coordenada base a partir de un equipo GNSS topográfico en modo RTK. La base fue colocada en un sitio cercano al lugar del levantamiento y la antena móvil se colocó en el catamarán de navegación.
- Una vez colocado el Hydrone en el cuerpo de agua, se comenzó la lectura entre las antenas GNSS y la captura de datos.
- Obtenidas las coordenadas Z (profundidad) del cuerpo de agua, se procedió con la interpolación y procesamiento de información en cualquier entorno de software GIS o CAD. En el post proceso de datos se elaboraron Modelos digitales de terreno y curvas batimétricas a cada metro, para conocer la batimetría del área de estudio.

Resultados obtenidos

Una vez procesada la información, observamos que existe una profundidad de 6 metros entre el espejo de agua y el fondo del lecho, así mismo la media oscila a 3 metros por encima del punto más bajo.

A partir de los datos obtenidos (X, Y, Z), se construyó un modelo digital de elevaciones, que representa la profundidad y espejo del mismo.

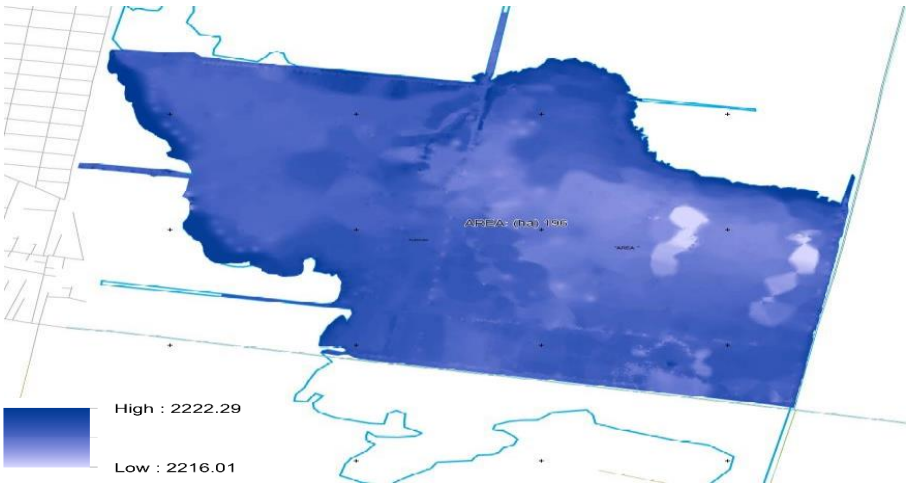


Figura 200. Representación 3D Modelo Batimétrico Lago Tláhuac-Xico.

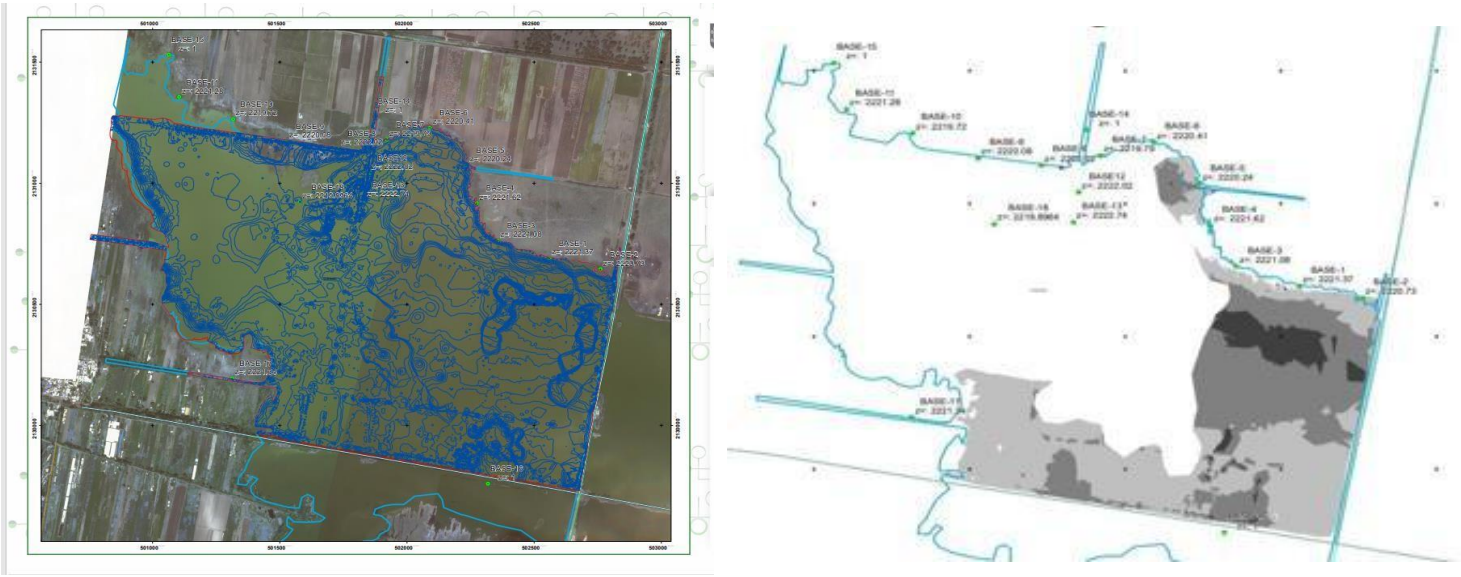


Figura 201. Curvas Batimétricas (Izquierda) y Bases de control terrestre(derecha).

4.9.4 Drones

El uso de drones se implementa en acciones que ayudan a la preservación y conservación de ecosistemas, ayudando a identificar problemáticas en tiempo real a una escala mucho menor y con mayor resolución desde 1.5 cm / pixel a diferencia del uso de imágenes satélites de 30 metros, para poder obtener este tipo de imágenes se utilizó un Dron Wingtra de mapeo de despegue y aterrizaje vertical de alta precisión topográfico y antenas GNSS.

4.9.3.2 Levantamientos fotogramétricos

Los vuelos se realizaron con los siguientes parámetros de vuelo, a una altura de vuelo de 250 metros, superposición del 70% en PPK, en postproceso con RINEX de los equipos GNSS se logró obtener precisión centimétrica.

Resultados obtenidos

Se obtuvo un orto mosaico con una resolución de 3.4 cm/pixel del Lago Tláhuac-Xico correspondiente a una superficie de 1777 hectáreas (Figura 202).



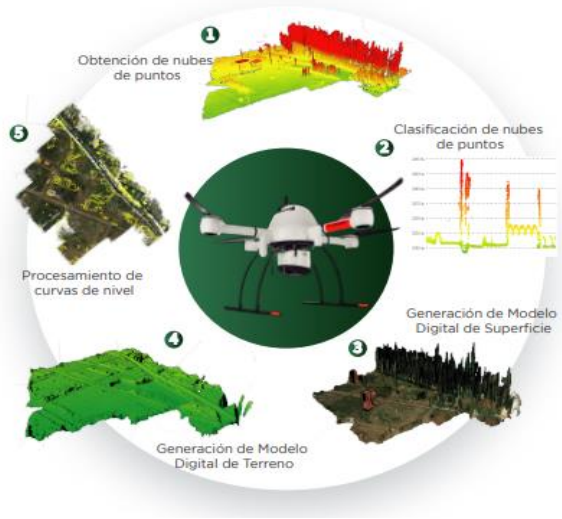
Figura 202. Ortofoto.

2019-2020

Equipo LIDAR MD 1000



Procesode obtención de datos de LIDAR:



Equipo Batimétrico.

Para la obtención de información en campo, el Laboratorio de Información Geoestadística cuenta con el siguiente equipo:

1. HyDrone Seafloor.



2. Antenas GNSS.



3. Ecosonda SonarMite



Procesode obtención de datos batimétricos:



2022

Dron wingtra



1 cm de precisión rigurosa

Con una cámara Sony RX1R II de fotograma completo y de 42 MP y un receptor multifrecuencia PPK GNSS,

WingtraOne ofrece la mejor precisión rigurosa de su clase de hasta 1 cm.

Ahorra tiempo

En un vuelo, WingtraOne puede mapear casi dos veces más en comparación con un drone convencional de ala fija y aproximadamente 14 veces más al compararse con drones multirotores.



Capítulo 5

Social-Jurídico

Social Jurídico

5.1 Introducción

"agua sí hay, ¡tan hay, que se la llevan a otros lados!"
(reunión en Tecómitl, con participación de 6 de los 7 ejidos,
el 05 de marzo de 2022).

En el presente informe de la componente social jurídica se describen los resultados obtenidos hasta agosto de 2022 del proceso participativo inter-ejidal e interinstitucional del Proyecto de Habilitación del Lago Tláhuac-Xico (HLTX). Con base en el trabajo de campo colaborativo con los ejidos con el objeto de recopilar y plasmar las experiencias, percepciones y perspectivas, fortalecer el tejido socioambiental con relación al proyecto de HLTX que, en principio, promueve la conservación del Lago Tláhuac-Xico y la producción agrícola de la región, mediante el tratamiento de aguas residuales de la cuenca del Río Amecameca, y el reúso potable indirecto de agua para consumo humano y para riego.



Figura 203. Presentación de los trabajos iniciales con ejidatarios de Tláhuac. Fuente: Fotografía propia, diciembre de 2021

Inicialmente se planteó realizar el trabajo colaborativo con el ejido de San Pedro Tláhuac, pero, conforme el avance de las componentes del proyecto de factibilidad y el desarrollo del proyecto conceptual, se decidió involucrar a los 7 ejidos de la región. Se depositó especial interés en los ejidos de San Pedro Tláhuac, San Juan Ixtayopan, San Nicolás Tetelco y San Antonio Tecomitl, ya que éstos tienen relación directa con los objetivos del proyecto en el territorio (Figura 204). A su vez, los ejids de San Francisco Tlaltenco, Santiago Tulyehualco y San Andrés Mixquic también fueron contemplados como beneficiarios indirectos del proyecto.

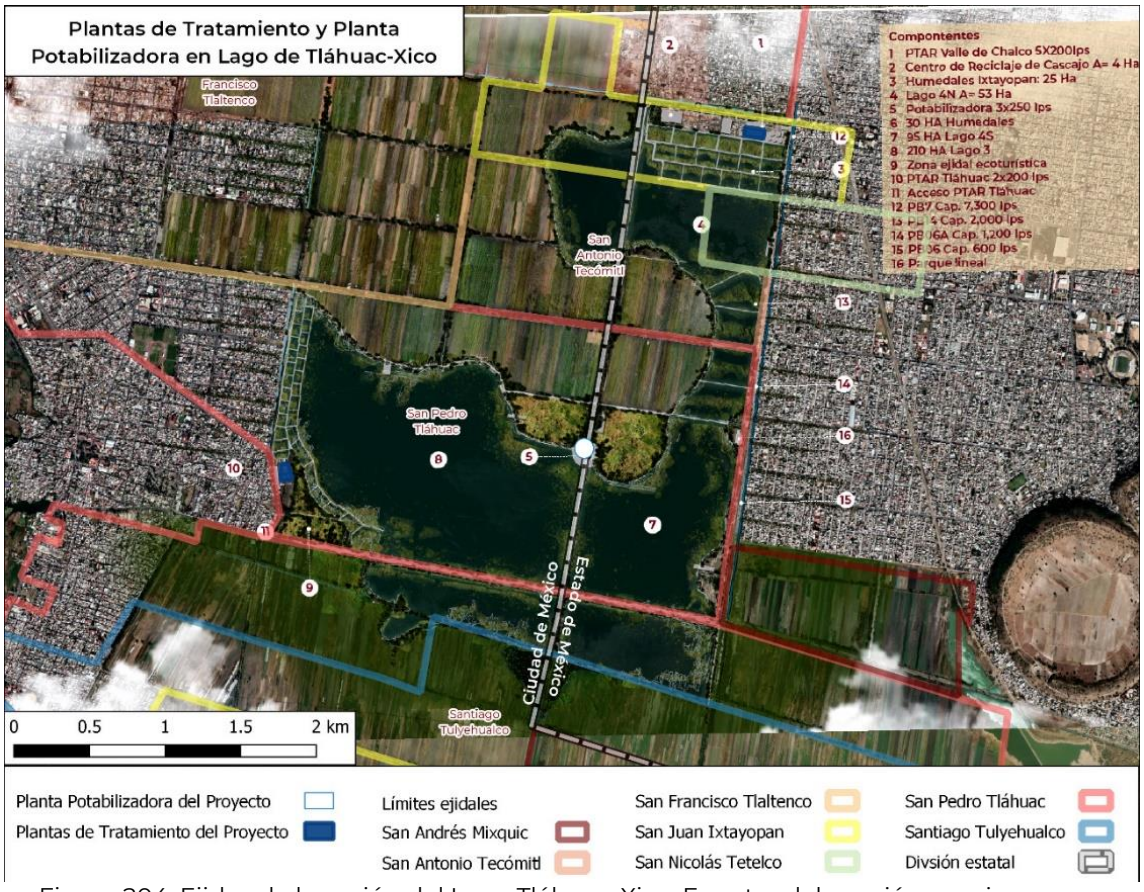


Figura 204. Ejidos de la región del Lago Tláhuac-Xico. Fuente: elaboración propia.

Durante los meses de exploración, investigación, reconocimiento y descripción de la zona en donde se pretende ejecutar el proyecto de HLTX, se pudo observar la construcción de diversos procesos a nivel sociocultural con relación a este. A través de un encuadre metodológico basado en la investigación cualitativa y horizontal, se ejecutó un trabajo de interdisciplina con las distintas componentes involucradas en el proceso, lo que permitió una propuesta conceptual que dotó de formalidad las pretensiones del proyecto de HLTX al momento de ser presentado a los habitantes de la demarcación.

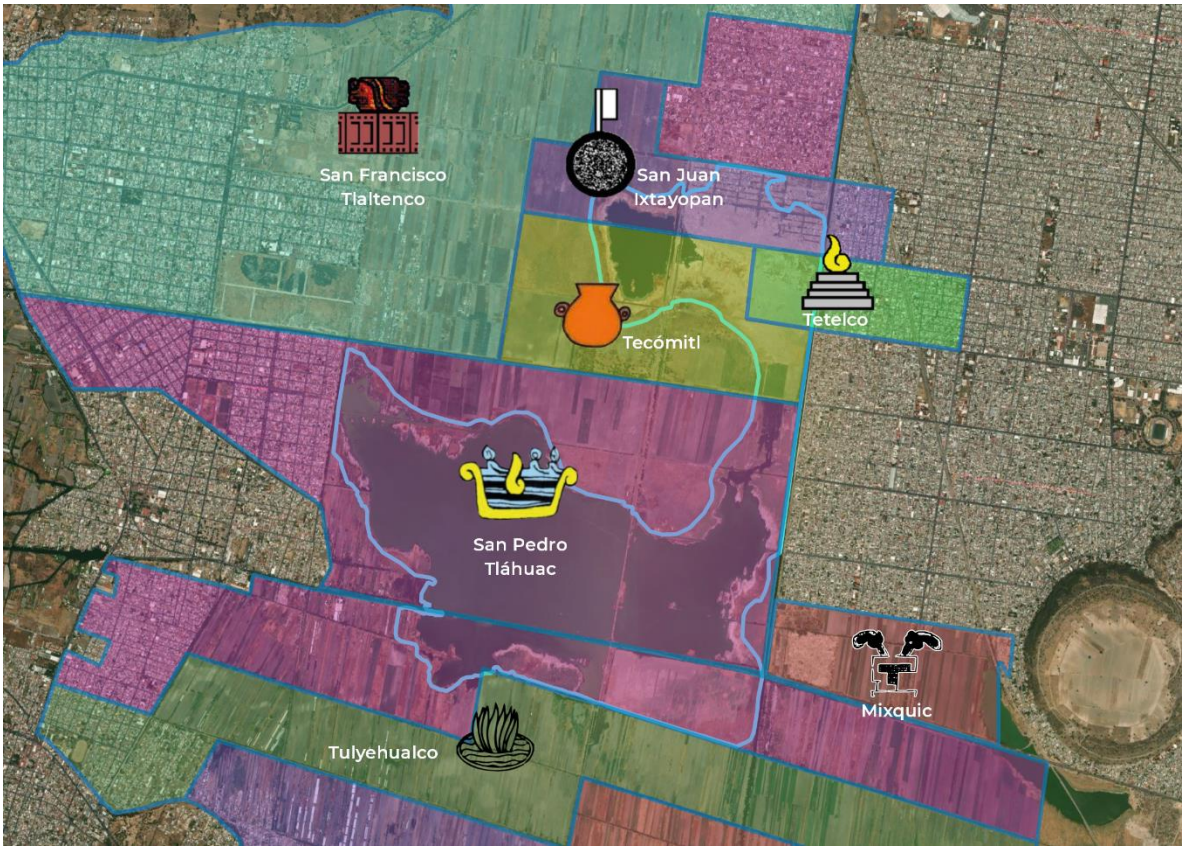


Figura 205. Proyecto conceptual metropolitano y ejidos de la región. Fuente: Elaboración propia.

En este informe se muestran los resultados obtenidos de las actividades efectuadas para el fortalecimiento del tejido socioambiental en la región con los ejidos y construido a través de la colaboración entre las instituciones gubernamentales involucradas durante el estudio de factibilidad y proyecto conceptual de habilitación del Lago Tláhuac-Xico: Comisión Nacional del Agua por medio de la Subdirección General de Administración del Agua, Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola y el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México; así como, de la Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural de la Ciudad de México y la Comisión de Aguas del Estado de México.



Figura 206. Reunión presencial interinstitucional. Fuente: fotografía propia, febrero de 2022.

El proceso derivado de las múltiples reuniones, trabajo en conjunto, prácticas en campo e interacción con los ejidos de la región, permitió que los mismos sujetos involucrados en la elaboración conceptual del proyecto se vieran inmersos en el deseo de concretar la HLTX como una posibilidad de contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de esta región. Por tanto, es significativo mencionar que, para los individuos integrantes de las componentes y directores involucrados, el proyecto se convirtió en un compromiso, una aspiración, una búsqueda de reconocimiento, y a la vez, en una motivación por parte de éstos por ser partícipes de un acontecimiento que busca convertirse en un importante **precedente de la gestión del agua en México**, en esta cuenca hidrográfica del Valle de México.



Figura 207. Parvadas de patos en el lago V durante recorrido de campo, de fondo el tiradero de cascajo y desarrollo urbano de Valle de Chalco. Fuente: fotografía propia, abril de 2022.

Esta cuenca se ubica en la región hidrológica Administrativa no. XIII, Aguas del Valle de México, la cual tiene un alto grado de presión sobre el recurso hídrico del 140 %, entre el agua disponible y la concesionada, en 2018, conforme a las estadísticas de la Comisión Nacional del Agua. Ahora bien, es por esta situación que se justifica la propuesta del **reúso indirecto de agua en el lago Tláhuac-Xico**, en la cuenca del Valle de México, como una alternativa de fuente de agua.

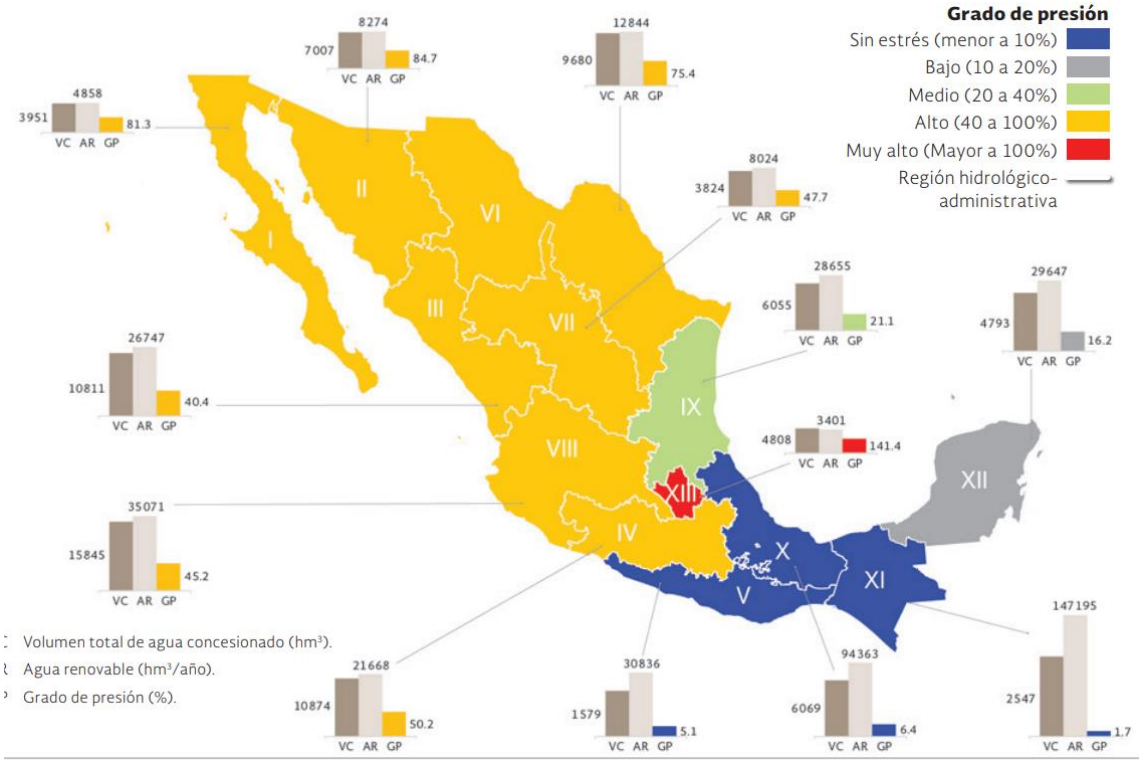


Figura 208. Grado de presión sobre el recurso hídrico en México, 2018. Fuente: CONAGUA (2018).

Mediante mesas de trabajo se elaboró una lista de acciones o solicitudes técnicas y jurídicas que integran el "Plan de Mejora Integral de la Región", para analizar y concretar las necesidades expresadas por los ejidatarios, logrando así, que éstos contribuyeran al proceso de difusión del proyecto HLTX en la región y se generara una paulatina pero constante muestra de aprobación a los cambios que el proyecto HLTX pretende generar, en el que los mismos ejidatarios comenzaron a Identificarse como parte de éste y sin que la autoridad responsable dejara de propiciar un acompañamiento y escucha a sus recomendaciones o sugerencias.



Figura 209. Mesa de trabajo con ejido de San Juan Ixtayopan. Fuente: Fotografía propia, marzo de 2022.

El presente informe incluye los objetivos del presente estudio, la semblanza histórica del lago, los planteamientos de colaboración de los ejidos, los trabajos de coordinación interinstitucional realizados para la aceptación del plan en la región, así como los análisis sociales y jurídicos con los ejidos, la descripción de problemáticas en la demarcación, talleres, mesas de trabajo, el proceso de la Contraloría ciudadana autónoma del agua. Por último, se presentan una serie de conclusiones y recomendaciones que la componente social jurídica formuló, así como sus anexos: el listado de reuniones, citas bibliográficas e históricas de la existencia y desaparición del agua en la región y un listado de estudios realizados en la región; para esta etapa del estudio de factibilidad y diseño conceptual de la Habilitación del Lago Tláhuac-Xico.

5.1.1 Objetivo general

"Solo aquel que no piense en el futuro, no pensaría en el agua"
Sr. Mario, ejidatario, San Antonio Tecómitl

Fortalecer el tejido socioambiental facilitando la cooperación de conocimientos del lago y sus ejidos por medio de un trabajo colaborativo en conjunto con las instituciones en el marco del estudio de factibilidad y proyecto conceptual de la habilitación del lago Tláhuac Xico, con el objetivo de conservación del Lago Tláhuac Xico y la producción agrícola de la región, mediante el tratamiento de aguas residuales de la cuenca del rio Amecameca, y el reúso potable indirecto de agua para consumo humano y para riego.

La construcción participativa requirió de las condiciones de comunicación abierta con la comunidad ejidal, y en esta etapa de estudios que interpretan los técnicos para que la comunidad ejidal en un futuro tome las decisiones de dar su aprobación y en esa condición primordial, se trabajó participativamente en la apropiación del proyecto.



Figura 210. Presentación del proyecto con participación de 6 de los 7 ejidos de la región. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Antecedentes históricos agrarios del Lago Tláhuac-Xico

[...] yo siendo niño, todavía conocí este lugar, pero ya no era el paraíso que mi abuela y mi madre conocieron, fue creciendo el pueblo y al mismo tiempo fue muriendo el ojo de agua, me tocó verlo morir, ya no salía agua cristalina, solo salía agua amarillenta, las garzas ya no se paraban, las ardillas ya no saciaban su sed, como en antaño, así murió el ojo de agua, también las historias terminaron y la leyenda quedó en el recuerdo del pueblo de mis antepasados.
Jamás volverá ese paraíso, ya se perdió.
(Martínez, J., 2010, p. 94-95)
"Los surcos de mi memoria."

La Cuenca de México se extiende por un área de 16,424 km², abarcando 100 municipios en los Estados de México, Hidalgo y Tlaxcala y las 16 alcaldías de la Ciudad de México. Está cerrada por la Sierra de Monte Alto, Sierra de las Cruces, Sierra del Ajusco, Sierra de Chichinautzin, Sierra Nevada, Sierra de Río Frío, Sierra de Calpulalpan, Sierra de Tepozán, Sierra de Pachuca, Sierra de Tezontlalpan, Sierra de Tepotzotlán y Sierra de Monte Bajo. Se compone de cuatro valles, al sur se ubica el Valle de México, al noroeste (NW) el Valle de Cuautitlán, al nororiente (NE) el Valle de Apan y al norte el valle de Tizayuca.

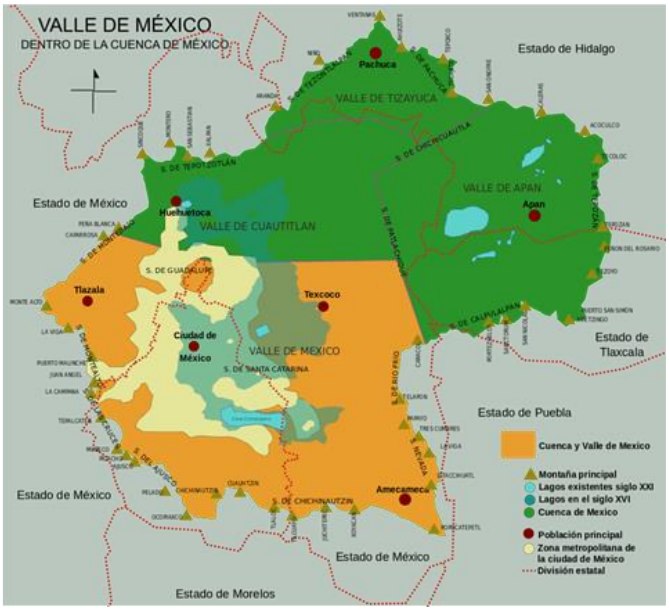


Figura 211. Cuenca de México con los valles que la componente

En la Cuenca de México existían cinco lagos antes de la llegada de los españoles, Lago de Zumpango, Lago de Xaltocan, Lago de Texcoco, Lago de Xochimilco y Lago de Chalco, como se puede apreciar en la Figura 212. Estos cuerpos de agua eran alimentados por los escurrimientos y filtraciones provenientes de las sierras aledañas. Durante la Colonia la cuenca fue abierta artificialmente mediante la construcción de un desagüe con objeto de desecar los lagos.

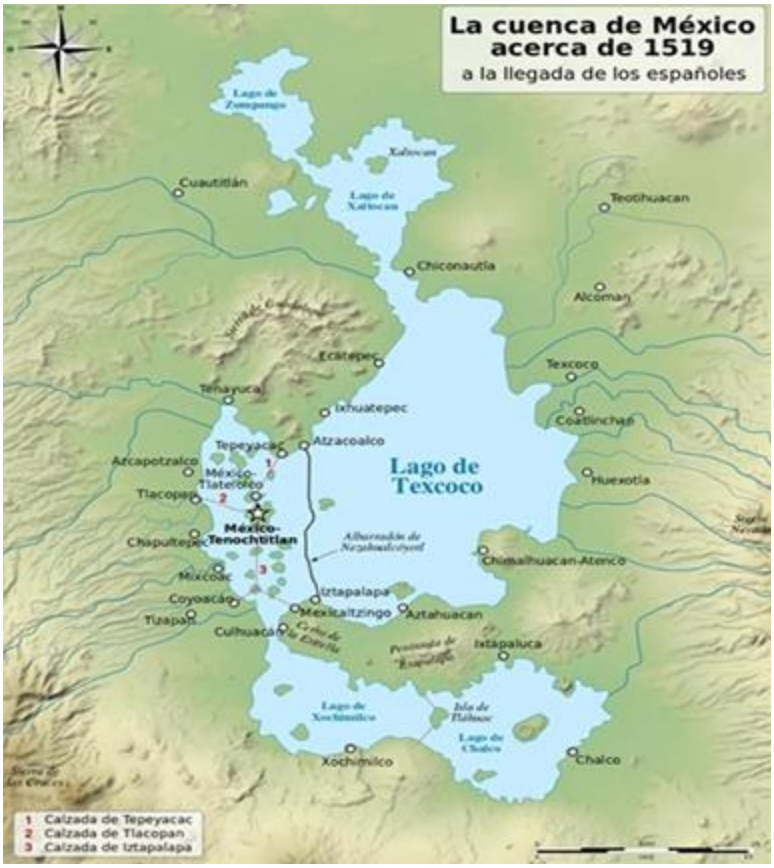


Figura 212. Los cinco lagos de la Cuenca de México Fuente: Plan hídrico de la Comisión de Cuenca de los ríos Amecameca y La Compañía[2].

Ubicado en el extremo sur de la zona lacustre del Valle de México estaba el Lago de Chalco, de vital importancia para el proyecto, que era un cuerpo de agua dulce alimentaba con los escurrimientos de la Sierra Nevada y en cuyo centro estaba el Cerro de Xico, que es un cráter volcánico que hoy es un distintivo natural de Valle de Chalco.

[2] https://www.comisiondelacuenca.mx/plan-hidrico/

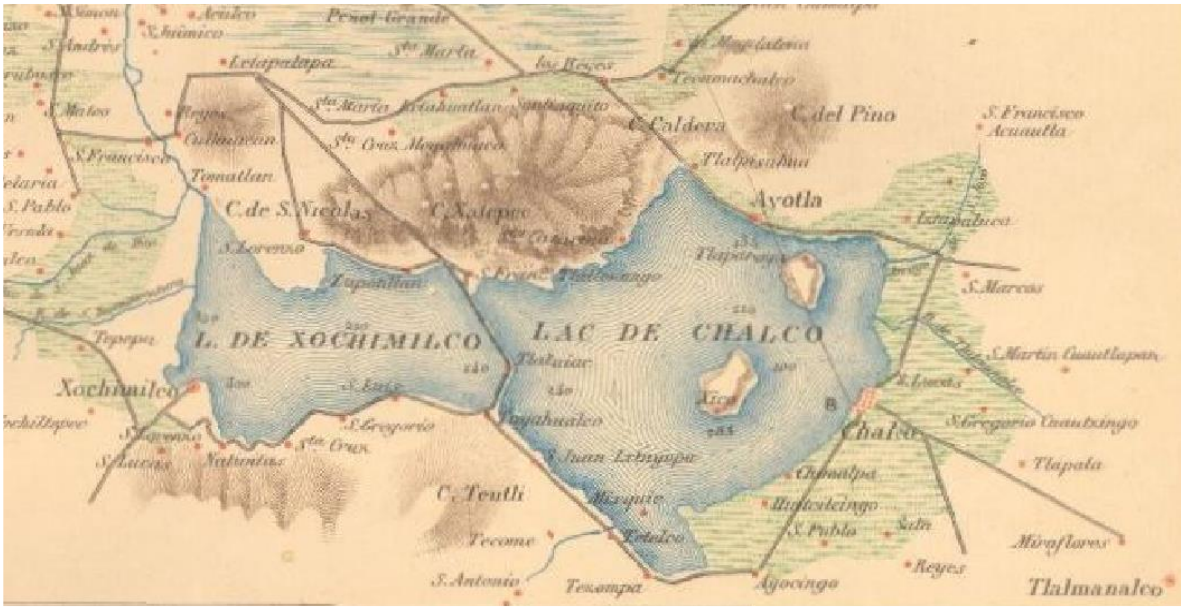


Figura 213. Lago de Chalco en 1872

El 25 de junio de 1856 se expide la Ley de Desamortización de las Fincas Rústicas y Urbanas de las Corporaciones Civiles y Religiosas de México (Ley Lerdo) donde se permitía que la propiedad abandonada y lotes baldíos fueran recuperados y pasarán a ser dueños quienes los convirtieran en terrenos productivos. El 23 de octubre de 1895, se publica en el Diario Oficial el decreto que permite desecar el lago de Chalco. Amparado en ley y decreto, el español Ignacio Iñigo Noriega deseca el Lago de Chalco, para conseguir 7,700 ha para superficie de cultivo, construye la Hacienda de Xico y posteriormente la consolidación del latifundio de la Negociación Agrícola de Xico de 9,822 ha. Para desecarlo primero se realizó el levantamiento topográfico y puesto que el nivel de las aguas del lago estaba metros arriba del nivel de Lago de Texcoco, se construyó Canal de La Compañía para verter las aguas del Lago de Chalco al Lago de Texcoco. Sin embargo, sobrevive una pequeña laguna junto al volcán a la que los colindantes y ribereños conocen como “Laguna de Xico”.


