Proyecto de Restauración y Manejo Ambiental del río Tula

Informe Final

Proyecto de Restauración y Manejo Ambiental del río Tula

Informe final

CONAHCYT

CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Agradecimientos

Agradecimiento especial a:
Jean Elaine Burns Stuck

Agradecimientos Gobierno del Estado de México

Delfina Gómez Álvarez
Gobernadora del Estado de México

Pedro Moctezuma Barragan
Secretario del Agua del Estado de México

Leonardo Daniel Amores Rovelo
Director General de Operación y Obras

Baldemar Mendez Antonio
Director de Planeación del Agua y Gestión Integral de Cuencas

Hector Cañada Jaime
Director de Gestión y Supervisión de Obras e Infraestructura

Omar Aurelio Peña Ruiz
Director del Sistema de Información Geográfica Integral

Luis Daniel Magadan Rovelo
Director de Corresponsabilidad y Políticas Hídricas de la Dirección General de Derecho Humano al Agua, Planeación y Ordenamiento.

Lic. Abril Karina Olivares del Río
Coordinadora de Oficinas Regionales

Asesores especiales de la Secretaría del Agua
Mariana Ramirez Acevedo
Ibhar Freddy Islas Vázquez
Edvin Edgardo Abarca Villatoro
Luis Sanchez Peregrina
Luis Fernando Orsini
Serafin González Ramirez
Deysi Lopez Luna
GPO Agroecologia Chinampera Tezhuilo
Agustín Gutierrez Moreno
Diana Araceli Curiel Reséndiz
Alejandro Federico Alva Martínez
Juan Pablo Huesca Quintero
Mariana Ramírez Acevedo
María Fernanda Velázquez Romero

Agradecimientos Gobierno Ciudad de México

Clara Marina Brugada Molina
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

José Mario Esparza Hernández
Secretario de Gestión Integral del Agua

Humberto Adán Peña Fuentes
Dirección General de la Comisión de
Recursos Naturales y Desarrollo Rural

Gabriela Osorio Hernández
alcaldesa de Tlalpan

Circe Camacho Bastida
Alcaldesa Xochimilco

Araceli Berenice Hernández Calderón
Alcaldesa Tlahuac

Julia Álvarez Icaza Ramírez
Secretaria del Medio Ambiente de la CDMX

Pedro Álvarez Icaza Longoria
Comisionado Nacional de Áreas Naturales Protegidas

Alejandro Encinas Rodríguez
titular de la Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial y de Metrópolis

Edna Elena Vega Rangel
Secretaria de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano

Efraín Morales Lopez
Director General Comisión Nacional del Agua

Roberto Capuano
Plan Hídrico Área Metropolitana Cuenca de Mexico

Agradecimientos

Nodo Tláhuac

Abuela Elenita Gaspar
Tío Vicente Gaspar
Elsa Hernández Gaspar
Berta Hernández Gaspar
Concepción Hernández Gaspar
Alfonso Loreto
Alejandra García Hernández
Manuel Edday Farfán Beltrán
Oralia Ruíz Miranda
Nadia Martínez Pérez
Eduardo Romero Martínez
Isidra Ramírez Molina
Antelmo García Hernández
Víctor Galicia
Ramón Flores Galicia
Aurelio López Torres
Grupo de vigilancia de la ciénega
Canoero Rafael García Méndes
Sra Olga Martínez
Grupo de Yoga Raíz en Movimiento
La Milpa del abuelo
Nidia Torres Ruiz
Mayra Nieves
Instituto Tecnológico de Tláhuac
Cátedra UNESCO

Nodo Xochimilco

Carmen Citlali Hernandez Jiménez
Karen Citlali Xolalpa Morales.
Juana Sanchez Sanchez.
Carmen Ebromares Membrillo
David Jiménez Garces

Félix Venancio González
Gerardo Sánchez Trejo
Job Alejandro Fuentes Zamora
Alexander Galicia Ramirez
Jazmin Ordoñez Ávila
Bertha Alicia Águilar Hernández
Tomás Rufino Norato
Maria Teresa Flores Barrera
Macrina Dehesa Sánchez
Maria Lourdes Dehesa Sánchez
Thyani Torres Pelenco.
Amalia Salas Casales.
Amalia Rosas Salas.
Rosalinda Rosas Salas.
Sembrando Cultura Ambiental y Chinampa Amanalli.
Caltongo Organizado.
Contraloria Puente de Urrutia.
Chinamperxs de San Gregorio.
Talleres de la Chinampa.
Grupo de distrito de Riego, Xochimilco.
Colectivo a Remover la tierra.
Colectivo Agroxolotl.