Figura 214. Cerro de Xico rodeado por la Laguna de Xico y por la ciudad de Valle de Chalco que se fundó en 1994 en lo que fue el Lago de Chalco.

5.1.2.1 Dotación a los ejidos

Posteriormente, al triunfo de la Revolución Mexicana, a partir de 1923 se decreta el reparto de los latifundios a los pueblos que los trabajaran con lo que las tierras del Lago desecado se dotaron a los pueblos de San Pedro Tláhuac, San Juan Ixtayopan, San Nicolás Tetelco, San Antonio Tecómitl, San Francisco Tlaltenco, Santiago Tulyehualco y San Andrés Mixquic.

Tabla 143. Dotaciones y ampliaciones de tierra del Lago de Chalco desecado

Nombre	Dotación	Superficie ha	Ampliación	Superficie ha
Ixtayopan	04/02/1917	405.75	01/07/1936	155.5
Mixquic	24/01/1918	557.167	05/03/1930	100
Tlaltenco	04/08/1923	766.49	-	-
Tláhuac	16/08/1923	1048.5	1936	113.7
Tulyehualco	20/08/1923	406.5	-	-
Tetelco	28/08/1924	446.33	26/08/1936	58.3
Tecómitl	28/08/1924	284	01/07/1936	179.8

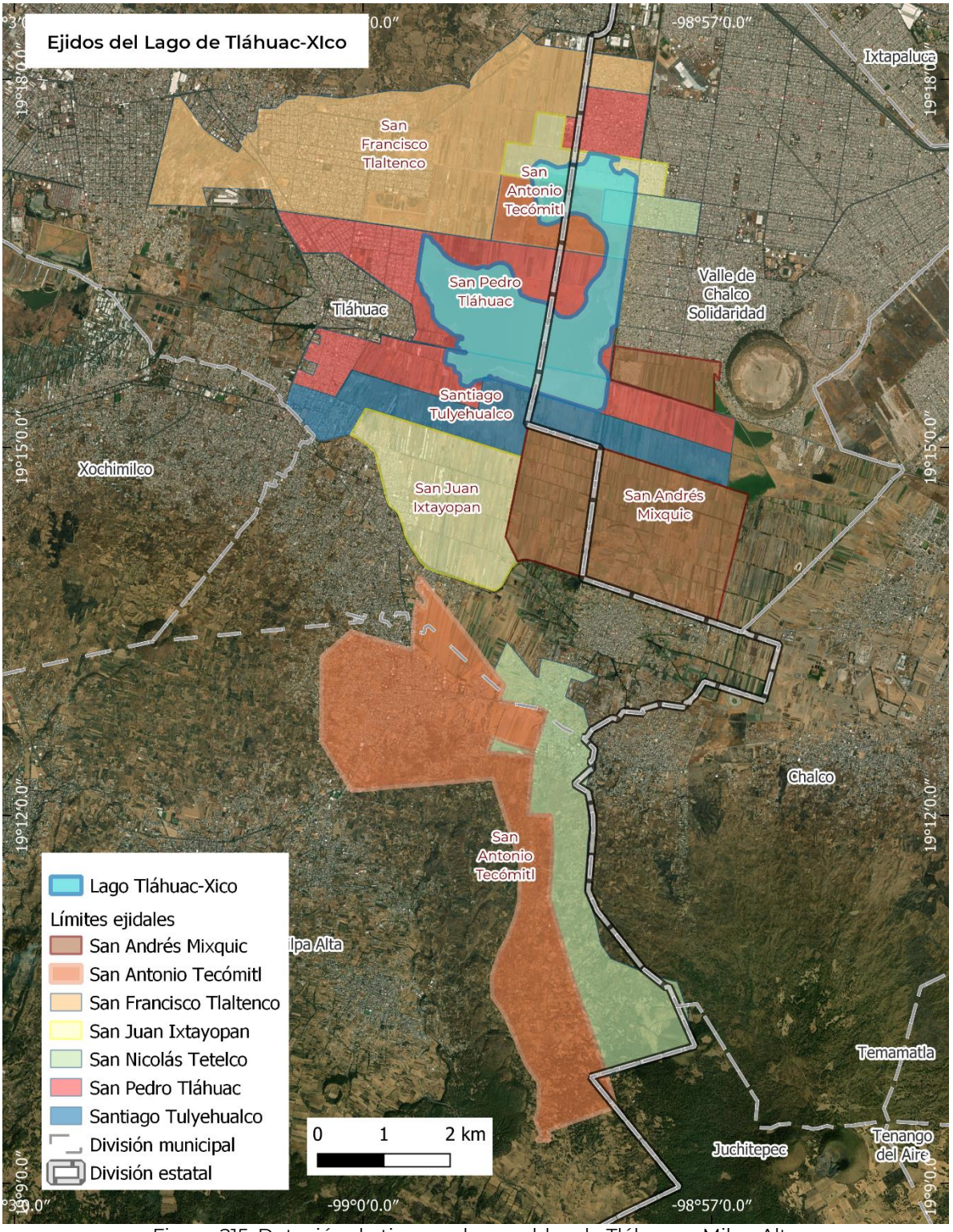


Figura 215. Dotación de tierras a los pueblos de Tláhuac y Milpa Alta

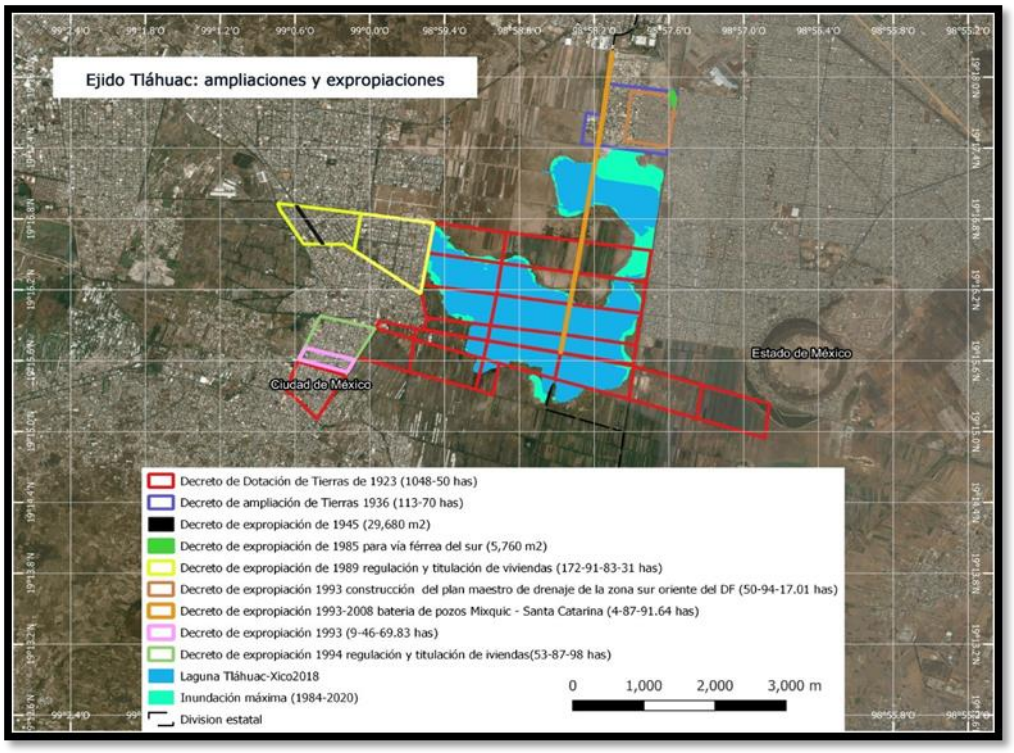


Figura 216. Ejido de San Pedro Tláhuac, decretos de dotación y expropiación

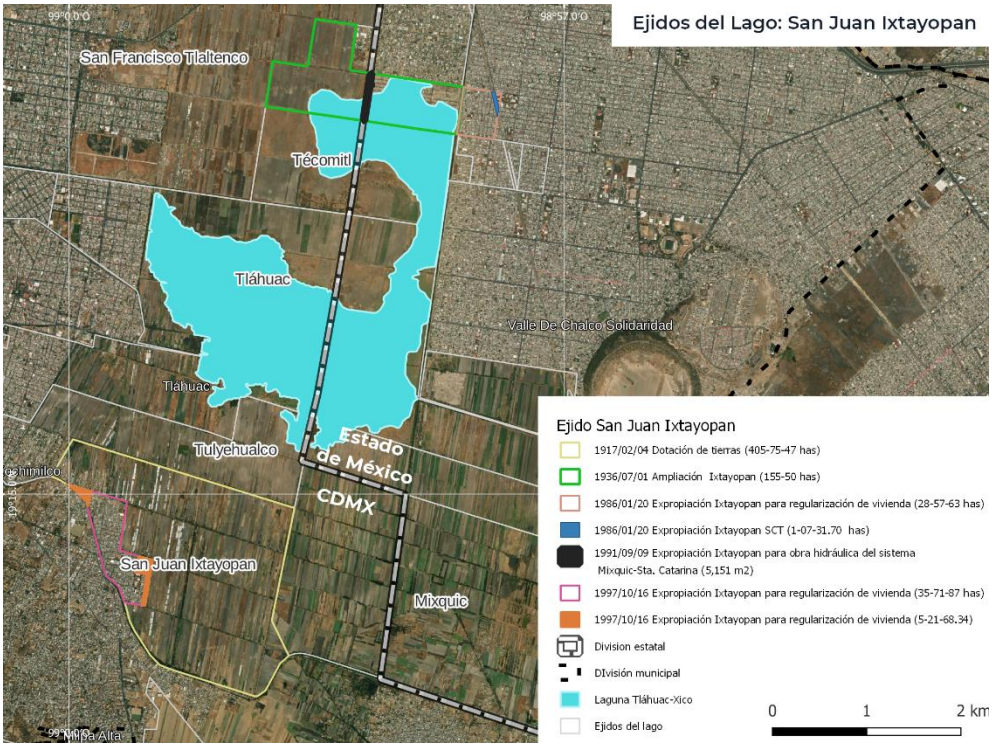


Figura 217. Ejido de San Juan Ixtayopan, decretos de dotación y expropiación

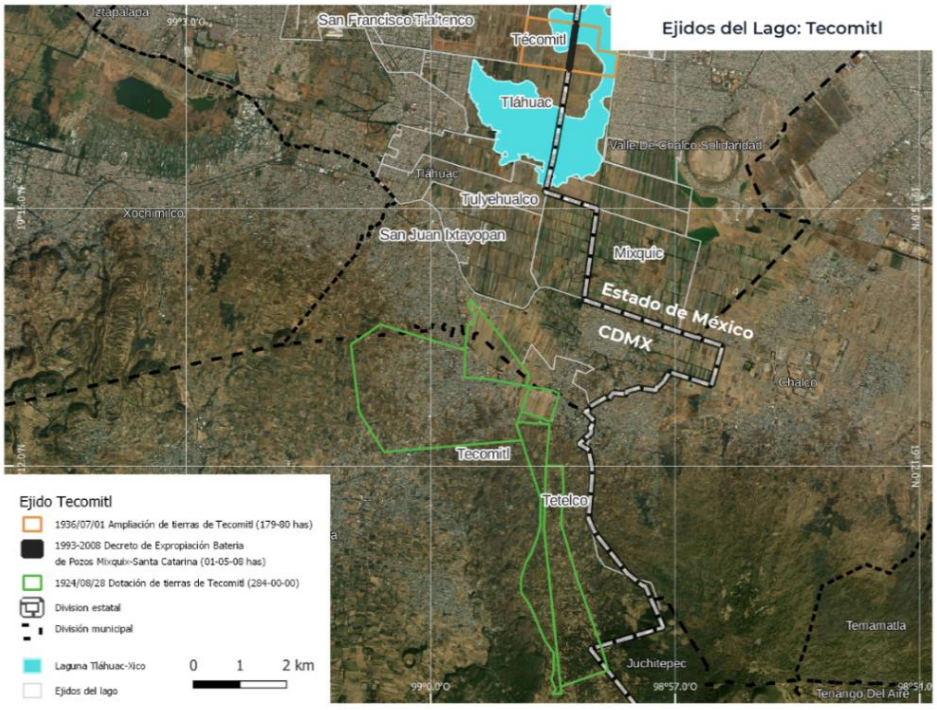


Figura 218. Ejido de San Antonio Tecómitl, decretos de dotación y expropiación

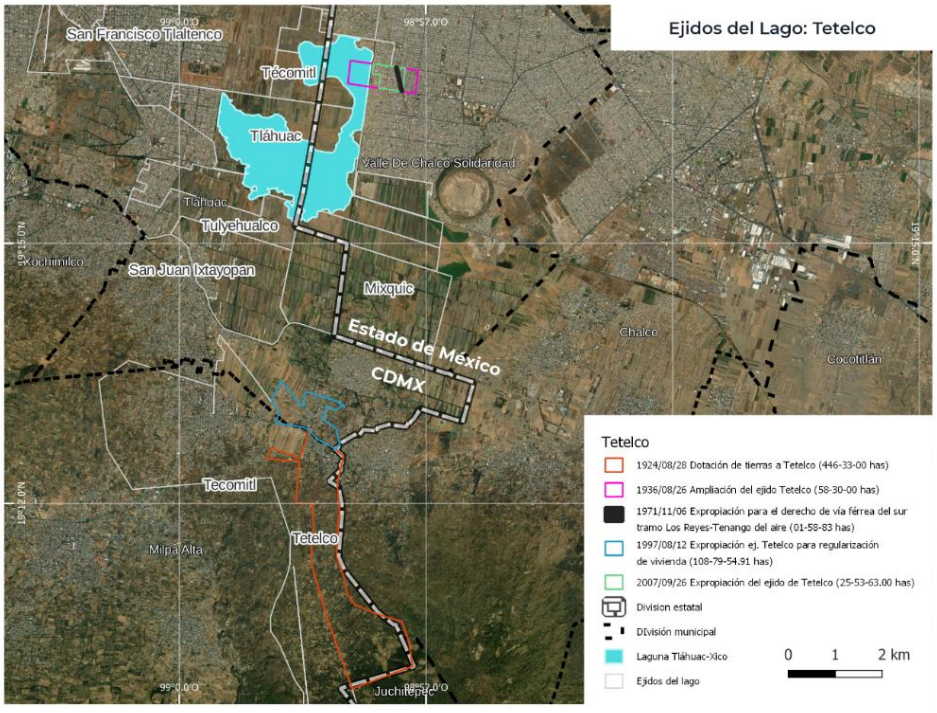


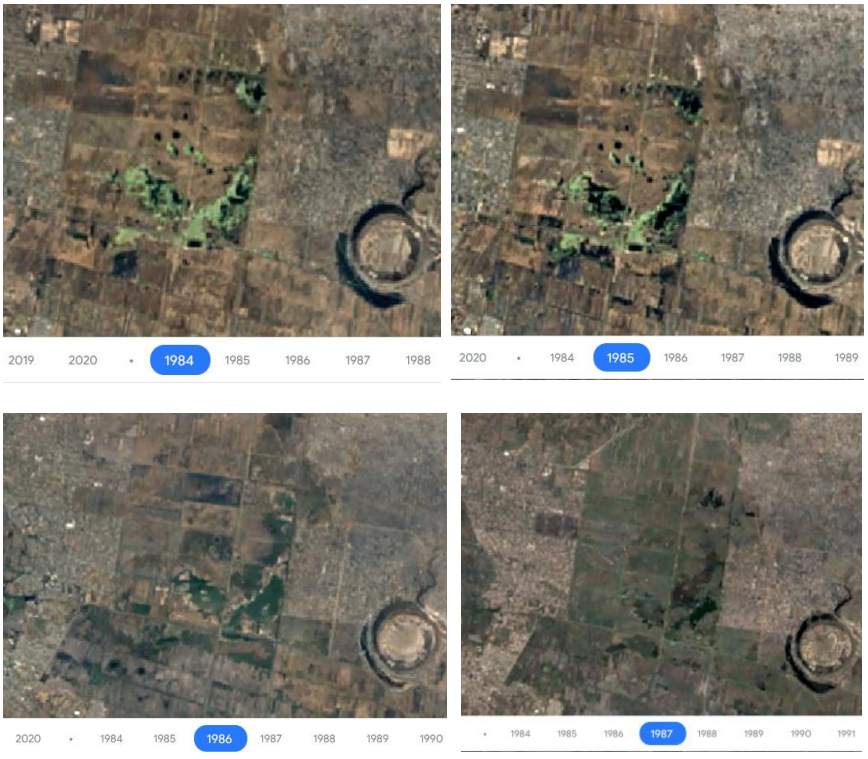
Figura 219. Ejido de San Nicolás Tetelco, dotaciones y expropiaciones

5.1.2.2 Declaratoria de aguas de propiedad nacional del Valle de México, 1922

Posteriormente, mediante Decreto del 5 de abril de 1922, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de mayo de 1922, la entonces Secretaría de Agricultura y Fomento declara que, “las aguas y cauces de los canales, barrancos, arroyos, ríos, lagos y lagunas comprendidos dentro del Valle de México y ligados con las obras de desagüe son de propiedad nacional”.

5.1.2.3 El regreso del Lago, 1983

A partir de 1983 empezaron a verse los primeros brotes de agua del Lago con un crecimiento persistente hasta alcanzar 560 ha de superficie cubierta de agua, afectando a los ejidos de Tláhuac, Tecomitl, Ixtayopan y Tetelco pues, vieron su actividad agrícola limitada por más de 30 años.



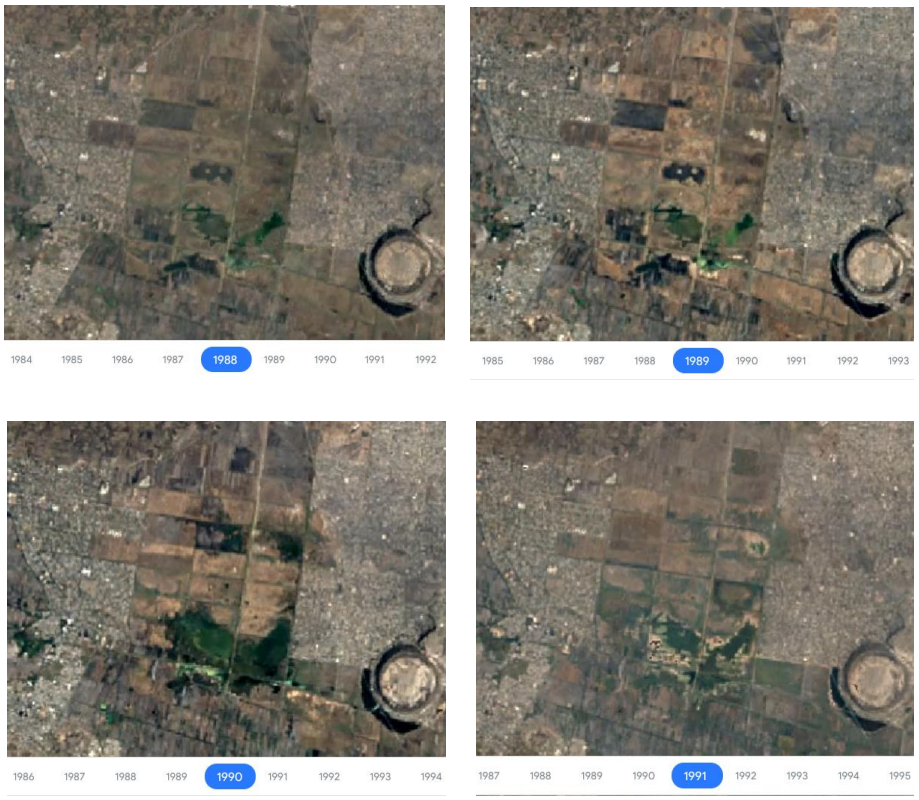


Figura 220. Secuencia de Inundación. Tomado de Google Time Lapse. Fuente: https://earthengine.google.com/timelapse#v=19.26466,-98.96621,11.369,latLng&t=0&ps=50&bt=19840101&et=20201231&startDwell=0&endDwell=0

5.1.2.4 Situación actual del lago, 2022

De conformidad con lo antes expuesto, la Declaratoria de 1922 en el Diario Oficial de la Federación, denominó al Lago de Tláhuac-Xico (antes el lago de Chalco) como un bien nacional, ya que en su momento estaba ligado a las obras que constituían el sistema de desagüe de la Ciudad de México y, al no haberse presentado o realizado ningún acto administrativo posterior que la desincorporara del régimen del dominio público, ésta mantuvo su clasificación como bien nacional. Así bien, es inconcuso que las aguas provenientes de los escurrimientos (corrientes superficiales) y la lluvia (aguas pluviales) que se almacenan en el Lago de Tláhuac-Xico, son del dominio de la Nación y las tierras y superficie del Lago pertenecen a los ejidos de acuerdo con los decretos de dotación.

Adicionalmente, el marco constitucional, legal y reglamentario que regula los cuerpos de agua nacionales y sus bienes inherentes como bienes propiedad de la nación es lo suficientemente para poder clasificar, sin la necesidad de generar un instrumento específico. En este sentido, considerar al Lago de Tláhuac-Xico como un bien nacional permite habilitarlo para retener, tratar y potabilizar el agua que hoy se expulsa de la región, de acuerdo con el Plan Hídrico para las subcuencas de los Ríos Amecameca, La Compañía y Lago Tláhuac-Xico aprobado por el Consejo de Cuenca del Valle de México en su III Sesión Ordinaria el 15 de abril de 2010. Como consecuencia del regreso del vaso para formar el Lago Tláhuac-Xico, cuatro ejidos están involucrados: Tláhuac, Tecómitl, Tetelco e Ixtayopan.

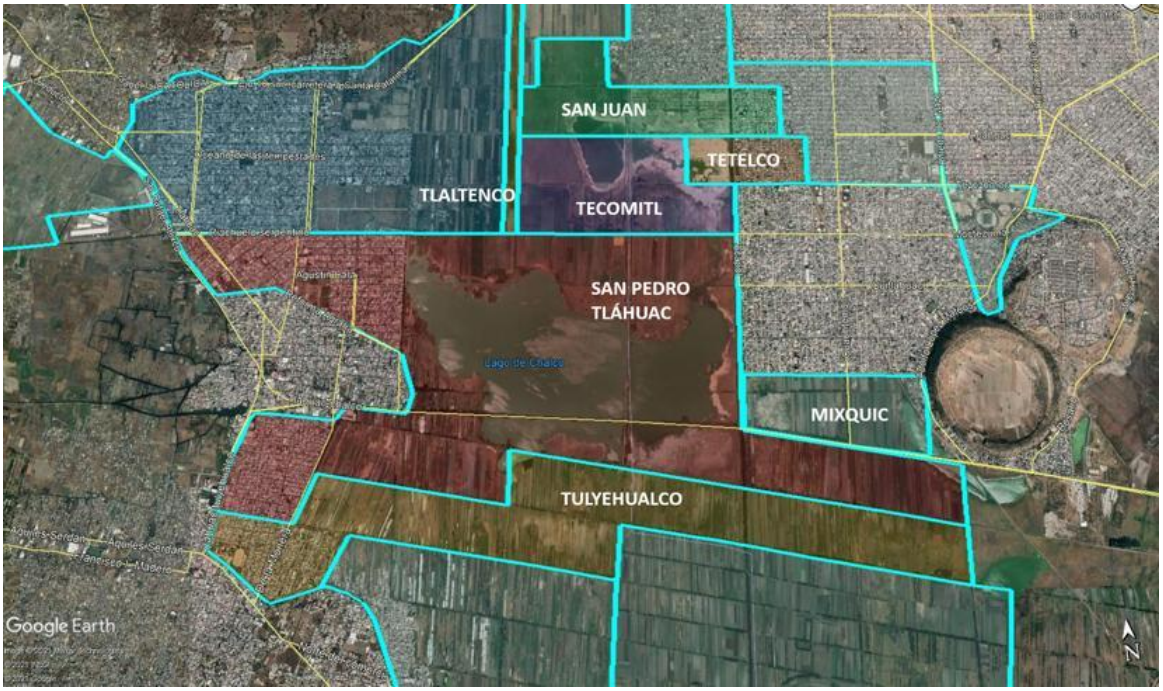


Figura 221. Ejido de Tláhuac, y ampliaciones de Ixtayopan, Tetelco y Tecómitl que fueron afectados por el nacimiento del PHLTX. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Planteamientos colaborativos en la región

5.2.1 Ejido de San Pedro Tláhuac

Comisariado ejidal 2022-2025

Presidente José Ezequiel Agustín Chavarría Palma, **Secretario** José Miguel Ortega Piña, **Tesorera** Lucía Flores Galicia. **Presidente del Consejo de Vigilancia** Juan Galicia Pérez, **1° Secretario** Leticia González Luna, **2° Sec**. Sandra Galindo Ramírez, **Suplentes: P.** Prisciliano Mateos Rodríguez, **S.** Hugo Pueblita Ortega, **T.** Juan Zenón Mejía Chavarría, **PCV** Abraham Manuel Ramírez Cadena, **1S** Graciela Ortega Castañeda, **2S** Sebastiana Fabiana Rodríguez Hernández.

Tienen las siguientes peticiones:

a) Ayuda en el proceso de parcelación. Por la presión demográfica, grupos de personas ajenas al ejido que han acaparado tierras por invasión o por venta de los mismos ejidatarios, quienes argumentan que por necesidad y ante la presión de gente desconocida. Ante tal situación, el Comisariado del 2016-2019 inicio el proceso de regularización de sus tierras con apego al artículo 56 de la Ley Agraria por medio de una empresa particular.
b) Satisfacer la demanda de agua del pueblo de Tláhuac a partir del pozo #11 del Ramal Mixquic-Santa Catarina ubicado en tablas 14-1 y 14-2.
c) Apoyo para resolver la invasión del predio de San Miguel de las Tablas, que forma parte de la ampliación de 1936.

5.2.2 Ejido de San Antonio Tecómitl

Comisariado Ejidal (CE) 2021-2024

Presidente Jorge Suárez, Secretaria Laura Guadalupe Ramos Ávila, Tesorero Pablo Suárez Martínez, Consejo vigilancia Raúl Domínguez Cárdenas. Presidente CV: Raúl Dominguez Cárdenas, 1° Secretario: Crispina Suárez Labarrios, 2° Tesorero: Virginia Meza Medina

Tienen las siguientes peticiones:

a) En la ampliación de 179.8 ha de 1936 que se asignó a 21 ejidatarios más la parcela escolar dejando sin tierra a 168 ejidatarios con la promesa de una dotación federal. Estos 21 ejidatarios esperan recibir un pago por la venta de la ampliación pues negocian con el Sindicato Libertad para efectuar la compraventa de la sección del Edo Mex (77 ha), pero no existen registros de que una Asamblea General les hubiera asignado ese predio. Este grupo se considera como un ejido aparte por lo que no tienen que sujetarse a la Asamblea General de Tecómitl. El CE pide apoyo para que se respete la ley agraria y se sometan a la Asamblea General.
b) Se analizó el historial de dotaciones y se encuentra que al ejido le hacen falta alrededor de 800 ha de las 1,096 con que fueron dotadas en 1924.
c) Problemas de posesión de una parcela donde está ubicado un pozo de agua, concesionado por el SACMEX.
d) Agua tratada de la PTAR El Llano.

e) Apoyo para darle mantenimiento a sus pozas de captación de agua de lluvia.
f) Apoyo para ingresar al programa Sembrando Vida ya que mantienen un bosque que buscan reforestar.
g) Concretar el proyecto de la PTAR en el pueblo de San Antonio Tecómitl (Barranca Seca).
h) Rehabilitación y mantenimiento de las pozas de captación de agua de lluvia.
i) Ejido de San Juan Ixtayopan

Comisariado Ejidal 2021-2024

Presidente, Marta Hilda Martínez Garcés, **Secretario,** Oscar Vázquez Diaz, **Tesorero** Guillermo Zamora Jiménez, **Presidente CV,** Felix Vázquez Castañeda, **1° Secretario** Blanca Rosa Garcés Rosales, **2° Secretario** Karina Alejandra Corona Jiménez

Los ejidatarios en asamblea determinaron realizar el proceso de la regularización de sus tierras por medio de una empresa privada, parcelando todos los parajes del ejido de San Juan Ixtayopan. En la regularización se pretendía parcelar el paraje “El Pato”, considerado como de conservación por el Gobierno de la Ciudad de México.

Respecto a los terrenos de la ampliación la parte del lado del Estado de México cuenta con los permisos para su titulación y la parte de la Ciudad de México se pretende regularizar como tierras de uso común.

El 30 de junio de 2019, la Procuraduría Agraria acudió a una asamblea donde se aprobaría el proyecto para la planta de bombeo de la Lupita y firma del convenio de ocupación previa, pero no fue aprobado por la asamblea solicitando una mayor explicación del proyecto y las condiciones. SACMEX propone que se forme una comisión que acuda a sus oficinas para darles la explicación que se requiera. En la misma asamblea se reconocieron nuevos ejidatarios, cuya calidad previa era de posesionario o avecindado en el ADDATE del 10 de junio de 2018, por lo tanto, la inscripción de este acuerdo dependerá de la ADDATE.

En fecha 26 de septiembre del 2021, la Procuraduría Agraria participó en una reunión de trabajo en SACMEX acompañando al ejido para verificar la formalización del proyecto de la planta de bombeo, acordando lo siguiente: el área jurídica de SACMEX enviaría a esa Unidad Administrativa convenio de ocupación previa para su revisión (La indemnización es por $ 1,735,818 MN) y en su caso presentación ante la asamblea a más tardar el día 9 de octubre del 2021 (Figura 222). Consiste en la instalación de aproximadamente 2.5 km de tubería para conducir agua de inundaciones estacionales de la PB de la Lupita a la PTAR del Llano y permitirles el riego.