Nodo Centro

Amada Pérez Alvarez,
Jaqueline Valdéz Arzaluz,
Hugo Enrique González Figueroa Salinas
Diego Antonio Contreras Rodríguez

Nodo Lerma

Joel Osorio Gutiérrez
Evaristo Javier Gamboa Sánchez
Margarita Juana Jiménez Peñalosa
Enrique Carmona

Nodo Tula

Colectivo de Comunidades en Defensa de la Vida y el Territorio de la Región Tolteca
Rene Romero Rivera
Ollin Rodríguez de la Rosa
Monica Bibiana Rosas Luna
Reyna Aidee Mares Flores
Isolda Sansores Rodríguez

Nodo Zumpango

José Alfredo Vargas
Guillermo Leon Rodríguez
Comité de Agua Potable de San José la Loma
Comité de Agua Potable de la Colonia Santa Lucia
Daniel Vargas
José Ricardo Ovando Ramirez
Lizbeth Anabel Laguna Leal
Regina Monroy Bustamante
Lucia Quezada
Cristina Quezada
Universidad Autónoma del Estado de México
Claudia Karina Hernández Laguna
Comité de Agua Potable de San Sebastián
Ma Florinda Trinidad Leal Barrera
Aram Adair Leon Leal
Alan Pérez Ortega
Sistema de Agua Potable de San Lucas Xolox

Aide Vargas
Juanita María
Concepción Guerrero
Ivett Ramos
Maritza Alvarez
Zulema G Reyes
Sembradoras Melchor Ocampo
Eloi Pérez Vargas
Defensores de la Laguna de Axotlan

Nodo Texcoco-Acolhuacan

Teresa de Jesús González
Dra. Miriam Galán Reséndiz
M.C. David Delgado Viveros
Mtra. Saraí Salazar Arredondo
Dr. Jorge Adrián Flores Rangel
Pío Giovanni Chávez Segura
Prof. Santos Vázquez Cervantes
Profa. María De Lourdes Rodríguez Ramírez
Prof. Edmundo Pérez Godínez
C. Emilio García Ramírez
Mtro. José Luis Rico Robert
Prof. José Cruz Rodríguez
Dr. Juan José Agustín Reyes Rodríguez
René Baños
Sr. Miguel
Renata Báez Romero
Lidia Florencio
Laura Velázquez Florencio
Moria del Toro y familia
Ernesto Sánchez
Arqueol. Luis Morett Alatorre
Arqueol. Guillermo Acosta
Filemón Rojas Ramos
Rodolfo Hernández Casarreal
Víctor Daniel Contreras y familia
Don Cecilo
Rafael Villanueva García
Nikté Segura
Dr. Eliseo Cantellano
Joel Veltrejo
María Isabel Garcés Chávez
Dra. Eloísa Domínguez
Profa. María Elena Rocha
Profa. Pilar Ortega Bastida
Uriel España
Juan Manuel García
Brenda Raya
Diego Cervantes
Aída Juárez Olivares
Salvador V. Banda
Juan Antonio Juárez Moreno
Ernesto Adolfo Rodríguez Álvarez
Paola Mijangos Contreras
Emanuel Ibarra Calzadilla
Red de Organizaciones Ciudadanas del Acolhuacan
Comité Autónomo del Agua de Santa Catarina Acolman
Comité del Agua Santa Cruz de Arriba
Comité de Agua Potable y Saneamiento de San Nicolás Tlaminca
Comuna Axolotl
Proyecto Texcoco en el Tiempo
Proyecto “Espacio sobre la Enseñanza del Reciclamiento de Aguas Residuales a través de Humedales Artificiales en el Barrio de Santiaguito”

Autoridades de la Comunidad, Delegación y COPACI de Santiaguito
Proyecto Pronaii “Restauración socioecológica del Acolhuacan” del CONAHCYT y UACh
Patronato del Agua de Acolman
Red de Juventudes Teotihuacanas
Colectivo Ecolhua Texcoco
Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo (UACh)
Departamento de Agroecología de la UACh
Clase “Gestión y Sistemas de Manejo Ambiental” de la Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa
Preparatoria Comunitaria Xochihuacan
Colectivo Todas y todos somos el Río Coxcacoaco
Proyecto Pronaii 318971 “Fortalecimiento y articulación de sujetos colectivos para la defensa y gestión del agua en el territorio” del CONAHCYT y Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos
GeoGráfikas
Ethos Cartográfico
FES Zaragoza
Universidad del Bienestar Benito Juárez campus Iztapalapa
Soneros del Acolhuacan
Taller de Arte Múltiple A.C.
Trajinera del Conocimiento
Frente de Pueblos en Defensa de la Tierra
Manos a la cuenca
Guardianes del Territorio
Comité de Acción para el Saneamiento del Ambiente A.C.
Telesecundaria de Chiautla (ESTIC 55)
Colegio de Posgraduados
Muros de Agua
CONANP (Área de Protección de Recursos Naturales Lago de Texcoco-APRN)
Escuela Telesecundaria Vicente Rivapalacios.