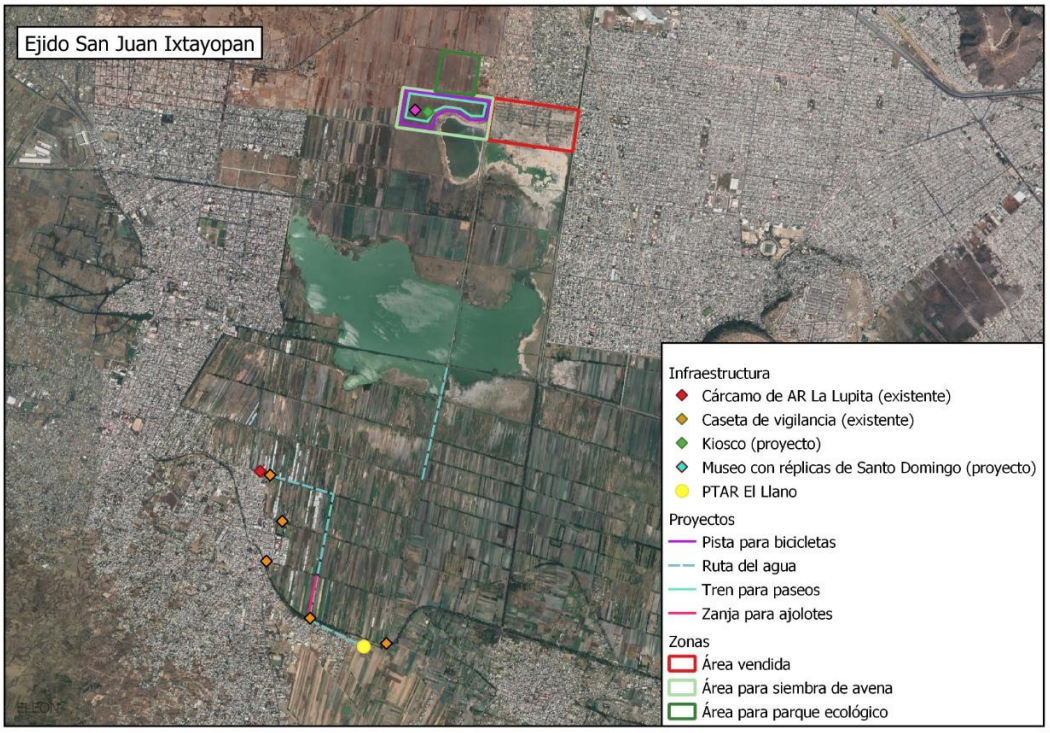


Figura 222. Proyectos del San Juan Ixtayopan. Fuente: Elaboración propia.

Un grupo de ejidatarios no aceptan la calificación negativa por parte del RAN CDMX de la asamblea de fecha 10 de junio de 2018 con trabajos realizados por una empresa particular.

En la ampliación del ejido hay personas que fueron reconocidas por asamblea con la calidad de ejidatarios, sin embargo, mediante juicio agrario interpuesto ante el TUA-8 por los beneficiados en la ampliación del ejido encabezados por José Manuel Muñoz Olivos dejaron insubsistente el acta de asamblea de reconocimiento. Los ejidatarios que perdieron la calidad agraria mediante el Juicio siguen interponiendo recursos legales. (perdieron el juicio y el amparo, sin embargo, su abogado aún les informa que pueden seguir interponiendo acciones jurídicas en materia administrativa).

Los terrenos de la ampliación está una parte en la Ciudad de México y otra parte en el estado de México, ahora bien, tanto los ejidatarios de la dotación y ampliación pretender regularizar estos terrenos y únicamente beneficiar a los 19 ejidatarios de la ampliación. Tiro de cascajo en tierras de la ampliación del ejido (Estado de México) con autorización del ejido, que ya detuve por denuncias federal y de Edo. México.

5.2.2.1 Algunos otros antecedentes de acuerdo con el Comisariado Ejidal (CE)

La presidenta describe los antecedentes del ejido.

En 1936 se les dotó de una ampliación de 155.5 ha. En 1986 se les expropió una superficie de 28.5763 ha para urbanización en el municipio de Valle de Chalco. En 1983 se inundó la mayor

parte de la ampliación y en 2000 se vendió a la empresa Admiel* una superficie de 56.2 ha correspondientes a la fracción ubicada en el Estado de México (1) “con fines de urbanizar y lotificar estando autorizados para depositar tierra”. El Sr. José Manuel Muñoz Olivos es la primera persona que hizo la propuesta y manejó el trato sin ser ejidatario. Se reunía con Maricela Alamilla. María Margarita Castellanos Vargas era la vigilante que dejaba pasar los camiones de cascajo violando los acuerdos de asamblea. Dentro de esa sección está la colonia Las Américas completamente urbanizada y regularizada por acuerdo de Felipe Calderón. Dado que no se pagó la expropiación se pueden reclamar su pago o la recuperación de las 20 ha del decreto expropiatorio del 2007.

*El tesorero de comisariado, informa que la venta de esa parte del ejido a razón de $580/m^2 tiene un valor de $326,400,000 MN. La empresa paga a cada uno de los 340 ejidatarios a razón de $5000/mes, conforme se van vendiendo los terrenos, hasta completar $960,000 a cada ejidatario (16 años). Se piensa que una expropiación los afectará.

Las peticiones son:

- Rehabilitación de planta de tratamiento “El Llano” (se tiene programado recorrido con personal de sistemas de agua y ejidatarios para verificar las instalaciones)
- Junto a la parte vendida, ya dentro de la Cd. de México, se tienen 86 ha, 12 de las cuales están en el lago, en las restantes 74 ha se tiene el proyecto agrícola y ecoturístico, que conoce CORENADR mediante oficio con fecha de 3 de marzo de 2022, para hacer un bosque que junto con la laguna sea un parque ecológico con pista para bicicleta, tren escénico. En este sitio se solicita apoyo de la Guardia Nacional para proteger esta área que ya ha sufrido de depósitos aislados de cascajo.

5.2.3 Ejido de San Nicolás Tetelco

Comisariado Ejidal 2021-2024
Presidente, Edgar Eleazar Palacios Ruíz, **Secretario,** Roberto Jiménez García, **Tesorero** Oscar Alba Buendía, **Presidente CV,** Julio Cesar Jurado Mejía, **1° Secretario** Librado Acevedo Pérez, **2° Secretario** Juan Carlos García Bonilla

Antecedentes

a) Escasez de agua potable en la zona, motivo por el cual el ejido pretende asignar una fracción (800 m^2 aproximadamente) de tierra a SACMEX, a través de la Dirección de Patrimonio Inmobiliario del Gobierno de la Ciudad de México para la construcción de un tanque elevado de agua.

b) Derivado de conflictos internos se suspendieron los trabajos del programa de regularización de sus tierras conforme al artículo 56 de la Ley Agraria, los cuales están en pláticas para reanudarlos.

c) Asentamientos irregulares en las tierras de la ampliación ubicadas en el Municipio de Valle de Chalco, Estado de México.

d) Ventas en tierras de la ampliación autorizadas por el ejido mediante asamblea a las que no invitan a la Procuraduría Agraria, por así convenir a sus intereses. cuentan que ya la vendieron a “Grupo Terra”. Que se hizo un contrato de compraventa en el que se estipula que si se acumulan tres pagos vencidos el contrato ya no tiene efecto pero

que los ejidatarios deberían pagar con tierra lo que se le había cubierto. Que han recibido un pago mensual durante año y medio. Que al momento llevan dos pagos atrasados y el tercero vence el 15 de abril. Que de Grupo Terra los llamaron para decirles que ya no podrían pagar porque CONAGUA tiene un proyecto en el Lago y ya no se podría urbanizar.

e) Problemas de grupos de delincuencia organizada y tala clandestina que no son atendidos adecuadamente porque el ejido cuenta con tierras dentro de la Alcaldía Tláhuac y Milpa Alta, por lo que cuando ocurre algún delito ninguno de los ministerios públicos asume la competencia bajo el argumento de que el registro del ejido está en Tláhuac.

f) Derivado de expropiación por parte de la CORETT hoy INSUS los ejidatarios reclaman que hay inconsistencias en las mediciones y no se entregaron las escrituras correspondientes

g) Inconformidad por parte de un grupo de ejidatarios, solicitando un informe detallado de los fondos económicos del ejido al comisariado ejidal. Cuentan que ya la vendieron a “Grupo Terra”. Que se hizo un contrato de compraventa en el que se estipula que si se acumulan tres pagos vencidos el contrato ya no tiene efecto pero que los ejidatarios deberían pagar con tierra lo que se le había cubierto. Que han recibido un pago mensual durante año y medio. Que al momento llevan dos pagos atrasados y el tercero vence el 15 de abril. Que de Grupo Terra los llamaron para decirles que ya no podrían pagar porque CONAGUA tiene un proyecto en el Lago y ya no se podría urbanizar.

Las peticiones son:

- Rehabilitación de pozas para captar agua de lluvia en la zona montañosa al igual que una potabilizadora que se instaló ahí pero nunca ha funcionado. Proponen combinarlas junto con un pozo que no se usa por mala calidad de agua para producir agua potable.
- Tecnificación de riego (por goteo) en las áreas agrícolas de su ejido.
- Llevar agua de Paso de Toro (de Cerro de la Estrella) a Tetelco.

5.2.4 ODAPAS Valle de Chalco Solidaridad

El 11 de abril se realizó un recorrido de campo, posterior a una exposición del proyecto de HLTX y sugerencias del ODAPAS Valle de Chalco. Al concluir el ODAPAS VCHS, realizó las siguientes peticiones y sugerencias:

a) En caso de utilizar el microcircuito de AP, se requiere rehabilitarlo por fugas detectadas en la transición del Cerro a la planicie de Valle de Chalco.
b) Continuación y entrega de obras de CAEM en el cerro del Marqués y la Col. Guadalupana, I y II sección.
c) Información de los avances de la obra del “Parque de la Ciencia”, en la Col. Xico La Laguna.
d) Proponer una estrategia para mejorar el servicio público de agua potable en la comunidad del Triángulo

e) Regar un centro deportivo cercano a la PTAR de Mixquic, si se rehabilita.
f) Desazolvar el canal general, y rectificar su cruce con la carretera Tláhuac- Chalco, ya que provoca anegaciones al camino hacia Mixquic.
g) El ejido de Chimalpa se podría beneficiar del agua tratada del Parque de la Ciencia, por ello es importante considerar su participación, así como el saneamiento de la laguna que está ahí mismo, y se contamina con las aguas residuales de Casas Ara, y que el avistamiento de patos, es algo raro actualmente.
h) Analizar y proponer alternativas para mitigar el problema de inundaciones del canal y cruce de las vías del Tren cerca de Liconsa.
i) Solicitar a CAEM, respuesta a por qué el canal general mantiene un nivel alto de agua residual, y que la operación del túnel canal general esté activa.
j) Analizar la propuesta de conectar el canal Chimalpain con la lumbrera del túnel Chimalpain, en su cruce con la av. Cuauhtémoc y eventualmente tener esta fuente adicional de agua residual para épocas de estiaje.

5.3 Perspectiva colaborativa de ejidos y comunidad de la región

"Si no les dices que va a haber beneficios económicos, te van a decir que no".
(Ing. Oscar, secretario del comisariado ejidal, San Juan Ixtayopan)

5.3.1 Ejido de San Pedro Tláhuac

El proceso participativo para el proyecto conceptual, tuvo sus retos de lograr una mayor vinculación con la comunidad ejidal pues no fue convocada desde su mesa directiva, por razones que obedecen a dinámicas de sus procesos internos.

5.3.1.1 Árbol de problemas y soluciones con ejidatarios

El árbol de problemas (Figura 223) se diseñó en el espacio Tlatolli, espacio alternativo que nos ofreció el compañero Ramón Galicia, activista de la cultura y defensor del ejido.

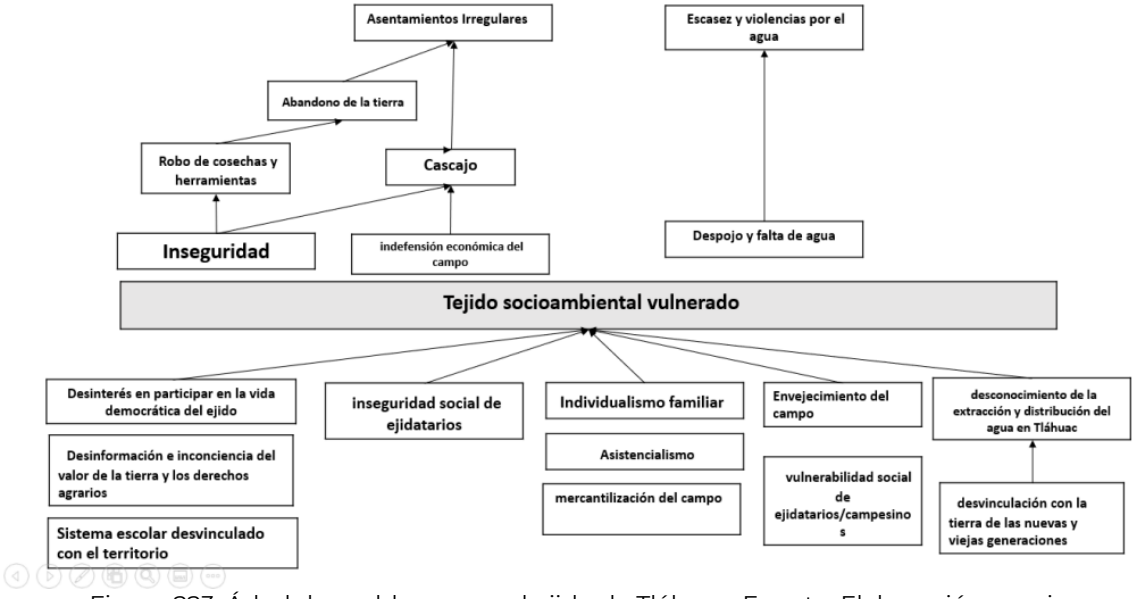


Figura 223. Árbol de problemas en el ejido de Tláhuac. Fuente: Elaboración propia.

El árbol de problemas coincide en sus causalidades con las debilidades y la amenazas, ubicando la perspectiva de un tejido social vulnerado, no solo desorganizado, si no vulnerado por la extinción de la vida campesina, el individualismo familiar, y la apatía en la participación.

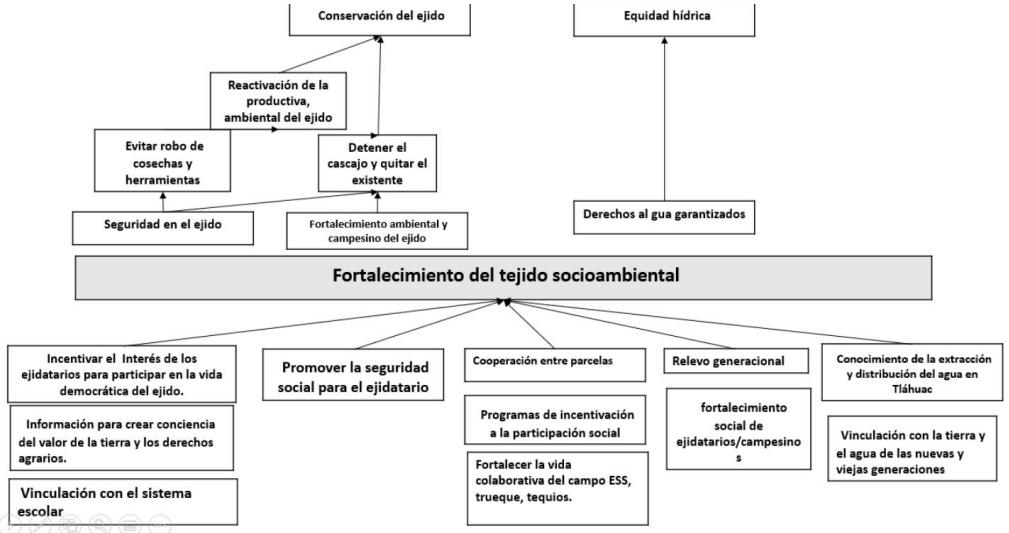


Figura 224. Árbol de soluciones. Fuente: Elaboración propia.

El árbol de soluciones (Figura 224) se planteó como objetivo el fortalecimiento del tejido socioambiental del ejido, la estrategia de apoyar las fortalezas, para llegar a las oportunidades, también es para disminuir las debilidades y amenazas.

Tabla 144. Objetivos particulares para el árbol de soluciones

No.	Objetivo particular	Actividades	Componentes
1	Lograr vinculaciones de la vida campesina con las escuelas para visibilizar los proyectos actuales que le dan sentido al ejido y al lago como una oportunidad	Investigación y comunicación comunitaria sobre el ejido y la propuesta de Rehabilitación del Lago Tláhuac-Xico	Recuperación y difusión de la memoria biocultural
2	Fortalecer la colaboración de las parcelas que ya trabajan para lograr la seguridad social	Cooperación entre parcelas que incentiven la colaboración y puedan dar seguridad social y económica al ejidatario	Proyectos económicos en el lago: ecoturismo, pago servicios ambientales y de dotación de agua
3	Colocar la vida campesina como sujeto de cambio en la rehabilitación ambiental, agrícola y cultural	Garantizar el relevo generacional	Programas ecoturísticos, agroecológicos en el marco de la rehabilitación del lago
4	Organizar la contraloría del agua como mecanismo de transparencia y de garantía de la conservación	Incentivar la participación de colectivos y parcelas interesados en la conservación	Organizar la promoción para la contraloría del agua

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.2 Análisis FODA con ejidatarios

Fortalezas. La principal es la de seguir y contar con tierras fértiles. Esto permite redimensionar el trabajo campesino desde su importancia de conservación ambiental, alimentario y cultural. La rehabilitación del lago tiene que ver con la oportunidad de producir alimentos altamente saludables y de calidad.

1. Que en la actualidad se sigue sembrando
2. Que siguen siendo tierras fértiles
3. Abundantes recursos
4. Existen proyectos de siembra y conservación.

Oportunidades

1. Recuperar servicios ecosistémicos
2. Tener una mayor producción agrícola
3. El saneamiento del lago es una oportunidad para tener agua.

Debilidades. Su problema central que es el tejido socioambiental vulnerado como prioridad en las debilidades, también se agregan las relaciones de causalidad que le anteceden como el desinterés y la desinformación, individualismo familiar (abonado por causas externas), envejecimiento y, la debilidad de desconocer la extracción y distribución del agua.

1. Falta agua de riego
2. Envejecimiento de los ejidatarios
3. Desorganización
4. Conflicto por colindancias
5. Siembra de temporal
6. Infraestructura hidráulica insuficiente (sistema de riego)
7. No apoya la familia
8. Deficiente administración
9. Falta información

Amenazas

1. Robo de cosechas
2. Cascajo y basura
3. Tierras inundadas
4. Asentamientos irregulares
5. Hundimientos diferenciados
6. Deficiente infraestructura hidráulica.
7. Mucho salitre

5.3.1.3 Talleres de cartografía participativa

Se realizaron talleres de cartografía participativa con la comunidad de los ejidos, los cuales son descritos en el capítulo “Geovisualizador”, en los cuales se identificaron algunas problemáticas.

Finalmente, con base en las problemáticas identificadas en el diagnóstico se planearon dos sesiones más de cartografía participativa con base en los objetivos siguientes:

I. Visibilizar la relación de los habitantes con el lago

II. Visibilizar amenazas y oportunidades presentes en el territorio
III. Visibilizar proyectos productivos de la comunidad

5.3.1.4 Identificación de principales problemáticas

Durante las reuniones, se recopilaron e identificaron estas problemáticas con el ejido de San Pedro Tláhuac:

Tabla 145. Problemáticas sociales y ambientales en San Pedro Tláhuac.

Principales problemáticas:
– Escasez de agua potable y de riego
– Tandeo de agua potable en hogares
– Necesidad de compra de agua de pipas para uso doméstico y agrícola
– Falta de compromiso del actual comisariado ejidal por resolver las problemáticas que afectan al ejido
– Pérdida de confianza, desinterés y baja participación de miembros ejidatarios, lo que ha decantado en la falta de organización dentro del ejido
– Daños ecológicos en el área de San Miguel las Tablas
– Plagas agrícolas (tuzas y gusano cogollero) que merman la producción
– Escasa vigilancia. Ausencia del Consejo Ciudadano
– Delitos como robos de cosechas y herramientas
– La inseguridad inhibe la adquisición de infraestructura hidroagrícola (e.j. tanques de almacenamiento de agua)
– Renta irregular de tierras para cultivo
– Desvinculación entre la investigación y las problemáticas locales
– Baja calidad del agua de riego
– Reparto inequitativo del agua con fines políticos
– Quema de basura e incendios

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.5 Análisis jurídico

La investigación de la carpeta histórica del ejido arrojó como resultado el siguiente cuadro cronológico:

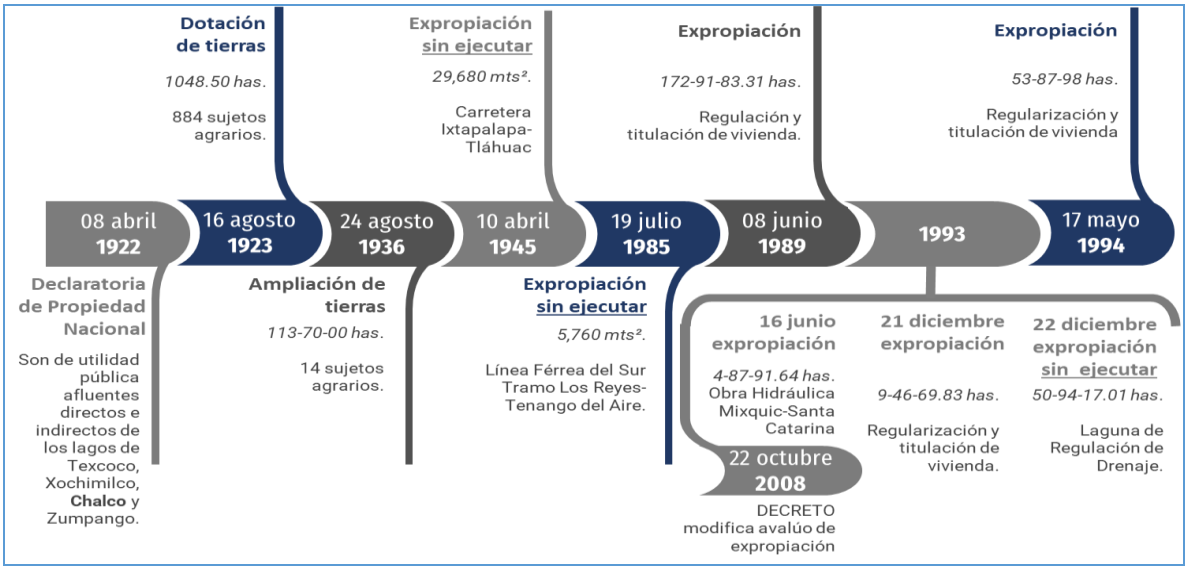


Figura 225. Cronología de dotaciones y expropiaciones en el ejido de Tláhuac. Fuente: Elaboración propia.

En este informe se contó con la posibilidad de ampliar el contexto histórico de Tláhuac en donde se plasma el incremento de datos y hechos que sucedieron en el pasado y con los cuales se ratifica lo expuesto en el reporte anterior. En el contenido de la semblanza se han logrado evidenciar mayores elementos que ponen de manifiesto la inequidad del proceso del reparto agrario por el cual se asignaron tierras al ejido, encontrándose circunstancias que desembocaron en violaciones a los derechos que en aquellas épocas conservaban los nativos de Tláhuac y que, conforme transcurrió el tiempo les fueron arrebatados por el gobierno y particulares; provocando la pérdida de su territorio y de su identidad como comunidad originaria la cual se sostenía principalmente por la actividad lacustre de la región.

Hoy en día siguen sufriendo por acontecimientos del pasado, ya que debido al crecimiento de la mancha urbana en la Ciudad de México, ahora, corren el riesgo de seguir perdiendo su territorio por la amenaza de los desarrollos habitacionales, así como la escasez de agua que provocan en la región, el incremento de estos, entre otro tipo de problemáticas. Es por esto que se tiene la pretensión de habilitar el Lago de Tláhuac Xico para llevar a cabo un proyecto de potabilización de agua y realizar actividades ecoturísticas, siendo éstas aprovechadas por los ejidos como una alternativa muy importante para la comunidad ya que puede estar en posibilidad de cumplir con el derecho humano al agua y no solo esto, si no que pueda tener una opción de seguir conservando su territorio, la actividad lacustre que en sus orígenes se daba en esta región y además, recuperar actividades ancestrales como la chinamperia y conjuntamente frenar los desarrollos habitacionales.

Al haber averiguado información referente al padrón de ejidatarios con el Registro Agrario Nacional se logró obtener una herramienta que será de utilidad en cuanto al desarrollo de asambleas de ejidatarios, las cuales serán pieza fundamental al momento que se pretenda comenzar de manera formal implementar el Proyecto de habilitación del Lago Tláhuac-Xico.

Así mismo, una vez que se proceda en cualquiera de las formas, indemnización y/o compensación, sean los ejidatarios legalmente reconocidos en el padrón a quienes se les otorgue el beneficio que se derive de la implementación de dicho proyecto.

5.3.2 Ejido de San Juan Ixtayopan

5.3.2.1 Identificación de problemáticas

En lo que respecta a la actividad de diagnóstico social, se identificaron los siguientes problemas:

Tabla 146. Problemáticas sociales y ambientales en San Juan Ixtayopan

Principales problemáticas:
– Escasez de agua residual tratada para riego en la zona agrícola de "*El Llano*"
– Falta de "*dominio pleno*" de las tierras de la ampliación del ejido
– Disputa entre el ejido y un grupo de habitantes del pueblo de San Juan por el usufructo de la ampliación del ejido
– Inaccesibilidad de la zona del pueblo a la ampliación del ejido
– Riego agrícola con agua negras en "*El Llano*"
– Pobreza
– Dependencia de la PTAR Cerro de la Estrella
– Reparto desigual del agua con ejidos aledaños en detrimento de Ixtayopan. Desde su punto de vista el pueblo de Mixquic los "*deja sin agua*".
– Extracción y aprovechamiento de agua azufrada por otros ejidos
– Inundación en el pueblo y en parcelas agrícolas del ejido
– Desaprovechamiento de lodos por falta de maquinaria
– Viviendas irregulares e invasiones, principalmente en el área denominada "El Pato", falta de transparencia sobre supuesta expropiación
– Robo y saqueo de piezas arqueológicas en la zona de Santo Domingo
– Perdida de apego a la tierra, modo de vida campesino, tradiciones y organización comunitaria

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que, si bien, la presidenta del comisariado ejidal afirmó que se requiere proteger la ampliación del ejido; dado que esta se encuentra a una distancia considerable del pueblo, para las personas consultadas resulta de igual o mayor urgencia la resolución de problemáticas localizadas en el *ejido, no en la ampliación*.

5.3.2.2 Análisis de conflictividad en el ejido

Tabla 147. Conflictividad potencial en el ejido de San Juan Ixtayopan.

Ejido San Juan Ixtayopan

Situación actual de la ampliación del ejido

La ampliación del ejido de San Juan Ixtayopan le fue dotada el 01 de julio de 1936, tenía originalmente una extensión de 155.5 ha, con una porción dentro del municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Edo. Méx, y otra en la alcaldía de Tláhuac, CDMX. No obstante, en ella han acontecido diferentes eventos, siendo los de mayor relevancia actual los siguientes:

- En 1991, expropiación de 0.51 ha - Sistema Mixquic-Santa Catarina.
- En 2004, declaratoria del Área Natural Protegida "Parque Estatal Santuario del Agua Lagunas de Xico", en Valle de Chalco Solidaridad, aprox. 1,557 ha.
- En 2020 venta por parte del ejido de aprox. 50.3 ha, en Valle de Chalco Solidaridad, a la empresa inmobiliaria *Abmiel*. Esta porción ha sufrido relleno de cascajo, lotificación y construcción de vivienda, aun cuando forma parte del Parque Estatal Lagunas de Xico. Los representantes ejidales manifestaron que la empresa cuenta con todos los permisos, incluso con la autorización de cambio de uso de suelo.

La porción remanente de la ampliación se encuentra en la alcaldía Tláhuac y es de aproximadamente 89.3 ha, de las cuales cerca de 15 ha corresponden al espejo de agua del LTX y 31 ha a "*La Mocha*". Actualmente, posee un uso de suelo agrícola, pero, en su mayoría se encuentran desocupadas y fuera de uso. Es relevante precisar que esta área se encuentra ubicada en el polígono de suelo de conservación de la CDMX.

En esta porción de la ampliación existen conflictos intraejidales y extraejidales, mismos que se describen con más detalle a continuación:

Conflictos intraejidales

- Entre ejidatarios con interés en vender la ampliación a personas ajenas al ejido y los intereses del actual comisariado ejidal de no vender y de blindarla para beneficio directo de los ejidatarios.

Conflictos extraejidales

- Entre ejidatarios y un grupo de personas no ejidatarias que habitan en el pueblo de San Juan, lideradas por el Sr. Gustavo Rojas Jiménez, por la posesión y usufructo de esas tierras.
- Entre el interés del actual comisariado ejidal de lotificar los terrenos de "*La Mocha*" para beneficio de los ejidatarios y el objetivo de detener el crecimiento urbano en la zona del proyecto del Lago Tláhuac Xico.

- Entre el interés actual de los ejidatarios de continuar con el proceso de compra-venta realizado en el año 2020 con la empresa inmobiliaria *Abmiel* y el interés de que esas tierras formen parte del PHLTX.

- Entre el interés del PHLTX de dotar de agua potable proveniente del mismo y el interés de los ejidatarios dé que el agua potable con que se les dote sea de las fuentes locales.

Es así como se presentan diferentes actores y grupos de interés en torno a la posesión, usufructo y ocupación de la ampliación del ejido de San Juan Ixtayopan. En cuanto a los representantes del comisariado ejidal parece existir un interés genuino por evitar la venta del remanente de la ampliación a personas ajenas al ejido y por obtener beneficios económicos directos para los ejidatarios, así como por conseguir el "*dominio pleno*" de la misma y evitar su ocupación y usufructo ilegal.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.3 Aspiraciones y expectativas del proyecto HLTX

Por otro lado, se han generado aspiraciones y expectativas con base en el PHLTX, los cuales son:

Tabla 148. Aspiraciones y expectativas respecto al PHLTX, Ixtayopan.

Aspiraciones y expectativas respecto al PHLTX Ejido San Juan Ixtayopan
Aspiraciones y expectativas socioambientales
– Concretar el proyecto del cárcamo de "*La Lupita*"-PTAR "*El Llano*", para el tratamiento de las aguas residuales. – El agua residual tratada de la PTAR "*El Llano*" sea vertida a las zanjas y canales de la zona agrícola de "*El Llano*" para obtener agua de riego y propiciar la restauración y rehabilitación de zanjas y canales, la infiltración de aguas hacía el acuífero y la mejora del suministro de agua de los pozos locales. – Evitar en su ejido el uso de aguas negras crudas para el riego agrícola. – La reintroducción del ajolote en las zanjas y canales restaurados y rehabilitados. – La conservación del Lago Tláhuac-Xico (LTX) como "*pulmón de la CDMX*". – La creación de un parque ecológico en la ampliación de su ejido dentro de la CDMX, que brinde servicios ambientales a nivel local y regional.
Aspiraciones y expectativas socioeconómicas
– Mejorar la situación económica de los ejidatarios. – Lograr lo que denominan el "*dominio pleno*" de las tierras remanentes de su ampliación, a través de la creación de un parque ecológico o ecoparque y, la lotificación de la porción de la ampliación conocida como "*La Mocha*".

- "*Blindar*" las tierras de la ampliación para beneficio de los ejidatarios. Evitar su venta a personas ajenas al ejido o potenciales invasiones.
- Obtener beneficios económicos del ecoparque por conservación ambiental, vía el pago por servicios ambientales, además de otras fuentes de ingresos dentro de este.
- La conservación y restauración de la zona conocida como Santo Domingo Terremote, con valor arqueológico y potencial turístico.
- Realizar actividades de turismo rural en el ejido.
- Crear un paseo ciclista que conecte espacios clave del ejido: el parque ecológico, Santo Domingo y el "*El Llano*".
- En caso de expropiación de las tierras ejidales de la ampliación ser indemnizados.

Aspiraciones y expectativas socioculturales

- Visibilizar la riqueza biocultural del ejido.
- Fomentar cambios en la cultura del consumo a través de la promoción de los beneficios a la salud de los alimentos y las prácticas agroecológicas.
- Recuperar las tradiciones referentes al reparto comunal del trabajo y de los productos de la cosecha.
- Dar a conocer la zona de Santo Domingo y su valor arqueológico.
- Promover el valor de la agricultura y trabajo de la mujer campesina.
- Fomentar el sentido de pertenencia entre los habitantes pueblo.
- Incentivar la participación de los ejidatarios en la conservación de la organización ejidal y la defensa del territorio.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.4 Propuesta de ecoparque en "La Mocha"

Con base en las necesidades y propuestas planteadas por los representantes ejidales de San Juan Ixtayopan dentro de un taller colaborativo se diseñó una **propuesta conceptual** de ecoparque en la ampliación del ejido de San Juan Ixtayopan.

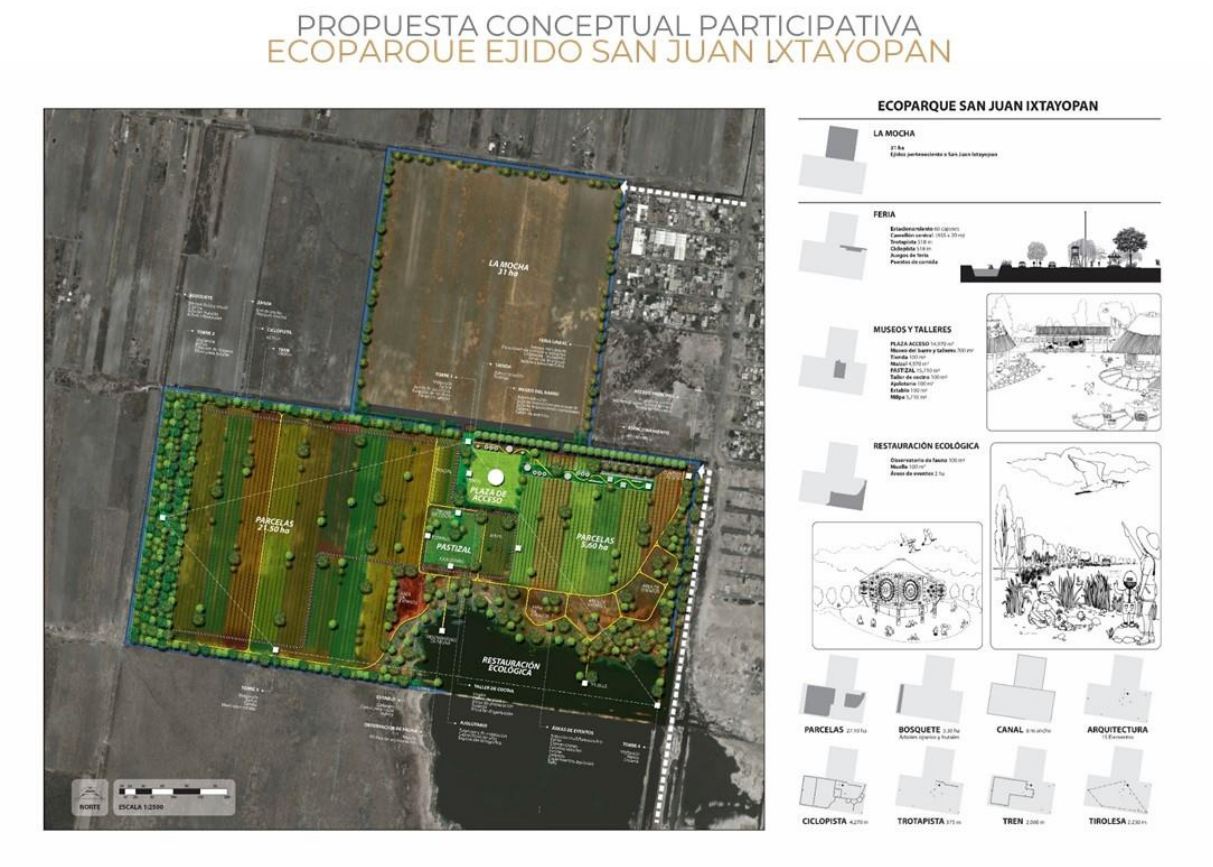


Figura 226. Propuesta de ecoparque en la ampliación del Ejido de Ixtayopan.Fuente: Elaboración propia.

5.3.3 Ejido de San Antonio Tecomitl

5.3.3.1 Identificación de problemáticas

Las problemáticas identificadas en el ejido de Tecomitl, a partir de las reuniones con el comisariado ejidal, son:

Tabla 149. Problemáticas sociales y ambientales en San Antonio Tecómitl

Principales problemáticas
– Tandeo de agua potable en hogares
– Escasez de agua de riego para la zona conocida como "*El Llano*" (aprox. 90 ha de cultivo hortalizas) y de "*La Montaña*" (aprox. 40 ha de fruticultura), en la alcaldía de Milpa Alta
– Riego agrícola con aguas negras en "*El Llano*"
– Infraestructura hidroagrícola con fallas e incompleta en "*El Llano*"
– Falta de mantenimiento de los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) instalados en la parte alta del ejido
– Conflictos agrarios intraejidales con respecto al usufructo de la ampliación del ejido
– Incertidumbre sobre la extensión y localización de las tierras históricamente reconocidas al ejido
– Falta de interés e involucramiento de las autoridades locales competentes para atender y resolver el problema de riego agrícola con aguas negras
– Desconfianza en las autoridades
– Inundaciones esporádicas durante la temporada de lluvias en las parcelas del ejido
– Cambios en los ciclos agrícolas, derivado de modificaciones en el clima
– Falta de servicios de limpieza urbana en la zona de la Barranca Seca
– Exceso de requisitos para acceder a los programas sociales del gobierno. Manifiestan corrupción en la entrega de los beneficios de los programas
– Falta de actualización del padrón de ejidatarios
– Baja participación política de los ejidatarios. Según los consultados, existe una participación menor al 30% del padrón ejidal en las asambleas
– Falta de competitividad de la producción y baja rentabilidad del sector agrícola
– Falta de interés y abandono del campo, lo que ocurre primordialmente entre las generaciones más jóvenes
– Desaparición de tradiciones de reparto comunal del trabajo

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.2 Aspiraciones y expectativas del proyecto HLTX

Se recopilaron las siguientes aspiraciones y expectativas que genera el proyecto de HLTX, con Tecómitl:

Tabla 150. Aspiraciones y expectativas de Tecomitl

Aspiraciones y expectativas respecto al PHLTX Ejido San Antonio Tecómitl

Aspiraciones y expectativas socioambientales
- Concretar el proyecto de la PTAR en el pueblo de San Antonio Tecómitl (Barranca Seca). - Evitar en su ejido el uso de aguas negras crudas para el riego agrícola en la zona de "*El Llano*". - Coadyubar a la recarga del acuífero vía la infiltración de aguas pluviales. - Evitar las inundaciones esporádicas que se presentan en la zona de "*El Llano*" a través del proyecto de la PTAR. - Que el PHLTX sea ambientalmente sustentable: que la solución que hoy se propone, no genere más problemas a largo plazo. - Que haya agua para las futuras generaciones.
Aspiraciones y expectativas socioeconómicas
- Recibir apoyo técnico, jurídico y financiero de CONAGUA y entidades como SACMEX y CORENADR para acabar con la escasez de agua de riego. - Que el PHLTX sí se realice y sea un proyecto integral, con beneficios equitativos para todos los involucrados. - Sustituir el uso de aguas negras por aguas residuales tratadas. - Rehabilitar los sistemas de captación de agua de lluvia. - Regularización de la situación agraria del ejido y de las tierras de su ampliación.
Aspiraciones y expectativas socioculturales
- Incentivar la participación de los ejidatarios en la conservación de la organización ejidal a través de la producción agrícola. - Que desde las autoridades y organizaciones involucradas haya apoyo, honestidad y transparencia y que se cumpla con lo que se plantea en el PHLTX para evitar la "*extinción*" del campesinado. - Concientizar a la población sobre la importancia de pensar en el futuro y de tomar medidas para enfrentar la "*crisis del agua*".

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.3 Análisis de conflictividad en el ejido

En este sentido, se analizaron las conflictividades potenciales con el ejido de Tecómitl, para implementar el proyecto de HLTX.

Tabla 151. Conflictividad potencial de Tecomitl

Ejido San Antonio Tecómitl
Situación actual de la ampliación del ejido
La ampliación del ejido de San Antonio Tecómitl le fue dotada el 01 de julio de 1936, con una extensión de aproximadamente 179 ha, para beneficio de 21 capacitados en materia agraria, más una parcela escolar, es así como actualmente y derivado de esta resolución existe un conflicto intraejidal, mismos que se describe con más detalle a continuación: - Los 21 ejidatarios, o el grupo de personas que actualmente representa los intereses de estos, plantean ser los únicos que cuentan con el derecho de usufructuar las tierras de la ampliación. Argumentan que le corresponde unas parcelas de ocho hectáreas de la ampliación a cada uno. - A dicho de los miembros del comisariado ejidal, actualmente solo 12 de los 21 ejidatarios cuentan con constancia de derechos vigente. - El actual tesorero y secretaria del comisariado son parte de los 21, por lo que tienen un grado de poder e influencia a considerar dentro del ejido. - Las tierras de la ampliación tienen un uso de suelo agrícola y se encuentran dentro de

la poligonal de suelo de conservación de la CDMX. Actualmente, estas tierras se encuentran en renta por parte de los 21 ejidatarios. - Existe otro grupo de ejidatarios contrario al actual comisariado ejidal; no obstante, este también está en contra del grupo de los 21. - Toda vez que no existe certidumbre entre los representantes del ejido sobre la situación jurídica de la ampliación y el papel de la asamblea general en la toma de decisión sobre la misma, los represente ejidales son renuentes a plantear posibles planes o propuestas para estas tierras y se enfocan en las problemáticas que afectan al resto del ejido, principalmente a la actividad agrícola en "*El Llano*" y "*La Montaña*". La única propuesta para la ampliación que fue observada en el trabajo de campo consiste en un proyecto avícola para la producción de huevo orgánico (500 gallinas de libre pastoreo). - Incertidumbre jurídica sobre la ampliación proviene en parte del proceso de indemnización derivado del decreto de expropiación de 1985 del Sistema Mixquic-Santa Catarina, el cual indemnizó a los 21 ejidatarios y no al ejido. - Existe desconfianza de los representantes del ejido hacia las autoridades agrarias competentes. **Se identificaron otros desacuerdos entre los intereses y propuestas de los ejidatarios y los planteados por el PHLTX:** - Algunos representantes del ejido plantearon abiertamente su falta de interés en las propuestas de parque ecológico y actividades ecoturísticas del PHLTX. - Con respecto a la propuesta de la coordinación del PHLTX de dotar de agua residual tratada de la PTAR "*El Llano*" al pueblo de Tecómitl, los representantes ejidales consideraron la opción poco viable. - Algunos ejidatarios señalaron que la inversión destinada al PHLTX se podría utilizar en el pueblo de San Antonio Tecómitl para construir una PTAR.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.4 Ejido de San Nicolas Tetelco

Al momento, no se ha generado alguna mesa de trabajo con el objetivo general y tener un diagnóstico de la situación social con el núcleo ejidal.

5.3.5 Integración de problemáticas Interejidales y beneficios del proyecto en la región

Se han identificado las siguientes 13 problemáticas generales, durante las reuniones entre los ejidos y comunidad, así como, su relación con los beneficios del PHLTX, en la que se determinaron potenciales riesgos y algunas recomendaciones:

1. Falta de agua potable en el área de influencia del PHLTX

Beneficios puntuales a nivel local	• **750 L/s de agua potabilizada**
Potenciales riesgos	• Falta de acuerdo con respecto a la distribución de los volúmenes de agua potable entre y dentro de los ejidos. El agua potable no llega a quién más la necesita. • Falta de acuerdo con respecto a la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento-potabilización. • Politización del beneficio. • Desconfianza y falta de aceptación del agua potable proveniente de la planta potabilizadora del PHLTX, preferencia por el agua potable obtenida de fuentes locales, como pozos, por ser considerada de mejor calidad. • infraestructura local obsoleta para la distribución de agua potable. • Generar expectativas con respecto a la cantidad de agua potable que el proyecto puede proveer.
Recomendaciones	• Delimitar claramente las zonas de tandeo y de abastecimiento con pipa. Delimitar las zonas que más requieren el agua potable. Realizar cruces de información con zonas de alta pobreza/vulnerabilidad. • Delimitar claramente las instituciones y las responsabilidades de cada una de ellas en términos de la operación y mantenimiento del sistema tratamiento-potabilización. • Comunicar claramente los beneficios, en términos de quién, cómo, cuánto, cuándo y dónde los recibe.

Fuente: Elaboración propia.

2. Falta de agua para riego para los sistemas agroecológicos tradicionales de los ejidatarios y para la restauración de canales.

Beneficios puntuales a nivel local	• **370 L/s de agua para riego (suficiente para 370 hectáreas)**

Potenciales riesgos	• Conflictos con respecto a la distribución de los volúmenes de agua para riego. • No hay suficiente agua de riego para todos los interesados. • Las zonas agrícolas de interés para beneficio de agua de riego se encuentran distantes del PHLTX. • Las zonas agrícolas periféricas al LTX cuentan con agua para riego proveniente de este cuerpo de agua y no están interesados en agua de riego. • Politización del beneficio.
Recomendaciones	• Establecer criterios de priorización de distribución. Delimitar las zonas que requieren riego y la cantidad. Conocer la dotación actual de agua de cada ejido. • Identificar las necesidades de infraestructura de riego. • Identificar las zonas de canales y zanjas de interés. Evaluar la viabilidad de su rehabilitación como parte del proyecto. • Definir el destino de los deshechos (lodos) de las PTAR. • Centrar la recuperación del LTX en términos de un gran sistema agroproductivo comunitario: colocar los sistemas productivos lacustres como corazón del proyecto de HLTX y no únicamente como parque demostrativo, atracción turística o una mera zona de recuperación de biodiversidad.

Fuente: Elaboración propia.

3. Pérdida de territorio ejidal por la invasión ilegal de tierras agrícolas y por el ciclo de expansión/reducción del lago, que se traducen en última instancia en pérdidas económicas para los ejidatarios

Beneficios puntuales a nivel local	• **Recuperación de los predios invadidos u ocupados ilegalmente en la zona norte del Lago (Laguna 4N) propiedad de los ejidos de San Juan Ixtayopan**. • Disminuir el riesgo de invasiones y de expansión de la mancha urbana sobre las tierras de los ejidos de San Antonio Tecómitl, San Nicolás Tetelco, San Juan Ixtayopan y San Francisco Tlaltenco. • Recuperación y/o compensación económica por los predios invadidos ilegalmente identificados fuera del área del proyecto.
Potenciales riesgos	• Los ejidatarios conciben el PHLTX como una maniobra de despojo. • Los beneficios del proyecto no les parecen suficientes. • No se logra acuerdo sobre la compensación. • Los ejidatarios no están interesados en propuestas ecoturísticas. • El crimen organizado y organizaciones ajenas ejercen presión para evitar que se logren acuerdos y la implemente el PHLTX. • Resistencia de los ocupantes ilegales de los predios en zonas con vivienda semi-consolidada. • Intereses preexistentes: proyectos pactados otras entidades o actores chocan con el PHLTX.
Recomendaciones	• Claridad sobre el reparto de los impactos positivos del proyecto entre los ejidos. • Prospectar que los impactos negativos no recaigan hacia un solo ejido o hacia los ejidos en cuyos predios se emplacen las PTAR´s, la planta potabilizadora, los humedales y el vaso del lago, con el fin de evitar posibles conflictos entre ejidos.

	• Prever los mecanismos de gestión de los proyectos ecoturísticos y proveer de asesoría técnica y jurídica a los ejidatarios. • Conocer la superficie afectada por cada ejido, avaluó y ver el monto monetario de las pérdidas para los ejidatarios y diseñar una estrategia para su amortización a través de proyectos productivos. • Se requiere delimitar los proyectos ecoturísticos y agroecológicos, para posteriormente definir la infraestructura necesaria, la zonificación y los costos. Para ello también se debe conocer previamente los acuerdos internos existentes de dotación de tierras dentro de los ejidos (parcelación de hecho y de derecho). • Delimitar de forma colaborativa con los ejidatarios sus necesidades de infraestructura deportiva, lúdico-cultural y educativa-investigación. • Prever la posible necesidad de un plan de reubicación para las familias asentadas en predios irregulares.

Fuente: Elaboración propia.

4. Tiraderos clandestinos de cascajo

Beneficios puntuales a nivel local	• **Planta recicladora de cascajo**
Potenciales riesgos	• Resistencia por parte de grupos de delincuencia organizada y de organizaciones como el Sindicato Libertad. • Falta de consenso por parte del ejido de San Juan Ixtayopan para la construcción de la planta trituradora dentro de sus tierras. • Existe un proceso de compra-venta de una porción de la ampliación del ejido de San Juan Ixtayopan con una empresa inmobiliaria.
Recomendaciones	• Es necesario definir si será una dependencia pública o los ejidatarios colectivamente los que gestionaran la planta trituradora y sus beneficios. • Es necesario prever los mecanismos de capacitación y acompañamiento, así como asesoría técnica y jurídica para los ejidatarios en caso de que se acuerde que ellos sean los encargados de su administración. • Es necesario prever la rentabilidad de la planta trituradora. • Es importante evitar hacer acuerdos con grupos antagónicos a los intereses de los ejidatarios o vinculados al crimen organizado.

Fuente: Elaboración propia.

5. Construcción de vivienda irregular

Beneficios puntuales a nivel local	• **Barrera físico-natural-social-cultural al avance de la mancha urbana (PHLTX)**
Potenciales riesgos	• Resistencia por parte de grupos de delincuencia organizada y de organizaciones ajenas al ejido.

Fuente: Elaboración propia.

6. Inseguridad en la zona

Beneficios puntuales a nivel local	• **Barrera físico-natural-social-cultural al avance de la inseguridad (PHLTX)**
Potenciales riesgos	• Resistencia por parte de grupos de delincuencia organizada y de organizaciones como el Sindicato Libertad.

Fuente: Elaboración propia.

7. Inseguridad sobre la tenencia de sus tierras por parte de las y los ejidatarios: "lotificar mis tierras para no perderlas"

Beneficios puntuales a nivel local	• **Certeza jurídica sobre la situación de sus predios**
Recomendaciones	• Proveer información clara sobre las opciones jurídicas con las que cuentan.

Fuente: Elaboración propia.

8. Contaminación del agua

Beneficios puntuales a nivel local	• **1200 lps de aguas residuales tratadas** • **Un lago y sistema de humedales con agua de muy buena calidad.**
Recomendaciones	• Prever mecanismo de monitoreo, vigilancia y evaluación de la calidad del agua para garantizar niveles óptimos de acuerdo con la normatividad aplicable. • Se necesita delimitar claramente las funciones previstas dentro del proyecto para las lagunas L1 y L2.

Fuente: Elaboración propia.

9. Desconfianza histórica de las instituciones gubernamentales y, en particular, a la Conagua

Beneficios puntuales a nivel local	• **Contraloría ciudadana de la habilitación del lago Tláhuac-Xico**
Potenciales riesgos	• **El proyecto no se realiza el PHLTX.** • No proveer mecanismos de participación e información necesaria, clara y oportuna, a todos los actores, especialmente a los ejidatarios.

Recomendaciones	• Identificar a los pueblos indígenas del área de estudio y a sus representantes/lideres. • Revisar las bases jurídicas de la integración de la Contraloría, para asegurar el cumplimiento de los requisitos para ser Contralora o Contralor Ciudadano.

Fuente: Elaboración propia.

10. Pérdida y degradación del hábitat – Afectaciones a la flora y fauna local y pérdida de servicios ecosistémicos

Beneficios puntuales a nivel local	• **37 ha de humedales**
Recomendaciones	• Es importante generar una línea base e indicadores para monitorear y evaluar los impactos positivos o cambios no previstos en la biodiversidad, tanto en plantas como en animales de la zona. • Tener programas de manejo y conservación particulares para especies de importancia biológica o carismáticas.

Fuente: Elaboración propia.

11. Deterioro del paisaje

Beneficios puntuales a nivel local	• **Un lago limpio dominado por humedales**
Recomendaciones	• Podría ser interesante generar una serie de imágenes objetivos a nivel de paisaje para la sociabilización y sensibilización del PHLTX entre las y los ejidatarios y demás miembros de la comunidad.

Fuente: Elaboración propia.

12. Hundimientos diferenciales

Beneficios puntuales a nivel local	• **Disminuyen los hundimientos asociados a la extracción de agua subterránea a través de la batería de pozos del Sistema Mixquic-Santa Catarina (catorce pozos), ubicados en la parte central del lago, para abastecer de agua potable a la alcaldía de Iztapalapa**
Recomendaciones	• Es importante delimitar si en materia de hundimientos existen beneficios previstos por el PHLTX.

Fuente: Elaboración propia.

13. Inundaciones

Escenario tendencial	• **Se evitan inundaciones en las zonas urbanas de la alcaldía de Tláhuac durante la época de lluvias, así como en las zonas agrícolas aledañas al lago.**
Recomendaciones	• Es importante delimitar las zonas puntuales que se prevé tengan mejoras en el tema de inundaciones derivado de la implementación del PHLTX.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.6 Perspectivas interejidales y de la comunidad

"Si no les dices que va a haber beneficios económicos, te van a decir que no".
(Ing. Oscar, secretario del comisariado ejidal, San Juan Ixtayopan)

El ejido es un modelo de organización constitutivo de relaciones sociales, ambientales y económicas particulares resultantes de las demandas de la Revolución Mexicana, la propiedad social agraria. Actualmente, los testimonios recabados dan cuenta de que existen disputas por el territorio, divisiones intraejidales y la conformación de subgrupos de intereses convergentes, desconfianza de las autoridades ejidales y del gobierno, pérdida de interés en la agricultura, renta irregular de parcelas y falta de atención económica, política y sociocultural en el campo.

Esto sugiere que las modificaciones estructurales propias del modelo neoliberal implementadas desde hace tres decenios podrían haber impactado negativamente en las formas de organización comunitaria características de los pueblos originarios, misma que dio origen y sentido al proyecto ejidal. Por ejemplo, se identificaron factores ideológicos relacionados con la historia de los pueblos y de los proyectos no concluidos en la demarcación, por lo que, derivado del planteamiento y propuesta que ofrece el plan HLTX, muchos de los ejidatarios dejaron entrever una **visión ideológica negativa** al pensar este tipo de proyectos de desarrollo como meras especulaciones y justificación de recursos desde el gobierno para continuar con el sometimiento, empobrecimiento y una forma de discriminación (violencia estructural) por parte de sus gobernantes hacia ellos. Un aspecto muy importante es la opinión imperante entre los ejidatarios consultados, quienes señalan que la única vía para llegar a acuerdos con los ejidos es a través de la obtención de **beneficios económicos concretos**.

A pesar de lo anterior, todos los ejidos consultados, externaron su interés por el trabajo de la tierra y el modo de vida campesino, su beneficio económico directo y propio. Sin embargo, limitantes como la **falta de agua en los terrenos ejidales situados fuera de la poligonal del proyecto**, fueron señaladas como las problemáticas más graves, de mayor interés o que requieren mayor atención.

Dada la escasez del agua en la zona, puesto que buena parte de esta recibe dotaciones de agua potable a través del *tandeo*, en todos los ejidos consultados se señaló que, debido a la falta de agua para riego, es común la percepción de que a la población se le ha despojado del agua existente en las fuentes locales (por ejemplo, el caso de la batería de pozos Mixquic-Santa Catarina). Desde el punto de vista ejidal, el recurso hídrico no se distribuye ahí, sino que

se la llevan a zonas de clase media de la Ciudad de México, por lo que constantemente requieren de la compra de "pipas de agua" y esto genera un impacto económico negativo a los hogares.

Se reconoce la existencia de una dependencia crónica de la PTAR Cerro de la Estrella para el riego y la falta de agua de riego ha llevado a San Antonio Tecómitl a intervenir las tuberías de drenaje para regar las parcelas de hortalizas con aguas residuales crudas y el de San Juan Ixtayopan a demandar que las aguas negras de San Juan permanezcan en el ejido, con el fin de ser aprovechadas por el mismo. En ambos casos, se reconoce la necesidad de mejorar la infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales. Asimismo, las personas consultadas señalaron que el agua se usa como "*moneda de cambio*" de acuerdo con los intereses de los líderes políticos.

5.3.7 Evidencias ideológicas relacionadas con el PHLTX

Así bien, la intención de estas intervenciones y acercamientos a la comunidad de ejidatarios tuvo por objeto ir tejiendo redes de solidaridad, apoyo, voluntad política y comunitaria que demostrara la seriedad del proyecto, con el fin de generar los instrumentos jurídicos que garantizaran la certeza jurídica de las tierras mediante convenios de ocupación previa, temporal, así como acuerdos con los representantes comunitarios para el inicio de los estudios y obra de ingeniería en la zona. En este sentido, en la siguiente tabla se muestran las evidencias y las emociones que los ejidatarios expresaron durante el proceso de comunicación del proyecto HLTX, así como las representaciones y procesos de emosignificación[3] derivados de los frentes blancos (conceptos) efectuados con recurrencia en las reuniones.

Tabla 152. Evidencias ideológicas relacionadas con el plan HLTX

Concepto	Cadena de evidencias, representaciones y emo-significaciones
Agua	*Asociaciones positivas* Vital, vida, símbolo de identidad, alegría, tranquilidad, bienestar, abundancia, etc. *Asociaciones negativas* Carencia, incertidumbre, enojo, necesidad, pérdida de identidad, robo, indignación, desesperanza, tristeza, angustia, vulnerabilidad, etc.
Ejido	*Asociaciones positivas* Apego, recuerdo, añoranza, lucha, trabajo, identidad, solidaridad, vida, productividad, etc. *Asociaciones negativas* Pérdida, robo, inundación, miedo, incertidumbre, enojo, tristeza, vulnerabilidad, pobreza,
Tiro de cascajo	*Asociaciones negativas* Miedo, amenazas, perdida de su tierra, improductividad, perdida de su identidad, conflicto, violencia, etc.

[3] Vergara define emosignificación como: "La fusión de significación y emoción ya sea a nivel individual (exaltación, indignación, sumisión, etcétera) o colectivo (*communitas*, rencor social). No es un proceso que se genere conscientemente, generalmente puede ser *irruptivo* o permanente: la rabia frente a un abuso de poder o se puede habitar como tranquilidad que deviene del apego, la felicidad que deviene del amor. (Vergara, 2013, p.35).

Invasión de tierras	*Asociaciones negativas* Miedo, amenazas, perdida de sus terrenos, improductividad, conflicto, violencia, crimen, pobreza, inseguridad, vivencia de dolor.
Proyecto HLTX	*Asociaciones positivas* Esperanza, bienestar, abastecimiento de agua, rescate, apoyo, solidaridad, escucha, trabajo en conjunto, bienestar, proyectos comunitarios, recuperación de identidad, difusión de costumbres y tradiciones, reconocimiento, impacto regional, valores, herencia a nuevas generaciones, investigación comunitaria, ecoturismo, desarrollo económico. *Asociaciones negativas* Decepción, engaño, miedo, pérdida de tierra, falsas esperanzas, no concreción del proyecto, descontento, corrupción, compadrazgo, proselitismo, etc.

Fuente: Elaboración propia

Las problemáticas con mayor recurrencia expresadas en la comunidad fueron, la existencia de conflictos internos (o de manera local) provocados por la envidia o indiferencia entre los ejidos, falta de pertenencia a la tierra, apropiación sexo-genérica y su relación con el territorio, grupo etario y de parentesco. Por otro lado, los ejidatarios manifestaron un reclamo constante por el incumplimiento de las autoridades de gobierno, crimen organizado, práctica ilegal de tiro de cascajo, tandeo y escases de agua, entre otros.

De forma particular se presenció la división de la comunidad al existir un conflicto interno con relación a quienes serían los representantes del comisariado ejidal en San Pedro Tláhuac, provocando un incremento en la ruptura del tejido social y una pausa en los procesos de legitimación del proyecto ante los ejidatarios. También, se observaron las divisiones internas en cada una de las zonas en las que se efectuaron recorridos o reuniones, por ejemplo; inundaciones de agua negra en San Juan Ixtayopan, plantas de potabilización abandonadas, divisiones y conflictos ejidales derivados de relaciones de parentesco o reclamos por parte de pequeños propietarios pertenecientes al pueblo de Santa Catarina por no ser considerados dentro del proyecto HLTX.

Por lo tanto, se identificó que la comunidad se encuentra en una etapa o proceso en donde predomina la problemática surgida a partir de la división de poderes al interior de estas, la ruptura y desacuerdos con sus líderes, la mala información y gestión de anteriores administraciones gubernamentales en este tipo de proyectos y, por último, la presencia de un miedo constante por la pérdida de identidad.

Finalmente, en cuanto al tema de factibilidad del proyecto, durante las diversas reuniones para la presentación de informes de actividades por parte de las distintas componentes, así como de la experiencia en campo e investigación histórica y documental, se concluye que, en esta etapa del proceso indagatorio, el proyecto de la habilitación del lago Tláhuac Xico es factible no sin antes, recalcar en la importancia de continuar generando un proceso de colaboración entre la CONAGUA y el gobierno federal, el gobierno de la Ciudad de México y del Estado de México, las alcaldías de Tláhuac, Milpa Alta y Valle de Chalco, los ejidatarios y comunidad de la región con el fin de solucionar e impulsar el proyecto de “Habilitación y Aprovechamiento Integral del Agua en el Lago Tláhuac Xico” para su optima concreción.

Tabla 153. Factibilidad social y jurídica

Aspecto	Comentarios de la factibilidad y proyecto conceptual
Social	Los ejidatarios de los 7 ejidos sugieren que se aborde el tema hidroagrícola como principal beneficio y en sus comunidades quitar los “*tandeos*” del servicio de agua potable. Por lo que, se ha generado un Plan de Mejora Integral de la Región, con los ejidos de Tláhuac, Ixtayopan, Tetelco y Tecomitl, con diversas solicitudes

	técnicas y jurídicas de los ejidos, con la coordinación de SACMEX, CORENADR, CAEM y Conagua. Se ha recomendado la evaluación de impacto social, para la etapa del proyecto ejecutivo.
Jurídico	Se han sostenido reuniones con la Procuraduría Agraria y las autoridades del nivel federal y estatal para analizar las solicitudes jurídicas de los ejidos de Tláhuac, Ixtayopan, Tecomitl y Tetelco, con el objetivo de tener certeza jurídica en el lago y con los ejidos, y la viabilidad de generar convenios, expropiaciones o acuerdos públicos comunitarios con los ejidos.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Coordinación interinstitucional colaborativa

El agua comenzó a escasear en Tulyehualco debido a que se convirtió en uno de los principales abastecedores de este vital líquido a la ciudad de México. Desde 1907, fecha en la que se fundó el acueducto de Xochimilco a la metrópoli, se ha continuado prestando este servicio ininterrumpidamente.

Parece ser que hasta 1948 dejó de existir el ultimo manantial de agua llamado "la Morena". En esta misma época dejó de existir el manto de agua de Santa María, en él hay dos bombas conocidas como "la Barraca" y "los Paredones".

A finales de la década de 1940 se entubó el agua, poniendo en cada esquina una llave de agua o "hidrantes" para que abasteciera a varios vecinos conformados por cuadras y aun así los nativos tenían que hacer grandes filas y esperar su turno para poder acarear una y otra vez agua durante el día[4].

(Jiménez, R., 2005, p. 45)

"Orígenes y costumbres de Santiago Tulyehualco."

Durante los meses de diciembre a mayo, se realizaron 20 reuniones virtuales entre las componentes de normatividad y calidad del agua, plantas de tratamiento y potabilización, arquitectura del vaso, colectores y fuentes, social jurídico, geovisualizador y, restauración lacustre y ecológica; en algunas reuniones se incorporó y participo la secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México.

El objetivo de las reuniones fue el seguimiento de los acuerdos y actividades de las componentes del estudio; se decidió realizarlas los miércoles a partir de las 9:00 h, con base en un orden del día y al concluir se generaba la minuta de la reunión con los acuerdos generados.

También se realizaron reuniones presenciales, con restricción de asistentes por la pandemia COVID 19. En algunos casos, se realizaron recorridos de campo, en ocasiones en compañía de los comisariados ejidales.

[4] Ibid. pp. 44-45



Figura 227. Recorrido de campo con CORENADR, para el tema de infraestructura hidroagrícola. Fuente: fotografía propia, mayo de 2022.