Agradecimientos a los asesores

Equipo Jurídico
Arturo Valdez de la Cruz
Fabiola Vitte Torres
Oscar Arredondo

Equipo cartográfico
Juan Manuel García Reyes
Brenda Alejandra Raya Isidro

De registro y producción audiovisual:
Uriel López España
Juan Carlos Lazarini Ortega

Resumen

El **Proyecto de Restauración y Manejo Ambiental del río Tula** pretende la remediación ambiental y el saneamiento del río Tula mediante el uso de humedales artificiales.

El siguiente documento se divide en 4 capítulos:

En el capítulo I, se describe la problemática local desde la perspectiva de la comunidad y la vinculación del equipo técnico con los nodos sociales para el desarrollo de la propuesta conceptual, con el seguimiento y validación de la comunidad.

En el capítulo II, se resume el estudio hidrológico desarrollado para estimar los escurrimientos en el río Tula.

En el capítulo III, se describe la propuesta conceptual de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en el río Tula.

En el capítulo IV, se desarrolla una evaluación geológica y geotécnica de la zona de estudio como base para el desarrollo de la ingeniería del proyecto.

Contenido

I. Componente Social 20

1.1 Nuestra relación con el agua en la Región Tula 20

1.2 Problemática Local 22

1.2.1 Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental 22

1.2.2 Aguas Residuales y Trasvases 23

1.2.3 Río Tula 24

1.3 Cómo el Cambio de Paradigma Soluciona la Problemática 25

1.4 Integración de Saberes Comunitarios en el Proyecto Conceptual 27

1.5 Visitas de Campo y Levantamiento Fotogramétrico 30

1.5.1 Fotogrametría 31

1.5.2 Portal de Salida 32

1.5.3 PTAR Atotonilco y presa Requena 34

II. Estudio Hidrológico 38

2.1 Contexto Hídrico 38

2.2 Sistema Hidrográfico 39

2.3 Escurrimientos en el Río Tula 39

III. Propuesta de Humedales para la Restauración Ambiental del Río Tula 49

3.1 Humedal Artificial 49

3.2 Elementos ingenieriles 50

3.3 Especies vegetales 52

3.4 Tipos de humedales 53

3.4.1 Humedales Flotantes 53

3.4.2 Humedales de tratamiento de flujo horizontal (FTWS) 54

3.4.3 Sistema de Macrófitas Sumergidas 55

3.4.4 Humedal tipo francés o de Flujo Vertical 56

3.4.5 Humedal de tratamiento superficial de agua libre 56

3.5 Propuesta de humedales artificiales para las descargas del Portal de Salida y la Presa Requena 57

3.6 Propuesta de Humedales Construidos para el Río Tula 64

3.6.1 Alcance 64

3.6.2 Pasos iniciales 64

3.6.3 Tipos de humedales sugeridos 64

3.6.4 Dimensiones 65

3.6.5 Capas del sistema 65
3.6.6 Beneficios 67
3.6.7 Fases del proyecto 67
3.6.8 Costo estimado 67
3.6.9 Indicadores de éxito 67
3.6.10 Sinergias 68

IV. Evaluación Geológica-Geotécnica 70

4.1 Marco Fisio 70
4.1.1 Fisiografía 70
4.1.2 Geomorfología 72
4.2.3 Clima Regional. 73

4.2 Marco Geológico 75
4.2.1 Geología regional 75
4.2.2 Rocas calcáreas correlacionables con la formación Cuautla 76
4.2.3 Rocas andesíticas correlacionables con el Grupo Pachuca 76
4.2.4 Andesitas del Plioceno medio y superior 77
4.2.5 Formación Tarango 77
4.2.6 Depósitos Aluviales 78
4.2.7 Estratigrafía local 78
4.2.8 Reconocimiento geológico 80