5.4.1 Reunión de Estrategias Integrales frente a necesidades de Ejidos Ixtayopan, Tetelco, Tecómitl y Tláhuac

El viernes 13 de mayo del año en curso, se realizó una reunión interinstitucional convocada por la coordinación del proyecto de HLTX, el cual conto con la participación de la Subdirección General de Administración del Agua, Subdirección General de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México de la Comisión Nacional del Agua, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural de la Ciudad de México y la Comisión de Aguas del Estado de México, con el objeto de analizar las solicitudes, por lo que se generaron los siguientes acuerdos estratégicos por tema:

Agua potable:

I. CORENADR organizará una reunión con OCAVM y las autoridades de los Ejidos de San Pedro Tláhuac y de Tulyehualco, para llegar a acuerdos en cuanto a cómo cumplir con sus necesidades de agua potable a cambio de la liberación del Pozo 11 del ramal Mixquic-Santa Catarina, ubicado en tablas 14-1, 14-2 del Ejido de San Pedro Tláhuac. Dado que el agua del Pozo 11 requeriría de potabilización, se está proponiendo otra alternativa. Fecha: mayo 2022.

II. Sacmex reportará los avances hacia adquisición de un terreno para reemplazar la potabilizadora de Tetelco, dado que la actual no puede ponerse en marcha por problemas con el patente.

Saneamiento y agua para riego:

3. CorenaDR, Sacmex, OCAVM y SGAPDS elaborarán los Términos de Referencia para un proyecto integral de saneamiento y riego, a gestionarse como parte del proyecto integral de saneamiento y potabilización, para lograr el tratamiento y reúso del 100% de las aguas residuales disponibles en la zona, con el fin de extender al máximo el número de hectáreas bajo riego, retomando los logros de CorenaDR durante esta administración.

- La SGAA organizará una mesa de trabajo con la CAEM y la Propaem para acordar acciones a tomar frente a las descargas de aguas residuales al Río Amecameca del reclusorio de Chalco y de la base militar en Temamatla.
- SACMEX programará una visita a las PTAR del La Lupita, El Llano y Mixquic para evaluar requerimientos para su rehabilitación.
- CORENADR convocará a los ejidos de Tecómitl, Tetelco e Ixtayopan para llegar a acuerdos en cuanto al flujo y uso óptimo de aguas residuales en torno a la PTAR El Llano.
- Se realizarán los ajustes requeridos en los actuales TdR para poder contar con por lo menos 400 L/s para riego a través de estrategia descentralizada y 750 L/s agua potabilizada.
- Se incluirá en los términos de referencia el proyecto de la red de riego hidroagrícola por goteo como solicita Tetelco

Infraestructura hidroagrícola:

- La Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola analizará la propuesta de crear unidades de riego en la región, y compartirá una copia del plan rector de infraestructura hidroagrícola del ejido de Tulyehualco realizado en el año 2004 por Conagua.
- CorenaDR junto con Hidroagrícola de Conagua realizará una estimación inicial del costo por hectárea de tecnificación de riego a nivel parcelario, como parte de la estrategia de buscar que 100% de las parcelas en la zona cuenten con agua para riego.

Caminos:

4. OCAVM organizará una reunión con el Ejido de San Juan Ixtayopan para permitir el uso del camino de pozos desde Paso del Toro para el acceso a sus tierras de ampliación.

Infiltración de aguas pluviales:

5. Sacmex se acuerda realizar visitas de inspección para programar las obras de rehabilitación de las pozas de captación de agua de lluvia en Tetelco y Tecómitl. Fecha: mayo 2022

5.4.2 Construcciones dentro de la zona del Santuario del Agua

La zona se encuentra al norte del lago Tláhuac – Xico, en tierras del ejido de San Juan Ixtayopan. Alrededor de 52.20ha dentro del municipio de Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México



Figura 228. Ubicación de las construcciones dentro de la zona Santuario del Agua.



Figura 229. Construcciones dentro de la zona Santuario del Agua.

Este estudio se llevó a cabo con base en la identificación de predios por medio de una ortofoto de un vuelo fotogramétrico de dron con fecha de febrero de 2022.



Figura 230. Ortofoto de la zona de invasión de febrero 2022.

Una **manzana** es un conjunto de predios, viviendas y construcciones que es perfectamente rodeable por cualquier medio de transporte, ya sea a pie o automóvil.

En la zona de estudio se encuentran **66** manzanas dispuestas en filas de **11** hileras en **6** bloques. Con un promedio de **4,28**4 m^2 de superficie



Figura 231. Acercamiento de ortofoto de la zona de invasión de febrero 2022.

Tabla 154. Resultados de análisis de manzanas y superficies en zona de invasión

Tipo	Número de manzanas	superficie en m^2
Amanzanamiento	66	282,755

Barda perimetral: Construcción que solo demarca el predio.



En construcción: Predios en proceso de obra



Vivienda: Construcción que muestra señales de ocupación. Tinacos conectados, lavaderos, tendederos de ropa, aseo de patios, etc.



Tabla 155. Resultados de la clasificación de las construcciones

Clasificación de construcción		
Tipo	**Número de predios**	**superficie en m^2**
Barda perimetral	72	13,831
En construcción	242	32,178
Vivienda	149	21,620
Total general	463	67,629

En construcción pared de ladrillo



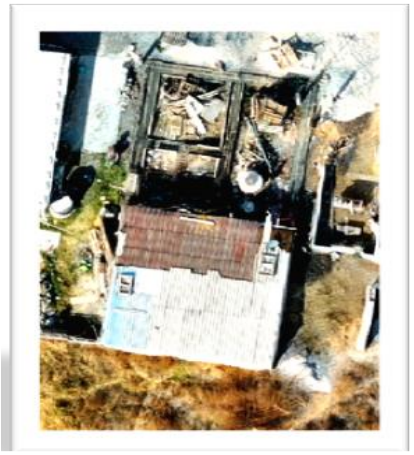
En construcción
solo cimientos



En construcción con techo de concreto finalizada



En construcción con techo de lámina



Vivienda techo de concreto



Vivienda techo de lámina



Tabla 156. Resultados del análisis de los predios de acuerdo al tipo y material

Tipo	Material	Número de predios	superficie en m^2
En construcción	Solo cimientos	24	3,290
	Techo de concreto	4	509
	Techo de concreto finalizado	39	5,257
	Techo de lámina	33	4,067
	Pared de ladrillo	101	13,166
	Provisional	41	5,889
Vivienda	Techo de concreto	57	9,222
	Techo de lámina	91	12,282
	Plástico	1	116

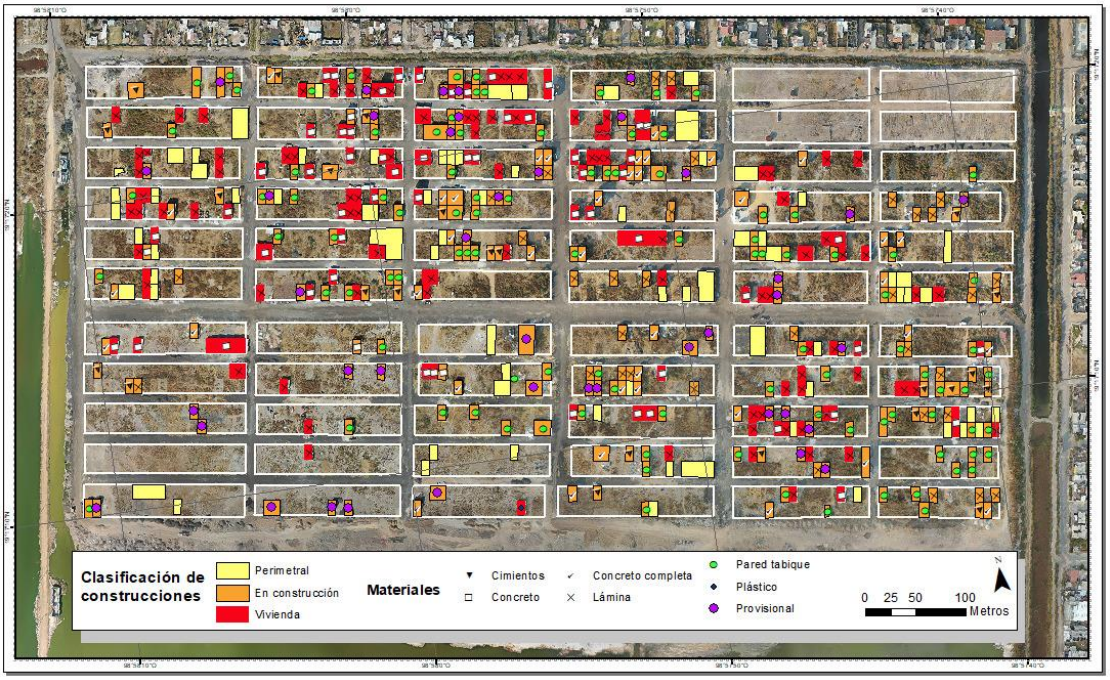


Tabla 157. Resultados del análisis de los predios de acuerdo al tipo y material

Recomendaciones, verificar la clasificación de predios de techo de concreto completo (39) y techo de lámina (33), dado que ya pueden presentar señales de que son habitadas actualmente. Esto puede ser con otro vuelo en la zona, si se tienen los insumos de Modelo Digital del Terreno se puede extraer el números de niveles que tienen las construcciones

5.4.3 Programación de acciones inmediatas

Las acciones inmediatas consisten en detener el tiro de cascajo en la zona norte del lago Tláhuac Xico, específicamente, en los ejidos de Ixtayopan, Tecomitl y Tetelco.



Figura 232. Planteamiento de las acciones inmediatas

Se estima un presupuesto de 45 millones de pesos, los cuales se han autorizado para su ejecución por parte de la Comisión de Aguas del Estado de México, por parte del Fideicomiso 1928.

NUM	CONCEPTO	TOTAL (MDP)	TIEMPO (MESES)			
			1	2	3	4
1	CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONTROL Y VIGILANCIA	0.4				
2	DESAZOLVE Y RECTIFICACIÓN DEL CUCE DEL CANAL	10.8				
3	RETIRO DE MATERIAL NO APROVECHABLE	4.5				
4	EXCAVACIÓN PARA CANAL Y AFINE DE TALUD	6				
5	REFORZAMIENTO DE BORDO DE PROTECCIÓN EN TRAMO DIVISORIO DEL CANAL GENERAL Y LAGUNA DE XICO	17				
	SUBTOTAL	38.7				
	IVA	6.2				
	TOTAL	44.9				

Figura 233. Presupuesto de acciones inmediatas

Actualmente, la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, junto con la Policía Estatal del Estado de México han frenado el tiro de cascajo, la invasión y fraccionamiento de las tierras de San Juan Ixtayopan, San Antonio Tecomitl y San Nicolás Tetelco.

El problema de tiro de cascajo se da en otras partes de la región del municipio de Valle de Chalco Solidaridad y Chalco del Estado de México.



Figura 234. Tiro de cascajo en los municipios de Valle de Chalco Solidaridad y Chalco.

Es preciso comentar que algunos de estos tiros se están realizando dentro del polígono del parque natural “Santuario del Agua Lagunas de Xico” del Estado de México.

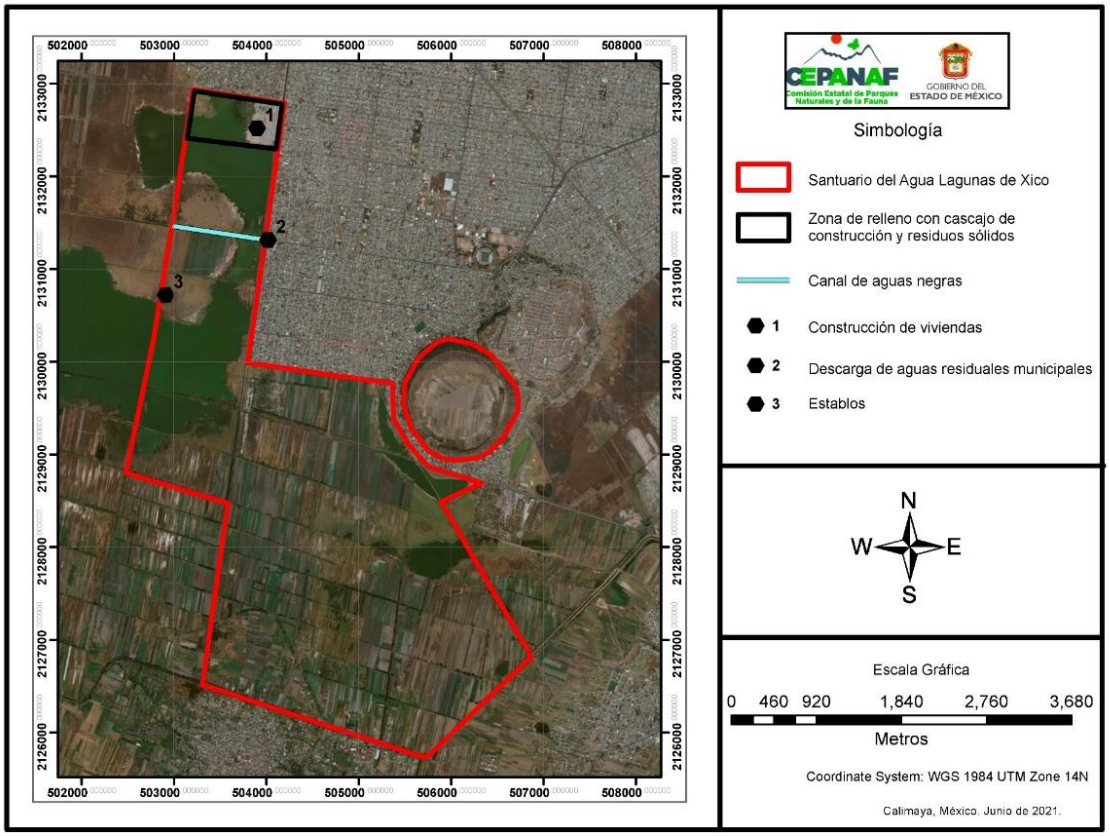


Figura 235. Santuario del Agua Lagunas de Xico

La coordinación del proyecto con las mesas de trabajo de seguridad, continúan, con la participación de los tres niveles de gobierno. Es un reto complicado, pero poco a poco se están recuperando estos espacios lacustres y agrícolas para su conservación.

5.5 Plan de Mejora Integral de la Región

"las lluvias se van y no se están recuperando los acuíferos, ya no se filtran gradualmente, ya alguna vez nos han llegado aguas turbias" (Participación en reunión del 01 de abril de 2022).

Una persona de edad avanzada comenta que cuando él era joven, muchas personas del pueblo lo catalogaron de loco por decir: "La tierra que posee el Tehutli es "oro", porque filtra tan rápidamente el agua y de una manera tan limpia, que el día en que se pavimente todo ese cerro dejará Tulyehualco de abastecer agua". Tal vez sea cierto, tal vez no, pero quizás sea la única explicación lógica por la cual existía tanta agua y actualmente siguen abasteciendo algunos pozos construidos. (Jiménez, R., 2005, p. 48) "Orígenes y costumbres de Santiago Tulyehualco."

En lo que respecta al Plan de Mejora Integral de la Región (PMIR), se incluyen las solicitudes de los 4 ejidos; solicitudes que se están coordinando con SACMEX, CORENADR, instancias agrarias federales y estatales, para tener resultados al corto plazo y fortalecer la confianza con las autoridades. Es un instrumento colaborativo interejidal e interinstitucional entre el gobierno federal, de la Ciudad de México y del Estado de México.

5.5.1 Solicitudes técnicas

Actualmente en la Conagua se han establecido criterios del ciclo de proyectos, mediante las fases de estructuración que incluyen los estudios de preinversión hasta la factibilidad, posteriormente la fase de inversión que contiene la etapa de diseño y construcción, y la fase de operación.

Ilustración 1.12 Diagrama del ciclo del proyecto

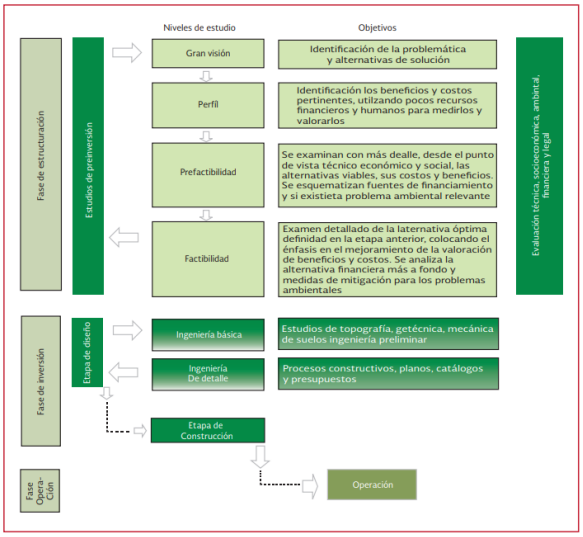


Figura 236. Ciclo de proyecto de Conagua. Fuente: Manual de Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento, libro 2.[5]

Por lo que, la mayoría de las solicitudes técnicas de los ejidos, están en la fase de estructuración. Ahora bien, con base en la reunión de coordinación interinstitucional, del viernes 13 de mayo, entre CORENADR, SACMEX, CAEM, SGAA, SGIH, SGAPDYS y OCAVM, se tiene la siguiente descripción por solicitud.

Tabla 158. Cartera de proyectos del PMIR, situación actual conforme al ciclo de proyectos

Solicitudes técnicas	Descripción de la situación del ciclo de proyectos
Ejido de San Pedro Tláhuac	
Suministro de agua del pozo 11, ubicado en tablas 14-1, 14-2, del ramal Mixquic Santa Catarina de OCAVM, al pueblo de San Pedro Tláhuac.	Fase de estructuración, estudio de preinversión, etapa de factibilidad. Se intentará lograr un acuerdo entre OCAVM y SACMEX, y los ejidos de Tláhuac y Tulyehualco.
Ejido de San Antonio Tecómitl	
Rehabilitación y mantenimiento de las obras de captación de agua de lluvia.	Fase de operación. Requieren mantenimiento, por lo que se realizarán las visitas para determinar las acciones de mantenimiento.
Apoyo para ingresar al programa Sembrando Vida, ya que mantienen el bosque que buscan reforestar.	Fase de estructuración, estudio de preinversión, etapa de factibilidad. Por definir a la autoridad competente entre la Ciudad de México y el gobierno Federal.
Una nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en Tecómitl “Barranca seca”, para uso agrícola o acceso a agua de la PTAR del Llano.	Fase de estructuración, estudio de preinversión, etapa de perfil. SACMEX, analizará la situación, dado que es un problema de inundaciones y saneamiento actual.
San Juan Ixtayopan	
Problema de inundaciones en el Barrio la Lupita que se resuelve con el bombeo de las aguas residuales a la PTAR El Llano. Con el SACMEX se tiene desde 2021 el convenio de ocupación previa a título oneroso para la planta de bombeo. Falta firmarlo. La indemnización es por $ 1,735,818 MN	Fase de inversión, etapa de diseño, ingeniería de detalle, ya que están ó estaban, con la firma de convenio para la liberación de un predio entre SACMEX y el ejido. SACMEX, revisará el tema, aunque también la situación del flujo considerado para la PTAR de Tláhuac de 400 L/s y el proyecto de restauración ecológica de la laguna II, al considerar 60 lps por la cuenca de Ixtayopan y las residuales del centro de Tláhuac.
Proyecto de parque ecológico y siembra en “La Mocha”. Se pide apoyo de vigilancia por parte de la Guardia Nacional.	Fase de estructuración, estudio de preinversión, etapa de factibilidad. El ejido está realizando una propuesta conceptual de parque ecológico, para proceder, y mantener sinergia con los objetivos del proyecto lago Tláhuac-Xico.
Posibilidad de acceso a sus tierras del lado norte, por el camino de operación de OCAVM en su cruce con la carretera Tláhuac a Chalco.	OCAVM, sostendrá una reunión con el ejido de Ixtayopan, para permitir el tránsito de ejidatarios de San Juan Ixtayopan.
San Nicolás Tetelco	

[5] https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro2.pdf

Rehabilitación de pozas para captar agua de lluvia en la zona montañosa.	Fase de operación. Requieren mantenimiento, por lo que se realizarán las visitas para determinar las acciones de mantenimiento.
Rehabilitación de una potabilizadora que se construyó ahí hace unos meses, pero, nunca ha funcionado. Proponen combinarlas junto con un pozo que no se usa por mala calidad de agua para producir agua potable.	Fase de operación. SACMEX comenta que está analizando la situación y propondrá en dado caso, alternativas de construcción de una nueva potabilizadora y la alternativa del ejido para su comunidad.
Solicitan la tecnificación de riego (por goteo) en las áreas agrícolas de su ejido.	Fase de estructuración, estudio de preinversión, etapa de prefactibilidad. En conjunto con el ejido se debe revisar la prefactibilidad del riego por goteo en la zona y tipo de siembra.
Llevar agua de Paso del Toro (de Cerro de la Estrella) a Tetelco.	Fase de operación. CORENADR comentó que existe la infraestructura hasta la zona chinampera de Tetelco, pero es insuficiente el agua.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las solicitudes de ODAPAS Valle de Chalco, aun no se concreta una reunión con la CAEM, para analizar las solicitudes y su viabilidad.

5.5.2 Peticiones jurídicas

Con respecto a las solicitudes jurídicas, se tienen las siguientes por parte de los ejidos de Tláhuac y Tecomitl.

Tabla 159. Situación de las peticiones jurídicas de los ejidos de Tláhuac y Tecomitl.

Solicitudes jurídicas	Situación actual
Ejido de San Pedro Tláhuac	
Ayuda en el proceso de parcelación. Ante tal situación, el Comisariado del 2016-2019 inicio el proceso de regularización de sus tierras con apego al artículo 56 de la Ley Agraria por medio de una empresa particular.	Actualmente está en proceso de generar una asamblea general para tomar la decisión de continuar o no con el proceso de parcelación, ante la negativa de parcelación por la autoridad agraria correspondiente.
Apoyo para resolver la invasión del predio de San Miguel de las Tablas, que forma parte de la ampliación de 1936.	Se les apoya en investigar la situación actual.
Ejido de San Antonio Tecómitl	
En la ampliación de 179.8 ha del año de 1936, se asignó a 21 ejidatarios más la parcela escolar dejando sin tierra a 168 ejidatarios con la promesa de una dotación federal. Este grupo se considera como un ejido aparte por lo que no tienen que sujetarse a la Asamblea General de Tecómitl.	Se les apoya en investigar la situación actual.
Al ejido le hacen falta alrededor de 800 ha de las 1,096 con que fueron dotadas en el año de 1924.	Se les apoyará en investigar el destino de esas tierras que fueron usadas para la urbanización de Tecómitl.

Fuente: Elaboración propia.

El PMIR, resulta estratégico para dar resultados al corto plazo con el objeto de fortalecer la confianza en las autoridades y la transparencia del PHLTX, con los núcleos ejidales y las comunidades. Por lo que la primera reunión interinstitucional con SACMEX y CORENADR, principalmente, ha dado resultados tangibles para la atención con los ejidos, y se debe mantener la continuidad de los acuerdos hasta concretar las acciones.

5.6 Concepción de proyectos ecoturísticos regionales

... El inicio de la década de los ochenta fue paradójico; por un lado, se llevó a cabo el sistema de extracción de agua del subsuelo a través de la batería de pozos Mixquic-Santa Catarina. Pero por otro, se dotó de agua tratada al pueblo para uso agrícola con agua proveniente del cerro de la estrella; de esta manera, los hombres que trabajaban en las fábricas regresan a las chinampas y al campo, con lo cual se prolonga la vida agrícola del pueblo. (Flores, R., 2016, p. 94).
"Mixquic. Su historia entre coyunturas (1895-2014)."

El componente social tuvo el reto de tejer diálogos y reuniones con actores, grupos, diseño de convocatorias y proyectos de abreviación de diálogos comunitarios alternos, dirigidos y a la espera de la aprobación institucional del ejido de Tláhuac para poder pasar al diseño comunitario ecoturístico. Ahora bien, desde una perspectiva de factibilidad económica, el proyecto de HLTX rebasa los estándares y necesidades de mercado, para convertirse en el centro de desarrollo sustentable y socioambiental de la región con características periurbanas y rural-urbanas.

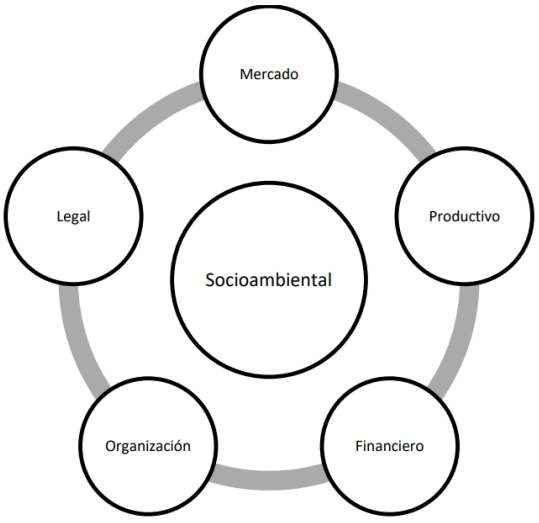


Figura 237. Proyecto ecoturístico socioambiental. Fuente: Elaboración propia.

Será factible en términos socioambientales si el sistema de mercado, productivo, financiero de organización, legal ponen al centro el desarrollo y el bienestar socioambiental.

5.6.1 Recomendación jurídica

Se propusó a elección de la asamblea general de cada ejido, la sociedad cooperativa o la sociedad de producción rural.

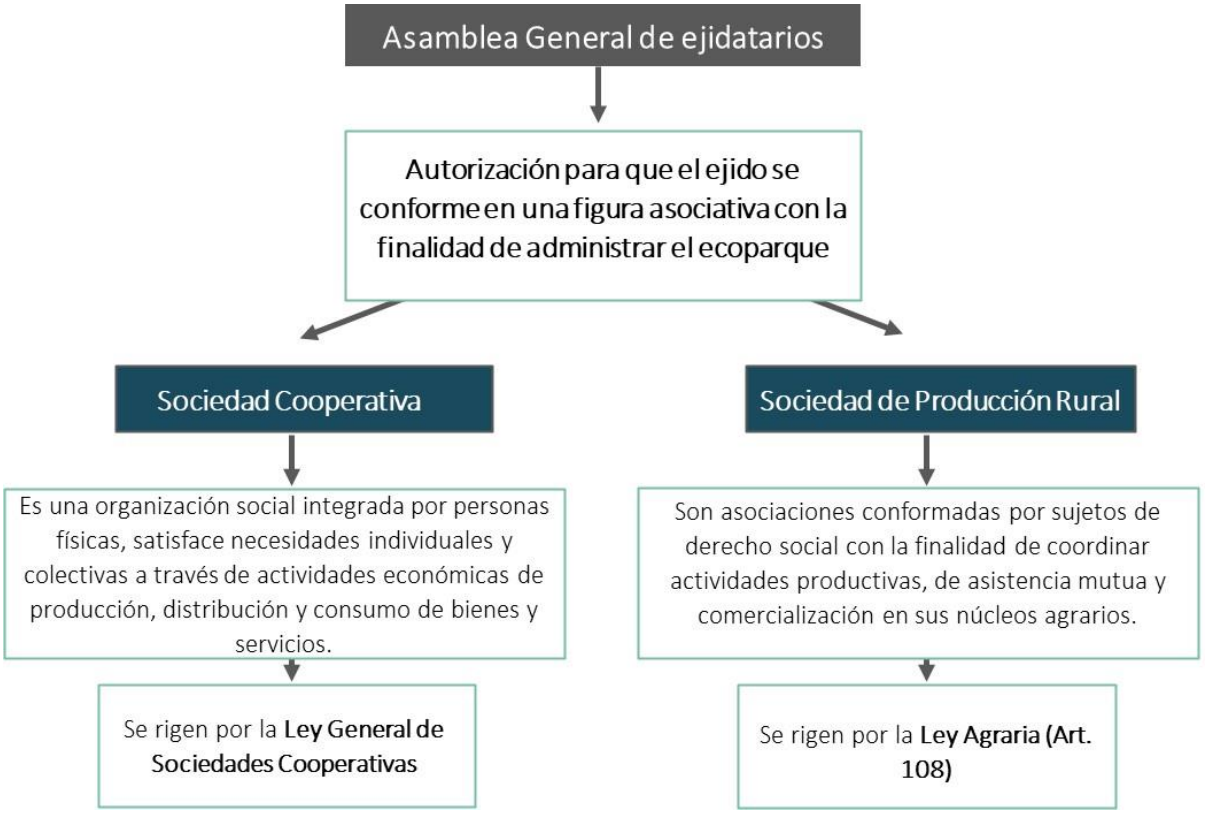


Figura 238. Propuesta de administración de ecoparque. Fuente: Elaboración propia.

Requisitos generales

1. Elegir tres posibles nombres para la razón social (Trámite en la Secretaría de Economía).
2. Establecer domicilio de la sociedad.
3. Celebrar asamblea para constituir la sociedad.
    - Aprobar la constitución de la Sociedad.
    - Elegir a las personas que integraran los Consejos de Administración
    - Aprobar las bases constitutivas de la Sociedad:
        - Duración de la sociedad
        - Establecer el objeto social
        - Régimen de la sociedad:
        - Los socios
        - Capital de los certificados de aportación
        - Los fondos sociales
        - Funcionamiento y de la administración de la cooperativa
        - Consejo de administración
        - Consejo de vigilancia
        - Disolución y liquidación de la sociedad

- Comisión de conciliación

5.6.2 Visión de proyectos productivos y ecoturísticos ejidales

5.6.2.1 Propuesta de ejidatarios de Tláhuac

La existencia de proyectos suele estar respaldados por otros colectivos y de las familias de manera esporádica. Un proyecto ecoturístico con identidad parcelaria podrá desarrollarse si en el marco de rehabilitación se logra que:

- Se fortalezcan las redes de apoyo esporádico y transiten a la construcción de redes de apoyo permanentes, con un programa canalizado que las consolide y permita incentivar la creación de otras.
- Promover la comunicación entre proyectos para tener un autoconocimiento y promover nuevas posibilidades para fortalecer la vida en el ejido.

Por ejemplo:

- En la tabla 12-3, es la siembra de dalias; en la tabla 2-4, es la siembra de maíz sin químicos y la conservación de semillas nativas. En ambas tablas se pueden instalar baños secos, palapas y unidades de observación de aves; y, en la tabla 30 sembrar hortalizas, pero hace falta el agua, rehabilitación de canales.
- En las tablas 14-2 y 14-1, que están inundadas, se podrá desarrollar paseos recreativos, observación de aves, paseo en trajinera, u otro tipo de embarcaciones como kajaks y canoas



Figura 239. Propuestas de proyectos productivos y ecoturísticos en el ejido de Tláhuac. Fuente: Elaboración propia.

Actualmente, estas propuestas carecen de la aprobación ejidal de Tláhuac, pero, se avanza en las propuestas de ejidatarios, acercando los conceptos para que el desarrollo del proyecto ejecutivo retome la participación de la asamblea ejidal.

5.6.2.2 Propuesta de ecoparque en “La Mocha”, ejido de San Juan Ixtayopan.

Con base en las necesidades y propuestas planteadas por los representantes ejidales de San Juan Ixtayopan dentro de un taller colaborativo se diseñó una **propuesta conceptual** de ecoparque en la ampliación del ejido de San Juan Ixtayopan.

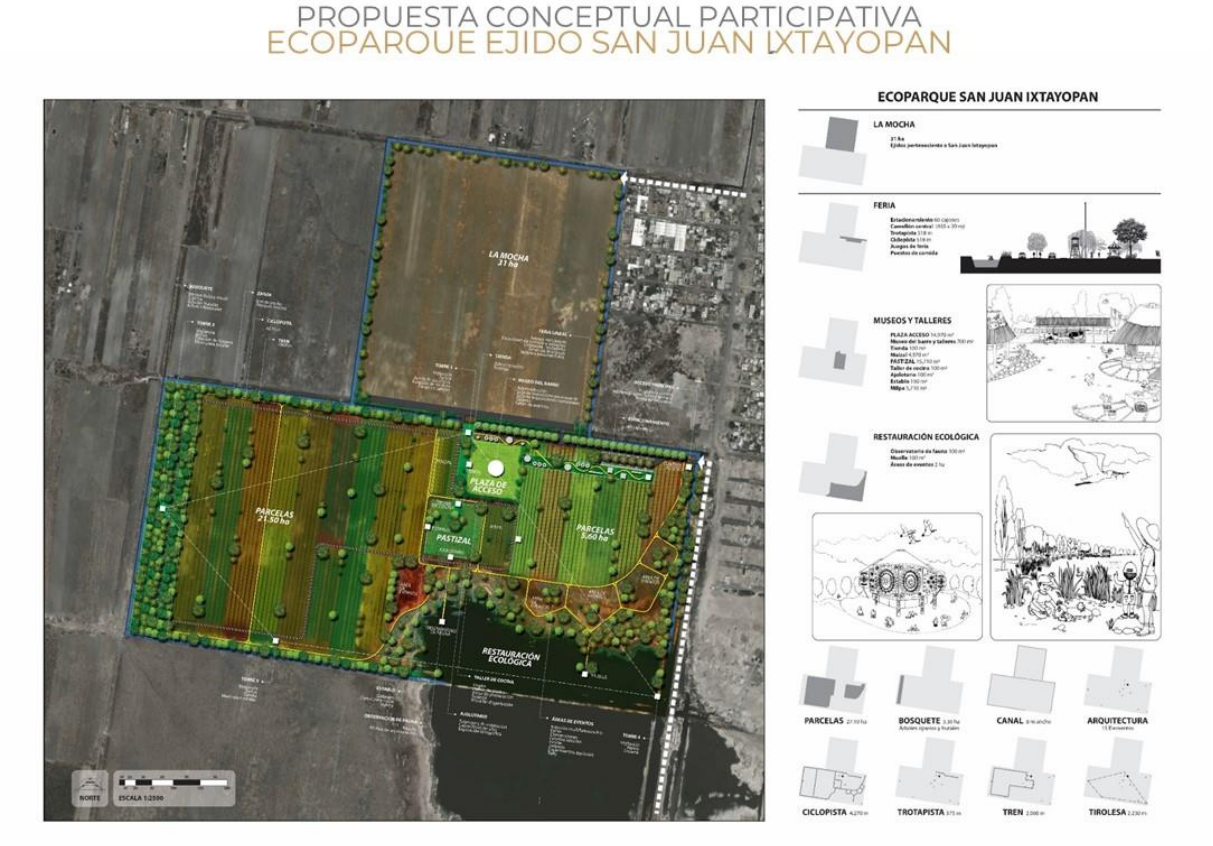


Figura 240. Propuesta de ecoparque en la ampliación del Ejido de Ixtayopan. Fuente: Elaboración propia.

Es el planteamiento ejidal más concreto, por lo que en la etapa de proyecto ejecutivo se debe desarrollar el mismo, para establecer el costo y tiempos de construcción.

5.6.2.3 Proyecto ecoturístico actual del ejido de San Nicolás Totolapan

El parque Ejidal San Nicolás Totolapan fue inaugurado en 1998, es una reserva natural de aproximadamente 2,300 hectáreas de bosque templado; es el lugar perfecto para admirar la naturaleza. Ubicado al sur de la ciudad, es un reducto de bosque donde se pueden apreciar imponentes encinares, pastizales y oyameles característicos del Ajusco. Es una iniciativa de los habitantes de la Magdalena Contreras y Tlalpan de hacer turismo de naturaleza de manera más respetuosa con el ecosistema[6].
El objetivo es detener el crecimiento de la mancha urbana, por lo que se habilitaron:

- 133 km de Senderos interpretativos
- 177 km de rutas de ciclismo de montaña
- Muro ecológico que separa el parque de las zonas urbanas y vialidades.

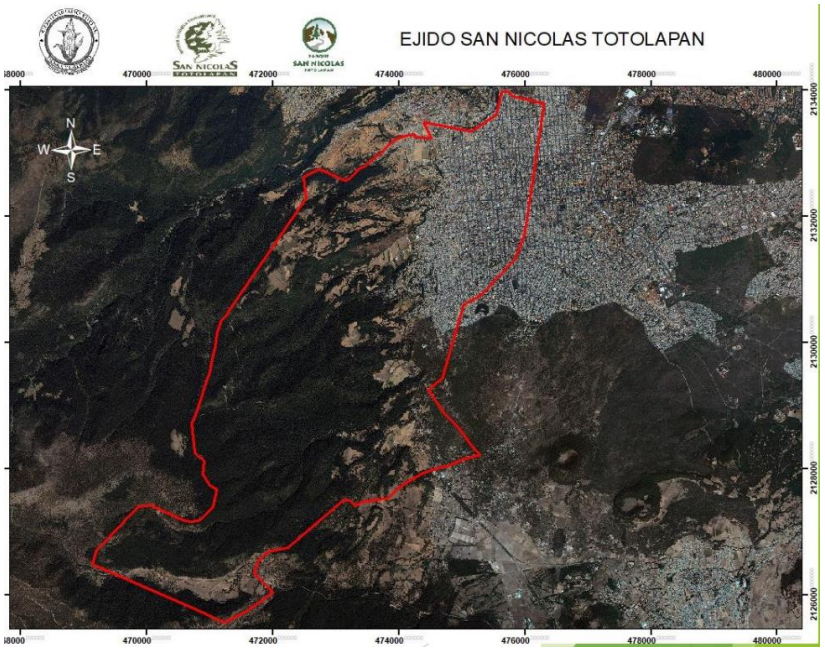


Figura 241. Mapa del ejido de San Nicolás Totoloapan. Fuente: Presentación del ejido

Actividades recreativas como tirolesa, campamentos, competencias de ciclismo y trail, laberinto de cedros, vivero forestal, reforestaciones, granjas didácticas, cabañas, pesca de trucha arcoíris, venadario, miradores, paseo en góndola, salón de usos múltiples.

[6] http://cdmxtravel.com/es/lugares/parque-ejidal-san-nicolas-totolapan.html



Figura 242. Actividades recreativas. Fuente: Presentación del ejido

- Obras de conservación de agua y suelo
    - Río eslava, presas de infiltración, protecciones marginales.



Figura 243. Estructuras de conservación de agua

Apoyo del programa "Altepetl" de CORENADR, para la prevención de incendios, conservación del suelo y el agua, vigilancia ambiental y reforestaciones.



Figura 244. Apoyo de CORENADR. Fuente: Presentación del ejido

5.7 Contraloría Ciudadana Autónoma del Agua

De 1948 a 1950 los canales de Tláhuac estaban secos y en Mixquic estaba "bajando el agua de modo alarmante. (...) Las chinampas al sureste de Tláhuac y cerca de iztayopa (sic) han quedado secas..." todo esto producto de la "falta de previsión en la política hidráulica" de la Ciudad de México.
(Flores, R., 2016, p. 78)
"Mixquic. Su historia entre coyunturas (1895-2014)."

5.6.3 Antecedentes

El 22 de marzo de 2017, se realizó con la presencia de diversos investigadores, el foro para el Diseño de la Contraloría Social del agua y una iniciativa ciudadana de ley de aguas de la Ciudad de México[7], con base en el siguiente objetivo:

"Contar con una instancia autónoma con arraigo comunitario y ciudadano, y sólidos fundamentos técnicos, para vigilar, transparentar, desprivatizar, democratizar y cambiar el modelo de manejo del agua en la Ciudad de México, con el fin de restaurar la cuenca y lograr el acceso equitativo y sustentable al vital líquido."

5.6.4 II. Marco jurídico de la contraloría

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos[8].

[7] http://world-psi.org/sites/default/files/publicacion_contraloria.pdf

Art. 4, párrafo quinto.
Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.

Observación 15 del Pacto Internacional de Derechos Económicos Sociales y Culturales (PIDESC) sobre el Derecho Humano al Agua[9].

El agua es un recurso natural limitado y un bien público fundamental para la vida y la salud. El derecho humano al agua es indispensable para vivir dignamente y es condición previa para la realización de otros derechos humanos. El Comité ha constatado constantemente una denegación muy generalizada del derecho al agua, tanto en los países en desarrollo como en los países desarrollados.

Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) sobre Pueblos Indígenas y Tribales en Países Independientes[10].

Para México, después de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos el Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) es el instrumento legal más importante que señala los derechos mínimos que tienen los pueblos indígenas. El Convenio núm. 169, sobre Pueblos Indígenas y Tribales, fue adoptado en Ginebra, Suiza, por la 76a. Conferencia Internacional del Trabajo, en junio de 1989.

Constitución Política de la Ciudad de México
Artículo 9. Ciudad Solidaria

F. Derecho al agua y a su saneamiento

1. Toda persona tiene derecho al acceso, a la disposición y saneamiento de agua potable suficiente, salubre, segura, asequible, accesible y de calidad para el uso personal y doméstico de una forma adecuada a la dignidad, la vida y la salud; así como a solicitar, recibir y difundir información sobre las cuestiones del agua.
2. La Ciudad garantizará la cobertura universal del agua, su acceso diario, continuo, equitativo y sustentable. Se incentivará la captación del agua pluvial.
3. El agua es un bien público, social y cultural. Es inalienable, inembargable, irrenunciable y esencial para la vida. La gestión del agua será pública y sin fines de lucro.

Artículo 26 Democracia participativa
Gestión, evaluación y control de la función pública
4. La ley establecerá los procedimientos y formas institucionales que posibiliten el diálogo entre las autoridades y la ciudadanía para el diseño presupuestal y de los planes, programas y

[8] https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf
[9] https://www.escr-net.org/es/recursos/observacion-general-no-15-derecho-al-agua-articulos-11-y-12-del-pacto-internacional#:~:text=El%20derecho%20humano%20al%20agua,como%20en%20los%20pa%C3%ADses%20desarrollados.
[10] https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2019-05/Folleto-Convenio-169-OIT.pdf

políticas públicas, la gestión de los servicios y la ejecución de los programas sociales. Entre otros, los de consulta ciudadana, colaboración ciudadana, rendición de cuentas, difusión pública, red de contralorías ciudadanas, audiencia pública, asamblea ciudadana, observatorios ciudadanos y presupuesto participativo.

TRANSITORIOS DEL DECRETO POR EL QUE SE EXPIDE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO EL 5 DE FEBRERO DE 2017
PRIMERO. – La Constitución Política de la Ciudad de México entrará en vigor el 17 de septiembre de 2018, excepto por lo que hace a la materia electoral, que estará vigente a partir del día siguiente al de su publicación, y a los supuestos expresamente establecidos en los artículos transitorios siguientes.
TRIGÉSIMO SÉPTIMO. - Con relación a lo establecido en el segundo párrafo, numeral 3 del artículo 61 de esta Constitución, la contraloría ciudadana para el organismo público encargado de la gestión sustentable del agua será integrada por usuarios y especialistas, en los términos de la ley de la materia.

CAPÍTULO I DEL COMBATE A LA CORRUPCIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO Artículo 61 De la fiscalización y el control interno en la Ciudad de México

> 3. La secretaría encargada del control interno será la dependencia responsable de prevenir, investigar y sancionar las faltas administrativas en el ámbito de la administración pública. Su titular será designado por las dos terceras partes de las y los miembros presentes del Congreso de la Ciudad de México, a propuesta en terna de la o el Jefe de Gobierno y podrá ser removido por ésta o éste, de conformidad con las causas establecidas en la ley; el Congreso podrá objetar dicha determinación por las dos terceras partes de sus miembros presentes. Esta secretaría contará con un área de contralores ciudadanos que realizarán sus funciones de forma honorífica, por lo que no percibirán remuneración alguna; serán nombrados junto con el órgano interno de control y coadyuvarán en los procesos de fiscalización gozando de la facultad de impugnar las resoluciones suscritas por los contralores internos que afecten el interés público.

Ley de Aguas del Distrito Federal[11]
TITULO SEGUNDO DE LA COMPETENCIA
CAPÍTULO I DEL SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO
Artículo 14.- El órgano de vigilancia del Sistema de Aguas estará presidido por un Comisario Público designado por la Contraloría General del Distrito Federal, de igual manera contará con un órgano de control interno cuyo titular será removido libremente por el Titular de la Contraloría General del Distrito Federal.

5.6.5 Integración de la contraloría ciudadana autónoma del agua, Lago Tláhuac Xico

El 18 de enero de 2022, se realizó una primera reunión virtual con investigadores de la Universidad Autónoma Metropolitana, con el objetivo de la explicación del proceso de conformación de la contraloría ciudadana y avances del proyecto de Habilitación del Lago Tláhuac-Xico. Participaron 22 personas con los siguientes acuerdos:
Con las participaciones vertidas en la reunión se elaborará una matriz de ámbitos de trabajo que se compartirá posteriormente entre los asistentes para su revisión y enriquecimiento, así como para que cada uno, localicé el ámbito al cual podría aportar.

[11] https://www.sacmex.cdmx.gob.mx/dependencia/marco-normativo

5.6.5.1 Segunda reunión de la CCAA, 03 de mayo de 2022

El Dr. Carlos Vargas, enfatizó en la relevancia que la contraloría ciudadana tiene en el proceso de consecución del proyecto HLTX y que como parte de la misma se debe tener presente la responsabilidad de realizar una vigilancia constante e incluso, proponer estrategias que logren un beneficio mutuo entre los organismos institucionales y la comunidad (por ejemplo, incorporar a individuos de la misma comunidad de ejidatarios para auscultar el proceso).

El Dr. Erick Aguilar y el Dr. Maqueda, éste último, habitante de la zona, mostraron su respeto al proyecto y se asumió con entusiasmo el impulso que Conagua tiene del proyecto al conformar la contraloría ciudadana sumado a la visión social y acompañamiento constante que han ejecutado como parte importante en la consecución del plan hídrico.

De la misma manera, la compañera Rebeca López aceptó contribuir en dicha causa y recalcó la importancia de rescatar este tipo de zonas. Por su parte, la Dra. Eloísa se sumó a este acompañamiento y propuso la creación de acciones específicas para comunicar en qué consiste la contraloría ciudadana a los habitantes de la región e investigadores de diversas áreas y así invitar a algunos para integrarse a la contraloría.

5.6.5.2 Aportación bibliográfica de un actor comunitario

El actor comunitario, Jesús Yépez Martínez, de Tetelco, se sumó a formar parte del proceso de vigilancia ciudadana que implica la realización del plan hídrico en la región y propuso la creación de una biblioteca híbrida y una videoteca en donde se resguarde el conocimiento, los saberes y las tradiciones de la región, contó su experiencia como promotor de cine comunitario en la región y externó la invitación a visitar el pueblo de San Nicolás Tetelco durante sus celebraciones religiosas sin olvidar -de igual manera- que la alcaldía Tláhuac en este año cumpliría 800 años de haber sido fundada.

En este sentido el Dr. Vargas, se ofreció a colaborar con la recopilación de documentos relacionados con la región para iniciar con la propuesta hecha por Jesús Yépez e invitó a no dejar de lado todo el trabajo hecho hasta el momento por lo que se reiteró la importancia de la participación de la Contraloría Ciudadana en el acompañamiento de las acciones que se pretenden efectuar una vez iniciadas las obras del plan hídrico.

Cabe resaltar que, durante los primeros meses de investigación se comenzó con la recopilación bibliográfica y material en campo derivado de las reuniones con grupos de ejidatarios, representantes ejidales, así como con autoridades de la alcaldía, promotores comunitarios de la zona y con la población en general de la demarcación, motivo por el que, al presente, se han recopilado más de 50 documentos de carácter académico y hecho una revisión general a éstos, se anexa listado. De igual forma, se hizo una exploración a textos localizados en la *web* que hacían referencia al pasado, presente, características socio-territoriales, económicas y políticas que directa o indirectamente aludían a la alcaldía de Tláhuac. Se anexa un listado, y se citan textos relacionados con el tema del agua en la región y la bibliografía física proporcionada.

5.6.5.3 Mesa temática, “Contraloría Ciudadana del Agua”, UAM-TUVCH

El 16 de mayo, se realizó un evento entre la Universidad Autónoma Metropolitana y el Tecnológico Universitario de Valle de Chalco. Inició con un recorrido en el lago Tláhuac Xico y concluyó con ponencias en el TUVCH, con participación de autoridades federales, estatales y de las alcaldías de Tláhuac y Valle de Chalco, así como de los ejidos de Tláhuac, Tulyehualco, Ixtayopan, Tecómitl y Tetelco.

Se realizó una mesa temática con el tema de la contraloría ciudadana autónoma del agua, con participación de ejidatarios. Participaron alrededor de veinte personas, y se acordó que dicha contraloría tendría continuidad con la coordinación del Dr. Pedro Moctezuma. Se convino vigilar la prolongación del proyecto ejecutivo, así como los compromisos de campaña de la Ciudad de México y, la incorporación de ejidatarios con previo acuerdo de asamblea ejidal.

5.6.6 Pasos a seguir

Con respecto a la contraloría ciudadana autónoma del agua, se tomó como referente la creada en la Ciudad de México, en el año 2017; a la fecha dicha contraloría se está renovando en cada uno de los ejes temáticos con diversos integrantes. En este caso, para el Lago Tláhuac Xico, se han generado tres reuniones: dos virtuales, y una presencial en un evento académico promovido por la Universidad Autónoma Metropolitana y el Tecnológico Universitario de Valle de Chalco, con el objeto de promover un equipo promotor de la Contraloría. El proceso de la contraloría se fortalecerá con la participación de ejidatarios y tendrán el objetivo de dar seguimiento al proyecto ejecutivo asignado a la Comisión de Aguas del Estado de México, en los próximos 6 u 8 meses.



Figura 245. Evento académico entre UAM – TUVCH. Fuente: fotografía propia.

5.7 Comunicación y difusión del proyecto HLTX

Sabemos que el agua es de primera necesidad, pero también sabemos que cada día es más escasa. Tomemos conciencia que ninguna persona va a solucionar problemas que nosotros desde casa no resolvemos, empezando con nuestros hijos y familiares dado que en muy pocos años
no tendremos ni agua ni alimentos.
(Jiménez, R., 2005, p. 48)
"Orígenes y costumbres de Santiago Tulyehualco."

5.7.1 Actividades de difusión del proyecto

Axolotl informativo. Como parte de la estrategia de comunicación se generaron historietas y folletos informativos para la comunidad y ejidatarios.

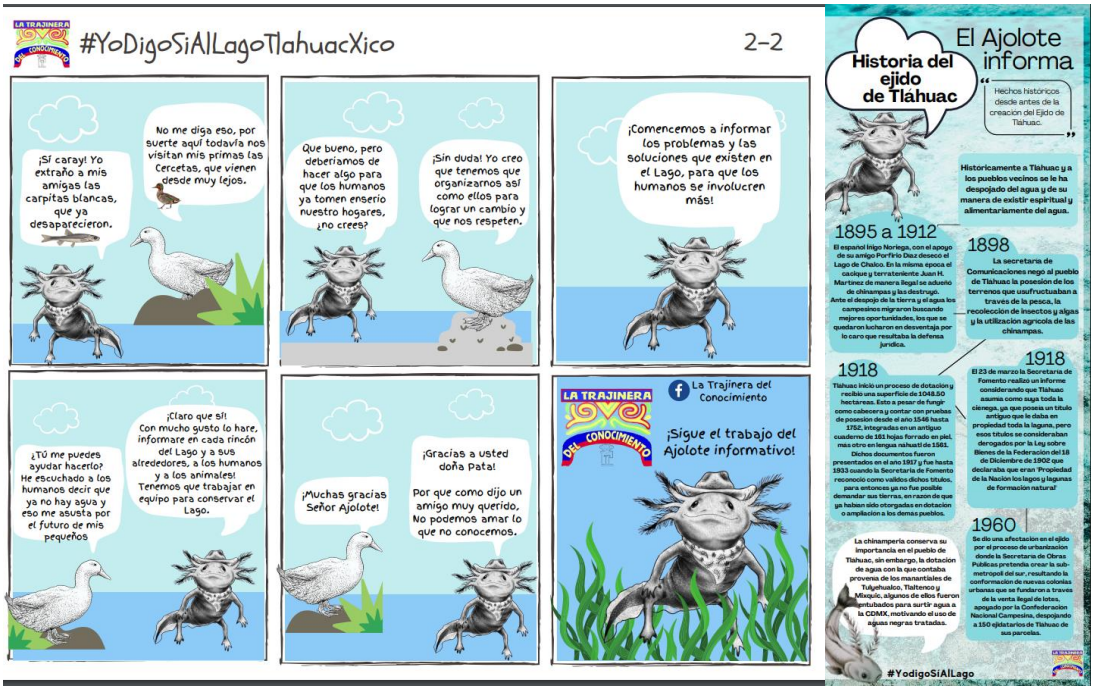


Figura 246. Historietas del axolotl informativo. Fuente: Elaboración propia.

5.7.2 Voces por el lago

La actividad "Voces por el Lago", fue un ejercicio de comunicación por medio de redes sociales que permitió una fotografía del momento de la vida campesina en el ejido de Tláhuac. Se han presentado en las jornadas públicas para la comunidad y ejidatarios, los siguientes investigadores:

- Dr. Baruc Martínez Díaz, "Una mirada histórica al nuevo lago de Chalco"
- Dr. Manuel Edday Farfán Beltrán, "Biodiversidad Lacustre: Invertebrados de importancia cultural y ambiental"
- Dr. Pedro Moctezuma Barragán "A 11 años del plan hídrico para la subcuenca, gestión comunitaria del agua".



Video grabado de la ponencia del Dr. Baruc Martínez Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=M6OdOz7hX5M&ab_channel=TRAJINERADELCONOCIMIENTOTL%C3%81HUAC

5.7.3 Redes sociales

Como parte de la estrategia de comunicación y acompañamiento para la generación de conocimiento para la toma de decisiones al respecto del proyecto, se elaboró un video[12] y materiales visuales, con los cuales se actualizó la página web para la difusión de los aspectos generales del PHLTX alojada el servicio de redes sociales digitales.

Una construcción participativa requiere de las condiciones de comunicación con la comunidad ejidal y en ese proceso de interacción le anteceden los técnicos para que la comunidad ejidal, en un futuro, tome las decisiones de dar su aprobación y en esa condición primordial trabajar participativamente en la apropiación de la HLTX.

[12] El video puede visualizarse en https://fb.watch/d5hUQ2m2mi/



Figura 247. Vista de la página en redes sociales "Yo digo Sí al lago Tláhuac Xico"

5.7.4 Presentaciones públicas del proyecto HLTX

Los sábados 21 y 28 de mayo, se realizaron presentaciones públicas en el pueblo de San Antonio Tecómitl, en el auditorio de la casa de cultura “Olla de piedra”, con la participación de ejidatarios y público en general. La presentación la realiza personal de la Comisión Nacional del Agua, y el objetivo es tener un espacio para consulta de las dudas y sugerencias de la comunidad. En ambas sesiones el espacio de preguntas y respuestas se excedió por un par de horas, son diversas las dudas, pero la voluntad de los ponentes respondió cada uno de los cuestionamientos.

El objetivo es continuar los foros sabatinos en cada ejido, por lo que es muy probable que la siguiente presentación sea en el auditorio del ejido de San Pedro Tláhuac.



Figura 248. Presentación pública del PHLTX Fuente: fotografías propias.

5.8 Conclusiones y recomendaciones

… la coyuntura que pone en peligro la sustentabilidad de la agricultura se abre como continuidad del proceso iniciado en 1895. Ahora no hay nada escrito; corresponde a las generaciones que confluimos en este tiempo enfrentar este nuevo reto. Sirva esta investigación para tener un poco más de claridad y conciencia histórica, y no hacer nuevamente del olvido una actitud de adaptación. (Flores, R., 2016, p. 118).

5.8.1 Conclusiones

- Los ejidatarios se muestran renuentes a que la comunidad en general participe en decisiones que tienen que ver con el ejido. Esto hace necesaria una estrategia que vincule al ejido con la comunidad para que pueda haber una participación comunitaria en la recuperación del lago.
- La recuperación de la vocación agrícola del suelo puede ser una estrategia que permita lidiar con algunos de los problemas que aquejan al ejido. Por ello es importante el compromiso para la dotación de agua para riego y proporcionar apoyo para la siembra, esto último incluye maquinaria: tractor, arado, etc., ya que el ejido de San Pedro Tláhuac no cuenta con ella y tienen que contratar a particulares para realizar esas labores.
- La certificación del ejido es una alternativa que no es vista como una amenaza y que es resultado de la debilidad socioambiental del ejido por una historia de agravios y divisiones al interior de su comunidad.
- La rehabilitación del lago pone al centro la tradición y su continuidad como axiomas de sustentabilidad.

- El proyecto ecoturístico será factible si el diseño descansa en la memoria campesina, los proyectos y las subjetividades comunitarias que potencien el desarrollo más allá de su dimensión económica.
- Es necesario la organización comunitaria para seguir visibilizando los proyectos existentes en el ejido alrededor del lago principalmente usando las redes sociales.
- La actividad agrícola es un complejo de simbolismos, conservación que son una fortaleza para un proyecto ecoturístico.
- El museo de la memoria zapatista y las prácticas de economía solidaria ofrecen esos espacios de tradición e innovación.
- El agua para riego del proyecto HLTX es una oportunidad de desarrollo sustentable de la región.
- Será importante vincular a las jóvenes generaciones al territorio lacustre y ejidal como espacio de producción de conocimiento para producir sus propios investigadores comunitarios.
- Otro atractivo turístico será el que el ejido se convertirá en el espacio de la autonomía y soberanía alimentaria de la zona metropolitana del Valle de México.
- Las problemáticas sociales y ambientales de los ejidos involucrados en el PHLTX son diversas, siendo de las problemáticas comunes y más importantes entre los ejidos, la escasez de agua potable en los hogares y para riego agrícola. No obstante, estas problemáticas se presentan en otras áreas del ejido y no en las ampliaciones.
- La factibilidad del proyecto dependerá de que se delimiten concretamente los impactos positivos del PHLTX, en particular los beneficios económicos directos. Así como los beneficiarios de los mismos.
- El desconocimiento entre los representantes de los ejidos de la normatividad agraria y la falta de adecuada asesoría de las autoridades agrarias competentes ha derivado en la continuidad de antiguos conflictos agrarios. Por lo que, los conflictos preexistentes dentro de los ejidos, intereses contrapuestos y la falta de cohesión pueden constituir un obstáculo para llegar a acuerdos con los ejidatarios.
- El ambiente de desconfianza entre los ejidatarios hacia las autoridades gubernamentales, derivado del incumplimiento de propuestas de proyectos y de la falta de consideración de su participación en la planeación de proyectos que afectan directamente su territorio, hace fundamental la necesidad de proporcionar información adecuada.

5.8.2 Recomendaciones

El 25 de enero de 1950 llegó un mensaje a la presidencia de la República que decía:
C. Presidente de la República
Agotadas (las) gestiones ante (la) Secretaría (de) recursos hidráulicos (con) objeto (los) poblados de Tetelco y Tezompa participen agua a poblado (de) Mixquic, rogamosle (sic) su intervención ante dicha Secretaría (a) fin de que hágase justicia, (de) lo contrario (será de) lamentarse choques sangrientos.
Respetuosamente (el) secretario general CENECE.
Profesor. Roberto Barrios
(Flores R., 2016, p. 78)
"Mixquic. Su historia entre coyunturas (1895-2014)."

- Estimular y fortalecer la participación comunitaria al interior del ejido de manera permanente hasta la aprobación del proyecto, a través de mesas de información, redes sociales, carteles, sitio web, etc.
- Crear y reforzar lazos con la comunidad, para ello se sugiere trabajar en la reactivación de la figura administrativa dentro de la comisaría que tiene la función de dar seguimiento a las relaciones con la comunidad.
- Crear una comisión para establecer convenios sobre el manejo del agua procedente de las plantas de tratamiento, conformada por miembros activos del ejido y de las instituciones.
- Crear mesas de negociación por ejido con conocimiento de la asamblea para dar seguimiento al proyecto de la infraestructura hidroagrícola y su problemática actual.
- Abrir la posibilidad de la compensación económica de los que tienen tierras inundadas y tierras de ocupación ya que la certificación es una alternativa mayoritaria entre ejidos para hacerse de recursos o una vivienda. Como una manera de ir rehaciendo el agravio que históricamente han padecido el pueblo de Tláhuac es el pago por la afectación productiva a las tierras inundadas.
- Asignar tres personas por ejido para trabajos de difusión.
- Trabajar en los demás ejidos el diagnóstico y diseño de proyectos.
- Plantear la propuesta conceptual del proyecto ecoturístico en términos de mejora de ingresos y condiciones de medio ambiente.

5.8.3 Recomendaciones interejidales

Desde hace tiempo, el 28 de junio, a San Pedro le piden y agradecen por el agua los canoeros y chinamperos del lago de los Reyes, rindiéndole una ceremonia donde pasean la efigie del Santo por la chinampera de Tláhuac, seguida de una procesión de trajineras. La fiesta de San Pedro está ligada a la fiesta de San Juan, el Bautista, a quien también se le relaciona con las aguas. el día de San Juan, hace unos cincuenta años, se hacía la "sanjuaneada". Era una fiesta sobre las canoas donde tocaba la orquesta en medio de la Laguna, bailaba la gente teniendo como pista el piso de las canoas, y otros se zambullían con acrobáticos clavados.
(Rodríguez, M., 2016, p. 79).
"Mitos y cuentos de Tláhuac, Milpa Alta y Xochimilco: Patrimonio Inmaterial de la humanidad."

Las conclusiones y recomendaciones se tornan principalmente en recuperar la confianza de los 7 ejidos: San Pedro Tláhuac, San Juan Ixtayopan, San Nicolas Tetelco, San Antonio Tecomitl, San Francisco Tlaltenco, San Andrés Mixquic y Santiago Tulyehualco, con las instituciones, con acciones concretas y realizadas al corto plazo. Este proyecto representa un cambio de paradigma hídrico histórico; la "Habilitación y Aprovechamiento Integral del Agua en la Región", el cual, durante 6 u 8 meses en que se desarrollara el proyecto ejecutivo, considerara iniciar con los procesos de construcción a inicios del próximo año.

En este sentido, durante el proyecto ejecutivo, se tiene una oportunidad para continuar con el trabajo colaborativo con los ejidos y comunidad de la región, aunado a las siguientes recomendaciones específicas por ejido:

- Dar seguimiento a los acuerdos estratégicos integrales para hacer frente a los ejidos de Tláhuac, Ixtayopan, Tecomitl y Tetelco.

- Generar los convenios de ocupación temporal con los ejidos de Ixtayopan, Tecomitl y Tetelco, para la ejecución de las acciones inmediatas.
- Identificar los planteamientos colaborativos con los ejidos de Tetelco, Tlaltenco, Tulyehualco y Mixquic.
- Dar continuidad y complementar el plan de mejora integral de la región, con acciones concretas al corto plazo, para construir confianza con la actual forma de gobierno a los ejidos.
- Atender las aspiraciones y expectativas, mediante los proyectos conceptuales que se identificaron de los ejidos de Tláhuac, Ixtayopan y Tecomitl.
- Fortalecer el análisis jurídico con la aprobación y solicitud de los ejidos.
- Trabajar en conjunto con los ejidos el tema de proyectos ecoturísticos y productivos agrícolas.
- Informar los avances del proyecto ejecutivo por ejido, y al menos cada mes, de preferencia de forma presencial en las oficinas de los ejidos.
- Realizar las reuniones pertinentes con el núcleo ejidal y ejidatarios, de Tláhuac, Ixtayopan, Tecomitl y Tetelco, para solicitar el acceso del equipo técnico durante el tiempo de la ejecución del proyecto ejecutivo.
- Fortalecer la unión interejidal en la región.

San Pedro Tláhuac.

a) Se recomienda que Conagua, retome la comunicación con el ejido de Tláhuac y se realicen las mesas de trabajo para identificar las aspiraciones y expectativas.

San Juan Ixtayopan.

b) Realizar el proyecto ejecutivo de la propuesta de parque ecoturístico la mocha y la ciclopista.

San Antonio Tecomitl.

c) Atender el proyecto de nueva PTAR, ya que la PTAR de el Llano se ve muy complicado, y mitigar las inundaciones.

San Nicolas Tetelco.

d) Es importante iniciar el trabajo colaborativo para identificar sus expectativas con los ejidatarios.

Santiago Tulyehualco

e) Al momento, es el ejido con mayor actitud proactiva para el proyecto del lago Tláhuac-Xico. Es importante atender e integrar sus planteamientos al corto plazo, como la construcción de puente que cruza el canal general, etc.

San Andrés Mixquic

f) Es muy importante informar del proyecto, ya que serán beneficiarios del agua para riego.

San Francisco Tlaltenco

g) Se ha informado de forma indirecta, pero no tenemos hechos relevantes de su postura proactiva o de rechazo, frente al proyecto.

Municipio de Valle de Chalco Solidaridad

h) Dar continuidad al análisis de las peticiones con la CAEM.

Alcaldía de Tláhuac.

i) No se ha tenido algún acercamiento en temas de agua potable, Alcantarillado y saneamiento, dado que SACMEX es el organismo operador, pero es importante reunirse con la alcaldía para identificar su postura proactiva o de rechazo al proyecto.

Comunidad en General

j) Plantear una estrategia de comunicación del proyecto de HLTX, de grupos sociales organizados y en puntos de encuentro de la comunidad.

Capítulo 6

Geovisualizador

Geovisualizador

6.1 Introducción

http://172.29.151.29/geovisualizador/index.php

En los últimos años, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha tendido hacia la implementación de geovisualizadores. Un geovisualizador es una herramienta para la exploración visual, el análisis, la síntesis y la presentación de datos geoespaciales. Esta herramienta integra información geográfica que permite explorar datos geoespaciales y, a su vez, la exploración permite generar hipótesis, desarrollar soluciones de problemas y construir conocimiento.

En este caso, el geovisualizador de Tláhuac-Xico ha sido implementado en servidores de CONAGUA, los cuales son administrados por el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Éste está compuesto por bases de datos a nivel de Región Hidrológica Administrativa (RHA), con las cuales se conforman las capas base del geovisualizador de la Cuenca del Valle de México y a nivel microcuenca.

La herramienta muestra información del proyecto conceptual y la propiedad social, así como la descripción de la zona e información técnica generada por el proyecto, ésta se obtuvo de trabajo de campo, de bases de datos de CONAGUA y de otras dependencias que participan en el proyecto. La información se organizó y estructuró con el apoyo de tres especialistas: uno en campo realizando actividades de mapeo comunitario, geolocalización y registro fotográfico, otro programando la plataforma y uno más administrando las bases de datos. Los dos primeros trabajaron de febrero a abril del 2022 y el ultimo de febrero a marzo del 2022.

Actualmente, el geovisualizador está disponible en intranet y se encuentra en fase de revisión por las áreas internas de CONAGUA, lo cual permitirá mejorar el diseño de la interfaz para enfocarla en la difusión del proyecto. Una vez que se cuente con el aval de las áreas internas de CONAGUA, será liberado en internet para la retroalimentación de otras áreas involucradas en el proyecto y se espera lograr su difusión masiva a más tardar en el mes de agosto.

El geovisualizador también incluye ejercicios de cartografía participativa, los cuales permitieron a ciudadanos involucrados en el proyecto representar las dinámicas y procesos que identifican dentro de su territorio. De esta manera, este instrumento comprende las historias, imaginarios, percepciones y denuncias de los habitantes de los ejidos del lago plasmándolas en mapas, por lo que es útil para identificar problemas a escala local. Así, a través de estos ejercicios, se constató y amplió la información de algunas bases de datos, como tiraderos de cascajo, asentamientos irregulares y tablas del ejido. Además, se obtuvo información sobre avistamiento de fauna, proyectos comunitarios y algunas dinámicas socioespaciales.

La cartografía participativa fue planeada en diferentes sesiones en formato de talleres en los que la población objetivo fueron ejidatarios de los siete ejidos y pueblos originarios que están alrededor del lago Tláhuac-Xico. Dichos talleres se plantearon como una manera de reunir información que permitiera integrar el relato colectivo que los pueblos que rodean el lago tienen de su territorio, de forma que dicho relato señale los alcances de su participación en el proyecto.

De esta manera, se llevaron a cabo siete talleres que se describen a continuación, para ello se incluye de forma sintética, los objetivos, métodos, resultados y conclusiones de cada uno.

6.1.1 Talleres de diagnóstico (28 de diciembre de 2021 y 12 de enero de 2022)

Estos talleres estuvieron dirigidos a ejidatarios de San Pedro Tláhuac y se llevaron a cabo con el fin de identificar problemáticas presentes en el territorio.

La convocatoria se realizó a través del equipo del componente social. Las sesiones se llevaron a cabo con la proyección del mapa de su territorio sobre una pantalla y los participantes señalaron los lugares y expresaron su conocimiento y percepción de cada uno.

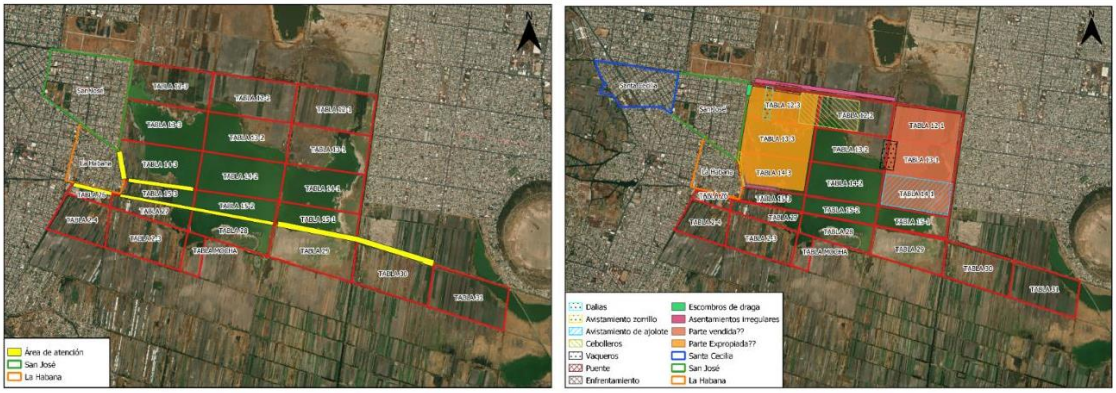


Figura 249. Mapas resultantes de las sesiones 1 y 2

En estas sesiones, los participantes mencionaron diversas problemáticasrecurrentes:

a) Urbanización
b) Asentamientos irregulares
c) Zonas rojas, venta de drogas y otras actividades ilícitas
d) Falta de vigilancia
e) Robo de cultivos
f) Falta de agua para riego
g) Renta y venta de parcelas
h) Salitre en el suelo
i) Padrón ejidal desactualizado

6.1.2 Taller de cartografía participativa (29 de enero de 2022)

Un objetivo de la cartografía participativa es que tanto los facilitadores, como los participantes tengan entendimiento de las técnicas y los resultados esperados de los ejercicios por lo que se llevó a cabo un taller de manera remota para los facilitadores, integrantes del componente social, y algunos participantes con el fin de procurar las bases que propiciaran la comprensión de los ejercicios de cartografía participativa y sus resultados.

En esta sesión se abordaron temas básicos de cartografía: definición de mapa, proyecciones y uso de los mapas. Así como, conceptos básicos de cartografía participativa: definición, métodos, recomendaciones para su implementación e impacto.

Al taller asistieron catorce personas: siete del componente social, tres del componente geovisualizador y cuatro participantes de la comunidad. Con lo cual se logró contar con un grupo de personas con las bases necesarias para llevar a cabo los subsecuentes ejercicios de cartografía participativa.

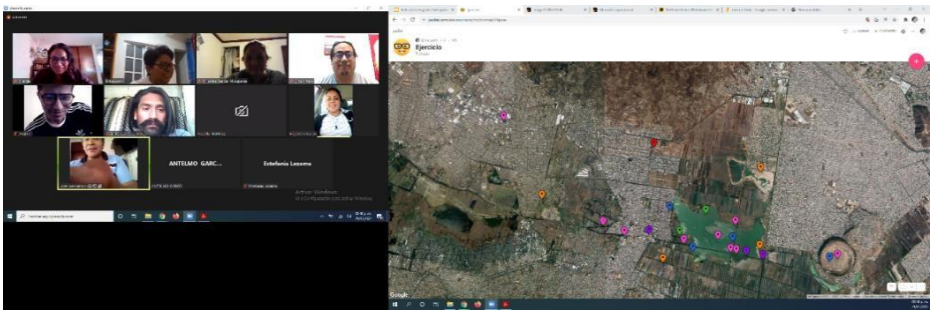


Figura 250. Presentación del Taller de cartografía participativa

6.1.3 Taller “Presente con mi espacio”, dirigido a ejidatarios de San Pedro Tláhuac (22 y 26 de febrero de 2022)

Entre los objetivos del proyecto se contempló la difusión del mismo entre ejidatarios de los siete ejidos y pueblos originarios alrededor del lago Tláhuac –Xico para promover su participación. Así, se planteó el taller denominado “Presente con mi espacio” con el objetivo de evaluar el alcance de las reuniones informativas con los ejidatarios, ubicando las parcelas de los asistentes en las tablas[13] que conforman el ejido.

Este ejercicio se realizó en dos reuniones para dar a conocer del proyecto de habilitación del lago. En cada una se solicitó a los ejidatarios que colocaran un pin en su parcela, para esto se requirió de un mapa impreso en gran formato del ejido dividido en tablas y pines.



[13] Una tabla es una forma de división al interior del ejido, toma su nombre de las tablas de dotación en las cuales se describen y delimitan los terrenos que conforman el ejido. Las tablas no necesariamente tienen la misma superficie y forma

Figura 251. Participación en el ejercicio “Presente con mi espacio”

Como resultado, se obtuvieron 25 registros de la sesión del día 22 de febrero y 21 de la sesión del día 26 del mismo mes, para tener 46 registros en total.

Estos registros se analizaron con base en el modelo de difusión simple que señala que la difusión espacial procede ampliamente por contagio en la vecindad; por lo que, si un individuo en la red difunde información, hay cierta probabilidad de que el vecino comience a difundirla.

De esta forma, se identificó que, de las 21 tablas con las que cuenta el ejido, la información del proyecto llegó a 14; es decir, más del 50% y en las tablas 14-1 y 30 fue donde se proporcionó la información a más vecinos, siete de cada una.

6.1.4 Taller San Juan Ixtayopan (16 de marzo de 2022)

Se llevó a cabo con los integrantes del comisariado ejidal de San Juan Ixtayopan con el objetivo de mapear sus propuestas relacionadas con el manejo del agua y la habilitación de un parque ecoturístico en su territorio.

En este caso, se colocó el mapa sobre la mesa y se les proporcionaron marcadores y crayolas. Los participantes marcaron e intervinieron elmapa mientras narraban algunas problemáticas del ejido de San Juan Ixtayopan.

El resultado de este taller fue la obtención de información sobre las posibilidades de usos del área del ejido conocida como La Ampliación. Entre estas se mencionan: un parque ecológico, un museo con réplicas de las piezas arqueológicas encontradas en la tabla Santo Domingo, un kiosko, una pista para bicicletas y un tren para recorridos turísticos.



Figura 252. Participación del ejido San Juan Ixtayopan

6.1.5 Talleres San Pedro Tláhuac (31 de marzo y 5 de abril de 2022)

Finalmente, con base en las problemáticas identificadas en los talleres anteriores, se planearon dos sesiones más de cartografía participativa para:

- Problematizar la relación de los habitantes con el lago.
- Señalar las amenazas y oportunidades presentes en el territorio
- Compilar los proyectos productivos de la comunidad.

En esta sesión participaron ocho mujeres y dos hombres, a quienes se explicó que el ejercicio implicaba que ellos elaboraran un mapa a partir de algunosplanteamientos y preguntas.



Figura 253. Participación del ejido San Pedro Tláhuac en la sesión seis

Las situaciones que se mencionaron fueron:

- Las tierras inundadas son una amenaza porque impiden el cultivo de latierra.
- Se propone formar lazos con investigadores y entidades académicas para aplicar el conocimiento en la resolución de problemas.
- No hay agua porque se la llevan a otros lados y porque no hay voluntadpolítica.
- Relacionan la inseguridad con el tiro de cascajo, los asentamientos irregulares y los robos de cosechas, herramienta e infraestructura.
- Hay una denuncia por asentamiento irregulares ante la PAOT.

En la sesión siete, participaron ocho personas, cuatro hombres y cuatro mujeres.Se les indicó que colocaran una chincheta de acuerdo a los siguientes parámetros

- Amarillo: a dónde voy a comer, dónde recomiendo ir
- Blanco: dónde recomiendo para ir a caminar o pasear
- Verde: dónde hay peligro
- Rojo: dónde vivo

Con esta actividad se buscó problematizar la relación de los habitantes con el lago al ubicar el lugar dónde viven y dónde llevan a cabo ciertas actividades. De este modo, se pudo identificar que no van a pasear al centro de Tláhuac porque allí es “para trámites” y que en general comen en casa o en negocios familiares. Por otro lado, se señalaron algunas amenazas en lugares dónde perciben peligro.

Después, mapearon problemas de la comunidad así como propuestas para cambiarlos, además identificaron y mapearon los proyectos comunitarios; es decir, identificaron las oportunidades que hay en su entorno. Entre los problemas mencionados están:

- Falta de apoyo y asesoría a proyectos comunitarios
- Falta de agua para riego
- Inseguridad
- Ambulantaje
- Falta de agua potable por la red hidráulica

- Falta de vías de comunicación
- Descargas de aguas negras
- Asentamientos irregulares
- Jaurías de perros
- Jardines en mal estado
- Grupos de control territorial en el embarcadero, en los tiraderos de cascajo, en los asentamientos irregulares y en el paradero

Los proyectos que mencionaron recurrentemente fueron:

- Nosotros por Tlaltenco
- Mujeres alfareras de Tláhuac
- Proyecto Cartonería en Santa Cecilia
- Proyecto Monstruos de agua
- Raíces de H2O
- Apiario Atotolco
- Ruta turística Tláhuac
- Colectivo Bitla
- Espejo de Tláhuac
- Museo comunitario Cuitláhuac
- Dalias y Julietas
- Chicas pro el H2O Xico
- Redes sociales pro prevención del delito y seguridad ciudadana
- Cultura en general:
  - verdad histórica
  - verdad jurídica
  - Cultura jurídica

6.1.6 Conclusiones

Los ejidatarios de los ejidos cercanos al lago Tláhuac – Xico tienen identificadas diversas problemáticas. Por ello se han organizado para tratar de mitigar su impacto, como es el caso de las Redes sociales para la prevención del delito y Cultura Jurídica.

Por otro lado, los ejidatarios se han organizado para buscar alternativas tanto de autoempleo como de emprendimiento, tal es el caso de los proyectos Apiario Atotolco y Dalias y Julietas. Incluso se han organizado para conservar la fauna de la zona, así como promover actividades culturales.

Algunas problemáticas fueron integradas en el geovisualizador en forma de capa vectorial, como lo es el cascajo de la zona y los asentamientos irregulares. Además, se incluyeron puntos de avistamiento de fauna, ubicación de proyectos comunitarios y puntos con potencial turístico (lugares que se recomiendan para ir a pasear o comer).

La información obtenida en los ejercicios de cartografía participativa sirvió para que el equipo de trabajo del Proyecto tuviera conocimiento de las problemáticas del entorno e identificar las que podrían incidir, positiva y negativamente en el proyecto. De esta manera, se tuvo información de primera mano para la elaboración de sus propuestas. Por ejemplo, se tenía

conocimiento de los rellenos de cascajo, así como el problema que representa para el lago y durante las sesiones se identificó el modo de operación de los grupos dedicados al tiro de cascajo, con lo cual se tomaron acciones concretas.

Finalmente, aunque los ejidatarios señalan la falta de apoyo gubernamental y la necesidad de crear lazos con la comunidad científica, se tiene conocimiento de que CORENADR trabaja en la zona ayudando en la obtención de apoyos. Del mismo modo, se tiene conocimiento de investigadores que desarrollan su trabajo en el área. Por lo que esta percepción puede ser por falta de difusión de los apoyos e investigaciones.

6.1.7 Recomendaciones

- Estimular y fortalecer la participación comunitaria al interior del ejido de manera permanente hasta la aprobación del proyecto, a través de mesasde información, redes sociales, carteles, sitio web, etc.
- Buscar, promover y difundir apoyos para los proyectos comunitarios existentes a fin de estimular la creación de más proyectos e iniciativas.
- Crear y reforzar lazos con la comunidad científica que realiza sus investigaciones en la zona.

Conclusiones y pasos a seguir

El proyecto del lago Tláhuac – Xico representa un cambio de paradigma en los usos del agua. Este involucra cuerpos de agua, humedales y regeneración ambiental lo cual contribuye a reducir el riesgo de desastres de origen natural y antropogénico, además de mitigar los efectos causados por el cambio climático.

Los resultados del análisis multidisciplinario de este proyecto indican que el proyecto brinda oportunidades de desarrollo y grandes beneficios como:

- Dos plantas de Tratamiento de agua de 800 lps y 400 lps de Tláhuac, las aguas tratadas pasarían por 136 has de humedales.
- Dotación de aguas limpias que pasarían 6 meses bajo el sol "naturalizándose" para ser potabilizadas y distribuidas a Tláhuac y Valle de Chalco
- Aumento en el 100% el volumen de aguas tratadas para riego que atenderían a los ejidos que componen el Lago Tláhuac-Xico
- Desarrollo de comunidades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles

En comparación con los trasvases que producen deterioro ambiental y problemas sociales. El proyecto Tláhuac - Xico es una fuente renovable y local que implica cuádruple beneficio: Saneamiento, Potabilización, Restauración Ambiental y Social.

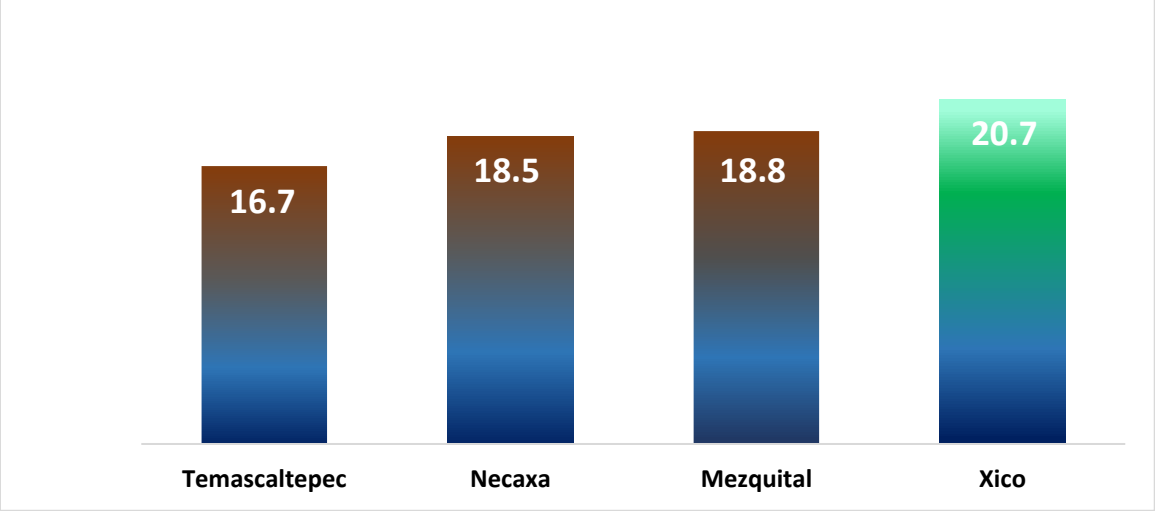


Figura 254. Costo nivelado por alternativa ($/m3) a pesos al 2022

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Realizar el proyecto ejecutivo en los próximos 6 meses.
- Gestión de recursos federales, a solicitud de la Jefa de Gobierno CDMX y el Gobernador Edomex
- Se organizarán los proyectos ejidales a ser financiados y se diseñaría la infraestructura requerida
- Se requerirían de acuerdos inter-ejidales para el control del territorio en torno al lago
- Generar Convenios de Ocupación temporal con los ejidos.
- Se iniciaría la construcción a inicios del 2023.

Referencias

Abba, S., Abdulkadir, R., Sammen, S., Bao Pham, Q., Lawan, A., Esmail, P., . . . Al-Ansari, N. (2022). Integrating feature extraction approaches with hybrid emotional neural networks for water quality index modeling. *Applied Soft Computing*, 1-17.

Abrams, P. 1983. The theory of limiting similarity. Annual review of ecology and systematics 14(1): 359-376.

Agunbiade, F. O., Olu-Owolabi, B. I., & Adebowale, K. O. 2009. Phytoremediation potential of Eichornia crassipes in metal-contaminated coastal water. Bioresource Technology 100(19): 4521-4526.

Ahmed, S., Mofijur, M., Nuzhat, S., Tasnim Chowdhury, A., Raf, N., Uddin, M., . . . Loke Show, P. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. Journal of Hazardous Materials.

Akugado, J.A., Nishigaki, M., Chegbeleh, L.P., Komatsu, M., Alim, M.A. 2009. Capillary cut design for soil-groundwater salinity control. Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology 14: 17–22.

Alcalde Sanz, L., & Manfred Gawlik, B. (2014). Water Reuse in Europe Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation. Italia: Unión Europea.

Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P. 2019. Using the ULSE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. International Soil and Water Conservation Research 7: 203 – 225.

Alfosea-Simón, M., Zavala-Gonzalez, E.A., Camara-Zapata, J.M., Martínez-Nicolás, J.J., Simón, I., Simón-Grao, S., García-Sánchez, F. 2020. Effect of foliar application of amino acids on the salinity tolerance of tomato plants cultivated under hydroponic system. Scientia Horticulturae 272: 109509.

Almanza, V., Parra, O., Bicudo, C. e. D. M, Sant'Anna, C.L., Baeza, C., González, P. 2016. Guía Para El Estudio de Cianobacterias en el sistema lacustre del Gran Concepción: aspectos ecológicos, toxicológicos. Chile.

Alvarez Leonard, M., Cárdenas Tristán, A., & Alfaro de la Torre, C. (2020). Evaluación del proceso de depuración del agua en la Planta de tratamiento Tanque Tenorio. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias, 395-398.

American Academy of Environmental Engineers&Scientists. (2011). American Academy of Environmental Engineers&Scientists. Obtenido de https://www.aaees.org/e3scompetition/2011grandprize-environmentalsustainability.php /2011grandprize-environmentalsustainability.php

American Water Works Association. (2005). Water Treatment Plant Design. McGraw Hill.

American Water Works Association. (2016). Potable Reuse 101. An innovative and sustainable water supply solution. American Water Works Association.

Amorim, C. A., Valença, C. R., de Moura-Falcão, R. H. & do Nascimento Moura, A. 2019. Seasonal variations of morpho-functional phytoplankton groups influence the top-down control of a cladoceran in a tropical hypereutrophic lake. Aquatic Ecology 8: 1-12.

An, S., Verhoeven, J. T. 2019. Wetland functions and ecosystem services: Implications for wetland restoration and wise use. In Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use Springer, Cham. pp. 1-10.

Arévalo-Vargas, J. 2007. El Tamarix (Tamarix sp.) en la forestación del lecho del Vaso del Ex-Lago de Texcoco, una estrategia más para su rescate. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.

ASUETA, R. 2017. Análisis y caracterización de macroinvertebrados bentónicos en la cuenca superior del río Gallegos – Santa Cruz. Su aplicación para la evaluación de la calidad ambiental de un recurso hídrico afectado por la extracción y uso del carbón para la generación de energía. Tesis de Maestría en Manejo y Gestión de los Recursos Naturales en la Patagonia, Universidad Nacional de la Patagonia Austral.

ASUETA, R., SÚNICO, A. MARTIN, J. P. 2011. Análisis y caracterización de macroinvertebrados bentónicos en la cuenca superior del río Gallegos – Santa Cruz. Su aplicación para la evaluación de la calidad ambiental de un recurso hídrico afectado por la extracción y uso del carbón para la generación de energía. 2do Encuentro de Investigadores de la Patagonia Austral. Universidad Nacional de la Patagonia Austral.

Austin, G., & Yu, K. (2016). Constructed Wetlands and Sustainable Development. UK: Routledge.

Australian Academy of Technological Sciences and Engineering. (2013). Drinking Water Through Recycling, The Benefits and Costs of Supplying Direct to The Distribution System. Australian Water Recycling Centre of Excellence.

Autores, V. (2011). Plan Hídrico para las Subcuencas Amecameca, La Compañía y Tláhuac-Xico. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Ayala-Pérez, V., Arce, N., & Carmona, R. 2013. Distribución espacio-temporal de aves acuáticas invernantes en la Ciénega de Tláhuac, planicie lacustre de Chalco, México. Revista mexicana de biodiversidad 84(1): 327-337.

Balasubramanian, D., Arunachalam, K., Arunachalam, A., Das, A. 2013. Water hyacinth [eichhornia crassipes (mart.) solms.] engineered soil nutrient availability in a low-land rain-fed rice farming system of north-east India. Ecological Engineering 58: 3–12.

Bank, T. W. (2018). Wastewater: From Waste.

Bennett, E.M., Peterson, G.D., Gordon, L.J. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. Ecology Letters 12(12): 1394–1404.

Bigda, R. J. (1995). Consider Fenton's Chemistry for Wastewater Treatment. Chemical Engineering Progress, 62-66.

Bixio, D., De heyder, B., Cikurel, H., Muston, M., Miska, V., Joksimovic, D., . . . Thoeye, C. (2005). Municipal wastewater reclamation: where do we stand? An overview of treatment technology and management practice. Water Sci. Technol.: Water Supply, 77–85.

Bortolini, J. C., Moresco, G. A., De Paula, A. C. M., Jati, S., Rodrigues, L. C. 2016. Functional approach based on morphology as a model of phytoplankton variability in a subtropical floodplain lake: a long-term study. Hydrobiologia 767(1): 151 - 163.

Boshir Ahmed, M., Zhou, J., Ngo, H., Guo, W., Thomaidis, N., & Xu , J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies foremerging contaminant removal from wastewater: A critical review. Journal of Hazardous Materials, 274–298.

Breure, A.M., De Deyn, G.B., Dominati, E., Eglin, T., Hedlund, K., Van Orshoven, J., Posthuma, L., 2012. Ecosystem services: a useful concept for soil policy making! Current Opinion in Environmental Sustainability 4: 1877–3435.

Bridgewater, P. 2007. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Instituto Nacional de Ecología.

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018. Soil quality – a critical review. Soil Biology and Biochemistry 120: 105–125.

Calder, I.R., 2007. Forest and water-ensuring forest benefits outweigh water cost. Forest Ecology and Management 251: 110–120.

California State Water Resources Control Board. (2018). Regulations Related To Recycled Water.

Calzolari, C., Ungaro, F., Filippi, N., Guermandi, M., Malucelli, F., Marchi, N., Staffilani, F., Tarocco, P. 2016. A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. Geoderma 261: 190–203.

Camarillo, R., Maurer, F., Ulacia, R. 2013. Lago Tlahuac-Xico. Regeneración de un ecosistema hídrico urbano. Tesis de Maestria, UNAM. México.

Campos Enríquez, O., Delgado Rodríguez, O., Chávez Segura, R., Gómez Contreras, P., Flores Márquez, L., Birch, F.S. (1997). The surface of Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from geophysical data. Geophysics, 62 (1), 23-35.

Campos Silva, C., Alvarado Martínez, E., & Becerril Bravo, J. (2017). Determinación de fármacos y metabolitos de muestras de aguas, suelo y sedimento de la zona lacustre de la Ciudad de México, por extracción acelerada con disolventes y cromatografía de gases acoplada a

espectrometría de masas. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, 285-302.
Canales, A. (s.f.). EL REUSO Y LA SUSTENTABILIDAD “PROYECTO TENORIO, SLP.
Canfield, R. H. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. Journal of forestry 39(4): 388-394.
Carabias, J., Sarukhán, J., de la Maza, J., Galindo, C. 2010. Patrimonio natural de México. Cien casos de éxito. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
Carey, J. R. 1993. Applied demography for biologists: with special emphasis on insects. Oxford University Press.
Carollo Engineers. (s.f.). Obtenido de https://carollo.com/solutions/el-paso-advanced-water-purification-facility-preliminary-engineering-design-and-permitting/
Carrasco, F.G. 2001. Degradación del suelo de conservación del distrito federal, México. Centro de Investigación en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.
Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Díaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global. Ingeniería Ambiental, 111-124.
Castro-Pastrana, L. I., Baños-Medina, M. I., López-Luna, M. A., & Torres-García, B. L. (2015). Ecofarmacovigilancia en México: perspectivas para su implementación. Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas 16-40, 16-40.
CEC (2015). Cobertura del suelo de América Latina. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. Disponible en http://www.cec.org/es/atlas-ambiental-de-america-del-norte/
Chávez-García, E., Siebe, C. 2019. Rehabilitation of a highly saline-sodic soil using a rubble barrier and organic amendments. Soil and Tillage Research 189: 176–188.
Cipolletta, G., Ozbayram, E. G., Eusebi, A. L., Akyol, Ç., Malamis, S., Mino, E., & Fatone , F. (2021). Policy and legislative barriers to close water-related loops in innovative small water and wastewater systems in Europe: A critical analysis. Journal of Cleaner Production, 288. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125604
Clayton County Water Authority. (2017). A Report to the Community.
Colomer-Mendoza, F.J., Gallardo-Izquierdo, A. 2007. Tratamiento y gestión de residuos sólidos. Editorial de la UPV, España.
Comisión de Cuenca de los Ríos Amecameca y La Compañía y la Universidad Metropolitana (2011). Plan hídrico de las subcuencas Amecameca, La Compañía y Tláhuac – Xico. Estado de México, México.
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (S. f.). Geoportal del sistema nacional de información sobre biodiversidad - CONABIO. Recuperado 28 de enero de 2022, de http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/PORTAL DE GEOINFORMACIÓN 2022
CONAGUA. (2007). Documentos de Licitación Para la Prestación de Servicios de Tratamiento de Aguas Residuales del Valle de México - PTAR Atotonilco. Mexico.
CONAGUA. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada.
CONAGUA. (2010). El agua en México: causes y encauses. Ciudad de México.
CONAGUA. (2015) Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Comisión Nacional del Agua, México. Disponible en https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas
CONAGUA. (2015). Construcción de la PTAR Chapultepec y Sistema de Riego.
CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México. México.
CONAGUA. (2019) Sistema de Información Hidrológica. Subdirección General Técnica, Comisión Nacional del Agua, México. Disponible en https://sih.conagua.gob.mx/
CONAGUA. (2019). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación.
CONAGUA. (2020) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chalco-Amecameca (1506), Estado de México. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua. México. 36 pp.

CONAGUA. (2020) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. México (0901), Ciudad de México. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua, México. 35 pp.
CONAGUA. (2021) Consulta a la base de datos del REPDA. Comisión Nacional del Agua, 31 de diciembre del 2021. Disponible en: https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx
CONAGUA. (2021). Calidad del agua en México. Obtenido de Gobierno de México: https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua
CONAGUA. (2022). Estudio hidrológico para el Proyecto Integral Lago Tláhuac-Xico.
CONAPO (2019) Proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030. Consejo Nacional de Población, 22 de agosto del 2019. Disponible en: https://www.gob.mx/conapo/documentos/proyecciones-de-la-poblacion-de-los-municipios-de-mexico-2015-2030
COVITUR, (1987). Manual de Diseño Geotécnico, Volumen 1, Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras.
Cram, S., Cotler, H., Morales, L.M., Sommer, I., Carmona, E. 2008. Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del distrito federal. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 66: 81–104.
Cristiani, B. C., Villarreal, D. R. 2012. Efectos de la construcción de la Línea 12 del Metro en la urbanización de la delegación Tláhuac. Veredas: Revista del Pensamiento Sociológico (25): 133-154.
Daughton G.C. (2004). PPCPs in the Environment: Future Research-Beginning with the End Always in Mind (Segunda ed.). (K. K., Ed.) Springer.
De la Lanza Espino, G., Pulido, S. H. 2019. Variación de la calidad del agua de La Ciénega de Tláhuac, México. CIENCIA ergo-sum 26(3).
Delgado Ramos, G. C. (2016). Vuelta al agua. Disponibilidad, calidad, consumo, retos y perspectivas". Tierra Adentro.
Department of Natural Resources of Georgia. (2010). GUIDELINES FOR SLOW-RATE LAND TREATMENT OF WASTEWATER VIA SPRAY IRRIGATION. Georgia, United States.
DGCOH. (1997). Proyecto Ejecutivo Purísima Iztapalapa Número 5.
Diario Oficial de la Federación. (2020). agua.org.mx. Obtenido de https://agua.org.mx/biblioteca/norma-oficial-mexicana-nom-179-ssa1-2020-sobre-agua-para-uso-y-consumo-humano/
Díaz-Rodríguez, J. A., Leroueil, S. & Alemán, J. D. (1992). Yielding of Mexico City clay and other natural clays. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 118 (7): 981-995.
Díaz-Rodríguez, J. A., Lozano-Santa Cruz, R., Dávila-Alcocer, V. M., Vallejo, E. & Girón, P. (1998). Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City sediments: a geotechnical perspective. Canadian Geotechnical Journal 35(4): 600-610.
Dolbeth, M., Pardal, M. A., Lillebø, A. I., Azeiteiro, U., & Marques, J. C. 2003. Short-and long-term effects of eutrophication on the secondary production of an intertidal macrobenthic community. Marine Biology 143(6): 1229-1238.
Drewes, J. (2011). Water Reuse for Drinking Water Augmentation. En J. Edzwald, Water Quality and Treatment (págs. 16.1-16.48). McGraw-Hill.
Du Pisani, L. P. (2006). Direct reclamation of potable water at Windhoek's Goreangab reclamation plant. Desalination, 79-88. doi:10.1016/j.desal.2005.04.104
Duncan, S. G. (2005). Soil Strength and Slope Stability. New Jersey: john Wiley & Sons.
Durazo J. (1996) Ciudad de México. Acuitardo superficial y contaminación acuífera. Ingeniería Hidráulica en México, 10(2), pp.5-14.
Edzwald, J. K. (2011). Water Quality & Treatment A Handbook on Drinking Water. McGraw-Hill.
Environmental Protection Agency. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Washington, D.C., United States.
Environmental Protection Agency. (2012). Guidelines for Water Reuse. Washington, D.C.
Environmental Protection Agency. (2017). Potable Reuse Compendium. United States.

Environmental Protection Agency. (s.f.). An Assesment of Ozone and Chlorine Dioxide Technologies for Treatment of Municipal Water Supplies.
EPA. (2017). Potable Reuse Compendium.
Estrada Arriaga, E. B. (2011). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES CON PRESENCIA DE COMPUESTOS DISRUPTORES ENDOCRINOS MEDIANTE UN BIOPROCESO AEROBIO CON MEMBRANAS. Tesis de doctorado. Ciudad de México.
Feng, G., Zhang, Z., Wan, C., Lu, P., Bakour, A. 2017. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (zea mays l.) in subsurface drainage system. Agricultural Water Management 193: 205–213.
Fink, J., Sánchez-Rodríguez, A.R., Frosi, G., Eckert, D., Bonetti, J.A., Bastiani, K., Lavratti, A., Inda, A.V., Zanquetti, A. 2021. Industrial saline wastewater in a corn-soybean rotation to enhance crop yield without compromising soil health in a subtropical soil. Journal of Environmental Management 296: 113341.
Franco, D. P. M., Manzano, J. Q., Cuevas, A. L. 2010. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. ContactoS 78: 25-33.
Fraser, E. D., Quinn, C., Sendzimir, J. 2011. Resilience and vulnerability of arid and semi-arid social ecological systems. Ecology and Society.
Funk, D., Bell, K., & Hooper, J. (2018). Ozone-Biofiltration Direct Potable Reuse: A Promising Alternative for Meeting Future Water Supply Needs. IUVA New, 24-28.
García E., CONABIO (1998) Climas 1:1.000.000. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México. Disponible en http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/
Geissert, D. 1999. Regionalización geomorfológica del estado de Veracruz. Investigaciones Geográficas 40: 23–47.
Gil, M. S. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratameintos. Producción + Limpia, 52-73.
Gómez, R. A. 2015. Análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos in situ. Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto De Geografía 2015(86): 15-24.
González Zuarth, C. A., Vallarino, A., Pérez Jiménez, C. J., & Low Pfeng, A. M. (Eds.). 2014. Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental (1.a ed., Vol. 1). Colegio de la Frontera Sur (Ecosur) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
Gutiérrez-Granados, G., Dirzo, R. 2021. Logging drives contrasting animal body-size effects on tropical forest mammal communities. Forest Ecology and Management 481: 118700.
Hartley, K., Tortajada, C., & Biswas, A. (2019). A formal model concerning policy strategies to build public acceptance of potable water reuse. Journal of Environmental Management, 250. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109505
Henze, M. (1997). Wastewater Treatment Biological and Chemical Processes. Springer.
Herrera-Hernández, D.A., 2011, Estratigrafía y análisis de facies de los sedimentos lacustres del Cuaternario tardío en la cuenca de Chalco, México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Tesis de Maestría, 122p
Hooghoudt, S., 1940. Bijdrage Tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond. Ver- slag andbouwk Onderzoek 46: 515–707.
Huang, Y., Bie, Z., He, S., Hua, B., Zhen, A., Liu, Z. 2010. Improving cucumber tolerance to major nutrients induced salinity by grafting onto cucurbita ficifolia. Environmental and Experimental Botany 69(1): 32–38.
Huete, A., De los Cobos-Vasconcelos, D., Gómez-Borraz, T., Morgan-Sagastume, J.M., & Noyola, A. (2017). Control of dissolved CH4 in a municipal UASB reactor effluente by means of a desorption- Biofiltration arrangement. Journal of Environmental Management, 216, 383-391.
Huffman, D. W. 2003. Population ecology of Fendler ceanothus: responses to herbivory and forest restoration treatments. Northern Arizona University.
INEGI (2004) Guía para la interpretación de cartografía edafológica. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, 33pp.
INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Tláhuac, Distrito Federal. Reporte técnico. Clave geoestadística 09011. INEGI.

INEGI (2010) Conjunto de datos aguas subterráneas, Zona hidrogeológica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/temas/hidrologia/#Descargas

INEGI (2013) Modelo digital de elevación tipo superficie con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados. E14B31D1, E14B31D2, E14B31D3, E14B31D4. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México. Disponible en https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#Descargas

INEGI (2020). Censo de población y vivienda. INEGI.

INEGI (2021) Marco geoestadístico, censo de población y vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/temas/mg/

INEGI (2022). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. México. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx

INIFAP-CONABIO (1995) Edafología 1:250.000. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México. Disponible en http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/

Islam, M.N., Rahman, F., Papri, S.A., Faruk, M.O., Das, A.K., Adhikary, N., Debrot, A.O., Ahsan, M.N. 2021. Water hyacinth (eichhornia crassipes (mart.) solms.) as an alternative raw material for the production of bio-compost and handmade paper. Journal of Environmental Management 294: 113036.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2002. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos. FAO, Roma 103.

Jalmacin Nené-Preciado, A., González Sansón, G., Eduardo Mendoza, M., de Asís Silva Bátiz, F. 2017. Cambio de cobertura y uso de suelo en cuencas tropicales costeras del pacifico central mexicano. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. pp: 64 – 81.

Janus, L. L., Vollenweider, R. A. 1981. The OECD Cooperative Programmed on Eutrophication. Summary-Report: Canadian Contribution. Inland Waters Directorate Scientific Series. Ministerio del Medio Ambiente del Canadá, Burlington, Ontario, Canadá 131.

Jefferies, D., Muñoz, J., Hodges, J., King, V.J., Aldaya, M., Ercin, A.E., Canals, L., Hoekstra, A.Y. 2011. Water footprint and life cycle assessment as approached to assess potential impacts of product on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. Journal of Cleaner Production 33: 155–166.

Jelic, A., Gros, M., Ginebreda, A., Sánchez, C., Ventura, F., Petrovic, M., & Barceló, D. (2011). Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment. Water Research, 1165-1176.

Jiménez-Cisneros, B. (2014). Water Reuse and Recycling. En Comprehensive Water Quality and Purification,Volume 3 (págs. 297-310). El sevier.

K. Nix, D. (2019). 2019 Texas OCEA Award Winner: Wichita Falls DPR & IPR Project. Texas, Estados Unidos.

Karlson, B., Cusack, C., Bresnan, E. 2010. Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis.

Katerji, N., Van Hoorn, J., Hamdy, A., Mastrorilli, M. 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. Agricultural Water Management 62: 37–66.

Khan, S., & Branch, A. (2019). Potable Water Reuse What can Australia learn from global experience? Adelaide SA: UNSW Water Research Centre, University of New South Wales, NSW, Australia.

Krishnan, R. Y., Manikandan, S., Subbaiya, R., Biruntha, M., Govarthanan, M., & Karmegam, N. (2021). Removal of emerging micropollutants originating from pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water and wastewater by advanced oxidation processes: A review. Environmental Technology & Innovation.

Kruk, C., Huszar, V. L., Peeters, E. T., Bonilla, S., Costa, L., Lürling, M., Colin, S., Scheffer, M. 2010. "A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton." Freshwater biology 55(3): 614-627.

Kruk, C., Segura, A. 2012. The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups. In Phytoplankton responses to human impacts at different scales, Springer. pp: 191-202.

Kumar Parida, V., Saidulu, D., Majumder, A., Srivastava, A., Gupta, B., & Kumar Gupta, A. (2021). Emerging contaminants in wastewater: A critical review on occurrence, existing legislations, risk assessment, and sustainable treatment alternatives. Journal of Environmental Chemical Engineering.

Lester, J. (2003). Endocrine Disrupters in Qastewater and Sludge Treatment Processes. IWA Publishing.

López, C. A., Zambrano, L., Ruiz Ortega, R., Guzmán, M. A., Pérez Espejo, R., Sandoval, R., . . . Caldera, A. (2017). El agua en México. Ciudad de México: Fundación Friedrich-Ebert Stiftung.

López-Hernández, J. (2018). Guía para la selección de procesos de tratamiento de aguas residuales municipales para facilitar la toma de decisiones, con enfoque en la reducción de emisiones de GEI. México: Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation (WaCCliM).

Lou, Y. G. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. Science of The Total Environment, 619-641.

Lozano-García, S., Brown, E. T., Ortega, B., Caballero, M., Werne, J., Fawcett, P. J., Schwalb, A., Valero-Garcés, B. L., Schnurrenberger, D., O'Grady, R., Stockhecke, M., Steinman, B., Cabral-Cano, E., Caballero, C., Sosa-Nájera, S., Soler, A. M., Pérez, L., Noren, A., Myrbo, A., … Vergara-Huerta, F. (2017). Perforación profunda en el lago de Chalco: reporte técnico. Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, 69(2), 299–311. http://www.jstor.org/stable/26461900

Lozier, J., Schimmoller, L., & Curl, J. (2016). Comparing the Sustainability and Effectiveness of RO-and Non-RO Based Potable Reuse Schemes. 1-32.

Mancera, P. J. E., Gavio, B., Carballo, G. A. 2010. Floraciones algales nocivas, intoxicación por microalgas e impactos en el desarrollo regional: El caso de San Andrés Isla, Caribe Colombiano. Cuadernos del Caribe 13: 46-62.

Mao, D., Wang, Z., Wu, J., Wu, B., Zeng, Y., Song, K., Yi, K., Luo, L. 2018. China's wetlands loss to urban expansion. Land Degradation & Development 29: 2644–2657.

Margalef R. 1978. Life forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. Oceanologica Acta 1(4): 493-509.

Martin J. P., Sara., Fernández R., Caminos C., Pereyra G. B., Moscardi C., Gaspari G. 2014. Diversidad de macroinvertebrados bentónicos y aplicación de índices bióticos de calidad ambiental en el Río Santa Cruz (Patagonia austral, Argentina). Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras.

Martínez-Austria, P., Díaz-Delgado, C., & Moeller-Chavez, G. (2019). Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principales. Ingeniería del Agua, 107-121.

Matsumura-Tundisi, T., Hino, K., Claro, S. M. 1981. Limnological studies at 23 reservoirs in southern part of Brazil: With 5 figures and 2 tables in the text. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen 21(2): 1040-1047.

Matteucci, S. D., Colma, A. 1982. Metodología para el estudio de la vegetación (Vol. 22). Washington, DC: Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos.

Maurice, A. C., Abdelkrim, J., Cisel, M., Zavodna, M., Bardin, P., Matamoro, A., Machon, N. 2013. Mixing plants from different origins to restore a declining population: ecological outcomes and local perceptions 10 years later. Plos one 8(1): e50934.

Meeker, M., Funk, D., Bell, K., & Hopper, J. (26 de September de 2018). WateReuse Webcast Series. Potable Reuse Using Ozone-Biofiltration. WateReuse Association & The Water Research Foundation.

Mekonnen, M., & Hoekstra, A. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Hydrology and Earth System Sciences, 15(5), 1577-1600.

Méndez, M. G., Binnqüist, G. S., Méndez, S. A. 2019. Riesgo, vulnerabilidad y cambio climático en suelo de conservación ecológica de la Ciudad de México. El caso de los humedales de Tláhuac. Veredas: Revista del Pensamiento Sociológico (36): 13-45.

Menninger, H. L., Palmer, M. A. 2006. Restoring ecological communities: from theory to practice. Foundations of restoration ecology. pp: 88-112.

Mesri G., Rokhse A. y Bonor B. F., 1976. Compositive and compressibility of typical samples of Mexico City, Geotechnique 25(3), 527-554 . En Ortega-Guerrero, B., 1992, Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario tardío en el lago de Chalco, cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 161 p.

Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill.

Mitsch, W. J., Zhang, L., Stefanik, K. C., Nahlik, A. M., Anderson, C. J., Bernal, B., Hernandez, M., Song, K. 2012. Creating wetlands: primary succession, water quality changes, and self-design over 15 years. Bioscience 62(3): 237-250.

Moeller Chávez, G. E., Guillén, R. A., Treviño, L. G., & Lizama, C. (2016). Capítulo 6 Reúso de aguas residuales tratadas como fuente directa e indirecta de agua potable. En Uso seguro del agua para reúso (págs. 93-105). AIDIS.

Molina Vázquez, D. M. (2008). Remoción de nonilfenoles en plantas de tratamiento de aguas residuales en México. Tesis de maestría. Ciudad de México.

Montiel-León, M.A.L., Uribe-Alcántara, E.M., García-Celis, E. 2011. Mapa nacional de erosión potencial. Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México 2: 5–17.

Morales, N.S., Zuleta, G.A. 2020. Comparison of different land degradation indicators: Do the world regions really matter? Land Degradation & Development 31(6): 721–733.

Moreno, C. E. 2000. Métodos para medir la biodiversidad. Manuales y tesis SEA 1.

Moushani, S., Kazemi, H., Klug, H., Asadi, M., Soltani, A. 2021. Ecosystem service mapping in soybean agroecosystems. Ecological Indicators 121: 107061.

N. Evgenidou, E., K. Konstantinou, I., & A. Lambropoulou, D. (2015). Occurrence and removal of transformation products of PPCPs and illicit drugs in wastewaters: A review. Science of the Total Environment, 905-926.

Namuche-Vargas, J.R., Fuentes-Ruiz, C., Olvera-Salgado, M.D., Cisneros-Estrada, O.X., Pacheco-Hernández, P., Ávila-García, A., 2018. Metodología para la rehabilitación de suelos salinos con drenaje subterráneo parcelario. IV Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII. pp: 1–15.

Natale, E., Zalba, S. M., Oggero, A., Reinoso, H. 2010. Establishment of Tamarix ramosissima under different conditions of salinity and water availability: Implications for its management as an invasive species. Journal of Arid Environments 74(11): 1399-1407.

Noyola, A. (2016). Capítulo 5 Procesos Biológicos para el tratamiento de Aguas Residuales destinadas al reúso. En A. Noyola, Uso seguro del agua para el reúso (págs. 77-88). AIDIS.

Núñez-Cardona, H. 1991. Diagnóstico y evaluación de los suelos salinos-sódicos de una zona templada en Chalco, Estado de México. Tesis de licenciatura Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ortega-Guerrero, B., 1992, Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario tardío en el lago de Chalco, cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 161 p.

Ortiz Z.D.C, Ortega G.M.A. (2007) Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de Chalco: implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en Valle de Chalco (Estado de México) y Tláhuac (Distrito Federal). Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 64, pp. 26-42.

P. Maseeh, G., G. Russell, C., Lair Villaobos, S., E. Balliew, J., & Trejo, G. (2015). El Paso's Advanced Water Purification Facility:A New Direction in Potable Reuse. JOURNAL AWWA, 36-45.

Padisák, J., Crossetti, L. O., Naselli-Flores, L. 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. Hydrobiologia 621(1): 1-19.

Paíga, P., Correia, M., Fernandes, M., Silva, A., Carvalho, M., Vieira, J., & Matos, C. (2018). Assessment of 83 pharmaceuticals in WWTP influent and effluent samples by UHPLC-MS/MS: Hourly variation. Science of the Total Environment, 582–600.

Palmer, M. A., Zedler, J. B., Falk, D. A. (Eds.). 2016. Foundation of restoration ecology. Washington, DC: Island Press. Pp: 3-26.

PAOT, 2003. Ley de residuos sólidos del distrito federal.
Paul, R., Kenway, S., & Mukheibir, P. (2019). How scale and technology influence the energy intensity of water recycling systems-An analytical review. Journal of Cleaner Production, 215, 1457-1480. doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.148
Pedraza, E. (Enero-junio de 2016). Variables más influyentes en la calidad del agua del río Bogotá mediante análisis de datos. Logos Ciencia & Tecnología, 7, 35-43.
Peña-Álvarez, A., & Castillo-Alanis, A. (2015). Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas (MEFS-CG-EM). Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 29-42.
Pérez-Cruz, G., 1988, Estudio sismólogico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Tesis de Maestría 83p
Prince Flores, J. E., & Espinosa Bouchot, M. (2021). Una mirada a la calidad del agua. Perspectivas IMTA, 1-4.
PUB Singapore´s National Water Agency. (2014, Sep). Technical Guide for GREYWATER Recycling System.
PUB Singapore´s National Water Agency. (s.f.). PUB Singapore´s National Water Agency. Obtenido de https://www.pub.gov.sg/watersupply/fournationaltaps/newater
Radcliffe, C. P. (2020). Water reuse and recycling in Australia-history,current situation and future perspectives. Water Cycle, 19-40.
Radjenovic, Y., Petrovic , M., & Barceló, D. (2009). Fate and distribution of pharmaceuticals in waste-water and sewage sludge of the conventional activated sludge (CAS) and advanced membrane bioreactor (MBR) treatment. Water Research, 831–841.
Ramos, A., Zagal-Ramírez., X., & Galván Benítez, L. (2020). Hacia una Ley General de Aguas basada en la sustentabilidad. Argumentos. Estudios Críticos De La Sociedad, 133-146.
Reguant-Álvarez, M., & Torrado-Fonseca , M. (2016). El método Delphi. REIRE, Revista d'Innovació i Recerca en Educació, 87-102.
Reis, V., Hermoso, V., Hamilton, S. K., Ward, D., Fluet-Chouinard, E., Lehner, B., Linke, S. (2017). A global assessment of inland wetland conservation status. Bioscience 67(6): 523-533.
Reygadas P.D. 2016. Delimitación del área de estudio y regionalización. La biodiversidad en la Ciudad de México. Conabio/Sedema 1: 30-35.
Reynoso-Morales, C.A. 2018. Evaluación de una plantación establecida en condiciones de suelos salinos del ex-Lago de Texcoco. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
Ritzema, H.P., 1994. Drainage principles and aplications. Segunda ed., International Institute for Land reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
Rivera-Jaimes, J. A., Postigo, C., Melgoza-Alemán, R. M., Aceña, J., Barceló, D., & López de Anda, M. (2018). Study of pharmaceuticals in surface and wastewater from Cuernavaca, Morelos, Mexico: occurrence and environmental risk assessment. Science of The Total Environment, 1263–1274.
Rodriguez, C., Buynder, P. V., Lugg, R., & Blair, P. (2009). Indirect Potable Reuse: A Sustainable Water Supply Alternative. nternational Journal of Environmental Research and Public Health, 6, 1174-1209.
Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). De residuo a recurso Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. 1-63. Washington, D.C.: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento.
Rodríguez-Chávez, F.M., 2003, Modelado gravimétrico de la estructura de la cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 98 p. Urrutia-Fucugauchi, J., Chávez-Segura, R.E., 1991, Gravity modeling of lake basin structure: the lakes of Xochimilco and Chalco, southern basin of Mexico (resumen), en USA Society of Exploration Geophysicist Annual Meeting Proceedings, Expanded Abstracts Book, 61, 611-613.
SACMEX. (2011). Términos de Referencia. Trabajos de rehabilitación y actualización tecnológica de la PTAR el LLano.

Saidulu, D., Gupta, B., Kumar Gupta, A., & Sarathi Ghosal , P. (2021). A review on occurrences, eco-toxic effects, and remediation of emerging contaminants from wastewater: Special emphasis on biological treatment based hybrid systems. Journal of Environmental Chemical Engineering, 1-24.

Salazar-Adams, A., & Lutz-Ley, A. N. (2015). Factores asociados al desempeño en organismos operadores de agua potable en México. Región y Sociedad, 27, 5-26.

Schreider, M. (2011). La gestión integrada de los recursos hídricos: el aporte de la Universidad a su proceso de construcción. Argentina: Centro de Estudios y Tecnología del Agua.

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. (2018). Informe del Medio Ambiente. Sección 6 Agua. Recuperado el 28 de 02 de 2022, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html#tema2

Secretaría de Protección Civil. (2021). Atlas de riesgos. Obtenido de http://www.atlas.cdmx.gob.mx/principal/inicio

SEDEMA, 2015. NADF-024-AMBT-2013 que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del distrito federal. México: Gaceta oficial del distrito federal. Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México.

SEDEMA, 2016. El suelo de conservación. Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México.

SEDEMA, 2019. Inventario de residuos sólidos de la ciudad de México. Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México.

SEMARNAT (2000). NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SEMARNAT (2008). El Túnel Emisor Oriente duplicará la capacidad del drenaje profundo del Valle de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

SEMARNAT (2009). Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuíferos. Publicado en el Diario Oficial de la Federación, 28 de agosto de 2009.

SEMARNAT (2020). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, 21 de septiembre del 2020, México. 71 pp.

SEMARNAT (2020). Programa Nacional Hídrico PNH 2020 2024. Diario Oficial, 30 de diciembre de 2020.

SEMARNAT. (28 de febrero de 2022). AVISO. FACTOR DE EMISIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL 2021. Registro Nacional de Emisiones. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/706809/aviso_fesen_2021.pdf

Seqwater. (s.f.). Fact Sheet Wivenhoe Dam.

Shannon, M., Grieve, C. 1998. Tolerance of vegetable crops to salinity. Scientia Horticulturae 78(1-4): 5-38

Siebe, C., Jahn, R., Stahr, K., 2006. Manual para la descripción y evaluación ecológica de los suelos en el campo. 2a ed. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Silva Castro, V. (2008). Evaluación de contaminantes emergentes en fuentes de abastecimiento del Valle de Tula. Tesis de maestría. Ciudad de México.

Singh, G. 2009. Soil water dynamics, growth of dendrocalamus strictus and herbage productivity influenced by rainwater harvesting in arevalli hill of Rajasthan. Forest Ecology and Management 258(11): 2519– 2528.

Singh, R. (2015). Hybrid Membrane Systems - Applications and Case Studies. En R. Singh, Membrane Technology and Engineering for Water Purification (Second Edition) (págs. 283-337). Butterworth-Heinemann.

Sistema Metereológico Nacional. (2022). Normales Climatológicas por Estado (1951-2010). México. Obtenido de https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado

Sizling, A. L. 2002. An Illustrated Guide to Theoretical Ecology.

Snyder, S. A., Wert, E. C., & Hongxia, L. (2007). Removal of EDCs ans Pharmaceuticals in Drinking and Reuse Treatment Processes. IWA Publishing.

Sposito, G. 2008. The chemistry of soils. Oxford, University Press.

Stott, D.E., Cambardella, C.A., Tomer, M.D., Karlen, D.L., Wolf, R. 2011. A soil quality assessment within the Lowa River South Fork watershed. Soil Science Society of America Journal 75: 2271–2282.

Straka, T. M., Lentini, P. E., Lumsden, L. F., Wintle, B. A., Van der Ree, R. 2016. Urban bat communities are affected by wetland size, quality, and pollution levels. Ecology and Evolution 6(14): 4761-4774.

Sundha, P., Basak, N., Rai, A.K., Yadav, R.K., Sharma, P.C., Sharma, D.K. 2020. Can conjunctive use of gypsum, city waste composts and marginal quality water rehabilitate saline sodic soils? Soil and Tillage Research 200: 104608.

Taoufik, N., Boumya, W., Achak, M., Sillanpää, M., & Barka, N. (2021). Comparative overview of advanced oxidation processes and biological approaches for the removal pharmaceuticals. Journal of Environmental Management.

Tchobanoglous, G., Theissen, H., & Eliassen, R. 1982. Desechos sólidos principios de ingeniería y administración. Traducido por: Armando Cubillos. Mérida, Venezuela.

Thi, M. (2011). Alemania:. Journal of Environmental Engineering, 137(4), 273-283, 273-283. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000314

Thomas, M. (2002). CONSTRUCTED WETLANDS AND INDIRECT POTABLE REUSE IN CLAYTON COUNTY, GEORGIA. Water Environment Federation.

Thomas, M. (2005). SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGEMENT BY GEORGIA UTILITIES: CLAYTON COUNTY WATER AUTHORITY. Proceedings of the 2005 Georgia Water Resources Conference. Georgia, United states.

Tilman, D., Downing, J. A., Wedin, D. A. 1994. Does diversity beget stability? Nature 371(6493): 114-114.

Tomasini Ortiz, A. C., Bravo-Inclán, L. A., Sánchez Chávez, J., & Moeller Chávez, G. E. (2016). MONITOREO DE DESCARGAS DE AGUAS ESIDUALES Y SU IMPACTO EN EL LAGO DE PÁTZCUARO, MÉXICO (2006-2011). REVISTA AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, 61-74.

Trejo, I., Hernández, J., Villers, L. 2007. Afectación de las comunidades vegetales de México ante el cambio climático. XI Encuentro de Geógrafos de América.

Trussell Technologies, Inc. (2016). Potable Reuse: Surface Water Augmentation. 1-34.

Uddin, M., Nash, S., & I. Olbert, A. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. Ecological Indicators, 1-21.

University of New South Wales. (2014). Global Potable Reuse Case Study 3: NEWater, Singapore. Australian Water Recycling Centre of Excellence, University of New South Wales.

University of New South Wales. (2014). Global Potable Reuse Case Study 6: Western Corridor Recycled Water Scheme. Australian Water Recycling Centre of Excellence.

USDA-NRCS (2004). Estimation of direct runoff from storm rainfall. National Engineering Handbook, Part 360, Chapter 10, United State Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, USA.

Vakhtang, S., Hoogenboom, G. 2020. A new approach to clustering soil profile data using the modified distance matrix. Computer and Electronics in Agriculture 176: 105631.

Van Andel, J., & Aronson, J. (Eds.). 2012. Restoration ecology: the new frontier. John Wiley & Sons.

Van der Bruggen, B. (2010). Chapter 3 The Global Water Recycling Situation. En Sustainability Science and Engineering.

Van Vuuren, S. J., et al. 2007. Easy identification of the most common freshwater algae. A guide for the identification of microscopic algae in South African fresh waters. African Journal of Aquatic Science 32(3): 317-318

Vázquez–Sánchez, E., Jaimes–Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, 28(2), 133–190

Vergara Huerta, F. (2015). Modelo de velocidad sísmica en la subcuenca de Chalco, Edo. de México, mediante análisis de cocientes H/V de vibraciones ambientales. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Tesis Maestría, 96 pp

Villagrán-Mella, R., Aguayo, M., Parra, L. E., González, A. 2006. Relación entre características del hábitat y estructura del ensamble de insectos en humedales palustres urbanos del centro-sur de Chile. Revista chilena de historia natural 79(2): 195-211.

Villalobos, S. (s.f.). El Paso Water's Advanced Water Purification Facility. Texas, Estados Unidos: Carollo Engineers.

Villéger, S., Mason, N. W., Mouillot, D. 2008. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. Ecology 89(8): 2290-2301

W. Birkett, J., & N. Lester, J. (2003). Endocrine disrupters in wastewater and sludge treatment processes. Lewis Publishers.

Walling, C. (1975). Fenton's Reagent Revisited. Accounts of Chemical Research, 125-131.

Wang, D., Bai, J., Wang, W., Zhang, G., Cui, B., Liu, X., Li, X. 2018. Comprehensive assessment of soil quality for different wetlands in a Chinese delta. Land Degradation y Development 29: 3783–3794.

Wang, X., Shang, S., Qu, Z., Liu, T., Melesse, A. M., Yang, W. 2010. Simulated wetland conservation-restoration effects on water quantity and quality at watershed scale. Journal of environmental management 91(7): 1511-1525.

Wang, Y., Xu, J., Chen, J., Wu, B., Lu, Q. 2014. Influence of the habitat change for birds on community structure. Acta Ecologica Sinica 34(1): 1-6.

Ward Jr., J. H. 1963 Hierarchical grouping to optimize an objective function. Journal of the American statistical association 58(301): 236-244.

Wernes, G. (1995). Ordenamiento territorial y planificación ambiental en.

Westhoff, V., Van Der Maarel, E. 1978. The braun-blanquet approach. In Classification of plant communities. Springer, Dordrecht. pp. 287-399.

Wetzel, R. G., Likens, E.G. 2013. Limnological analyses, Springer Science & Business Media.

WHO. (2017). Guidelines for drinking-water quality (GDWQ) (4th edition, incorporating the 1st addendum ed.). Geneva: World Health Organization.

Wintgens, T., Salehi, F., Hochstrat, R., & Melin, T. (2008). Emerging contaminants and treatment options in water recycling for indirect potable use. Water Science and Technology, 99-107.

Wong, C.P., Bohn, J., Lee, K.N., Lettenmaier, D.P., Dongchun, M., Zhiyun, O. 2017. Lake and wetland ecosystem services measuring water storage and local climate regulation. Water Resources Research 53: 3197–3223.

Woodward, R. T., Wui, Y. S. 2001. The economic value of wetland services: a meta-analysis. Ecological economics 37(2): 257-270.

World Health Organization. (2017). Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water. Geneva, Switzerland: WHO Document Production Services.

Yang, Y., Ok, S., Kim, K., Kwon, E., & Tsang, F. (2017). Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. Water Research, 625-632.

Yang, Y., Sik Ok, Y., Kim, K.-H., Kwon, E., & Tsang, Y. (2017). Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. Science of The Total Environment, 303-320.

Yucra, H. A., Tapia, P.M. 2008. "El uso de microalgas como bioindicadoras de polución orgánica en Brisas de Oquendo, Callao, Perú." The Biologist, Lima 6(1).

Zamudio Santos, V. (2020). MARCO LEGAL DEL AGUA EN MÉXICO Con énfasis en la gestión comunitaria. Cántaro Azul A.C.

Zhu, N., & Otros Autores. (2020). Effects of BAC-filtration, disinfection, and temperature on water quality in simulated reclaimed water distribution systems. Environmental Science Water Research & Technology.

Anexos

Anexo I. Información recopilada
Anexo II. Balance diario en el Lago Tláhuac-Xico
Anexo III. Referencias topográficas
Anexo IV. Estrategias Sociales en los trabajos de Topografía
Anexo V. Establecimiento de Referencias
Anexo VI. Plan de Vuelo Levantamiento Fotogramétrico
Anexo VII. Reportes Plan de Vuelo
Anexo VIII. Coordenadas y elevaciones de los puntos de verificación terrestre
Anexo IX. Puntos de Aforo
Anexo X. Coordenadas SEV´s y líneas de calicatas
Anexo XI. Líneas de Calicateo Geoeléctrico y Perfiles de iso-resistividad
Anexo XII. Sondeos exploratorios
Anexo XIII. Geohidrología
Anexo XIV. Resultados del Modelo para determinar la evolución de los elementos de contención
Anexo XV. Estabilidad de taludes
Anexo XVI. Precios estimados alternativas conceptuales componente “Fuentes/Colectores”
Anexo XVII. Planos
Anexo XVIII. Distribución y diversidad de especies
Anexo XIX. Calidad del Agua
Anexo XX. Calidad del suelo
Anexo XXI. Zonificación del ecosistema
Anexo XXII. Estrategias de Restauración
Anexo XXIII. Invertebrados
Anexo XXIV. Video
Anexo XXV. Reuniones con los ejidos de la región
Anexo XXVI. Citas relacionadas con el tema del agua en la región con base en la bibliografía física del actor comunitario de Tetelco
Anexo XXVII. Listado de documentos sobre la región