4.3 Marco Geofísico 82
4.3.1 Transitorios electromagnéticos. (TEM,s) 82

4.4 Marco Geotécnico 83
4.4.1 Regiones Sísmicas en México. 83
4.4.2 Información geotécnica 85

Conclusión 87

Referencias 88

Índice de Figuras

Figura 1 Poblaciones de la región en Códice Boturini.....20
Figura 2 Flujo de trabajo para el desarrollo de los proyectos conceptuales. 28
Figura 3. Actividades realizadas en el encuentro con la comunidad.....29
Figura 4. Presentación del proyecto por parte del grupo social a la comunidad.....29
Figura 5. Actividad durante el Estudio Técnico Justificativo.....30
Figura 6. Personal del equipo técnico realizando Vuelos con Dron en la zona de la planta de tratamiento de Atotonilco. 32
Figura 7. Descarga del Túnel Emisor Oriente en el Portal de Salida.....32
Figura 8. Descarga del Túnel Emisor Central en el Portal de Salida 33
Figura 9. Descarga del río Cuautitlán en el Portal de Salida.....33
Figura 10. Derivación de Portal de Salida hacia la PTAR Atotonilco. 34
Figura 11. Excedencias de Portal de Salida hacia el río Tula.....34
Figura 12. Vista aérea de la PTAR Atotonilco.....35
Figura 13. Diagrama con ubicación de los componentes de la PTAR Atotonilco.....36
Figura 14. Vista aérea de la presa Requena.....36
Figura 15. Contexto Hídrico del Plan Maestro Tula. 38
Figura 16. Subsistema Hidrográfico del Portal de Salida.....40
Figura 17. Subsistema del río Tula hasta la presa Endhó. 41
Figura 18. Escurrimientos medios diarios sobre el río Cuautitlán. 42
Figura 19. Excedencias en la descarga del Túnel Emisor Central. 43
Figura 20. Excedencias en la descarga del Túnel Emisor Oriente.....44
Figura 21. Excedencias de la presa Requena. 45
Figura 22. Escurrimientos medios diarios sobre el cauce del río Tula.....46
Figura 23. Corte esquemático humedal flotante, componentes del humedal.....53
Figura 24. Ejemplo de Islas flotantes en el Parque Ecológico de Xochimilco, Ciudad de México.....54

Figura 25. Corte esquemático humedal flujo horizontal, componentes del humedal. 55
Figura 26. Corte esquemático humedal de macrófitas sumergidas, componentes del humedal. 55
Figura 27. Corte esquemático humedal flujo vertical, componentes del humedal 56
Figura 28. Corte esquemático humedal flujo superficial, componentes del humedal 57
Figura 29. Ubicación propuesta para los Humedales Artificiales. 57
Figura 30. Configuración de módulos para el humedal 1. 59
Figura 31. Configuración de módulos para el humedal 2. 60
Figura 32. Estimación del caudal de tratamiento en los humedales 60
Figura 33. Sedimentador Vórtice Nautilus Pond, Canada, Soluciones Hidropluviales/Source2Source 61
Figura 34. Phragmites australis 62
Figura 35. Typha latifolia 62
Figura 36.Sagitaria macrófila 63
Figura 37. Elodea sp 63
Figura 38. Cola de zorro 63
Figura 39. Najas minor 63
Figura 40. Nenúfar. 64
Figura 41. Diagrama 1: Proceso General 66
Figura 42 Localización y distribución de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico. 71
Figura 43. Elaboración propia. Localización y distribución de Subprovincia fisiográfica. 72
Figura 44. Localización morfológica regional de la zona de estudio. 73
Figura 45. Elaboración propia, base MDE INEGI Localización y extensión de climas en la zona. 74
Figura 46. Localización de Predio sobre Carta Hidrológica de la República Mexicana. ... 75
Figura 47. Elaboración propia, base geológica tomada de DETENAL 1978. Geología regional de la zona de estudio. 76

Figura 48. Tomado de SGM 2009 Sección estratigráfica esquemática 78
Figura 49. Secuencia de tobas Limo-Arcillosas, que afloran en la zona de estudio..... 79
Figura 50. Secuencia Volcanoclásticas, que afloran en la zona de estudio..... 79
Figura 51. Vista general..... 80
Figura 52. Vista zonas de cultivo de la zona 80
Figura 53. Detalle de secuencia corriente 80
Figura 54. Zonas de cultivo..... 80
Figura 55. Trazo de rio en zona de interés..... 81
Figura 56. Vista general de trazo de rio 81
Figura 57. Detalle de paredes existentes 81
Figura 58. Zona baja de rio 81
Figura 59. Recorrido por zona..... 81
Figura 60. Detalle de parte baja..... 81
Figura 61. Sección de Calicateo Geo-eléctrico en la zona de estudio 82
Figura 62. Perfil de resistividad real en la zona de estudio..... 83
Figura 63. Figura tomada de: Manual de diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad. Zonas Sísmicas de México..... 84
Figura 67. Zona con información geotécnica..... 85
Figura 68. Perfil geotécnico del TEO próximo al Portal de Salida..... 86

Índice de cuadros

Cuadro 1. Estaciones hidrométricas de estudio. 41

.

Acrónimos, Siglas y Unidades

Acrónimo, siglas y unidades	Significado
CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CDMX	Ciudad de México
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno, utilizando dicromato de potasio como agente oxidante
NOM	Normal Oficial Mexicana
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (México)

.

Glosario

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.

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.

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

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.

Parámetro. Una propiedad que se mide o se observa.

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%

Proyecto de Restauración y Manejo Ambiental del río Tula

Informe final

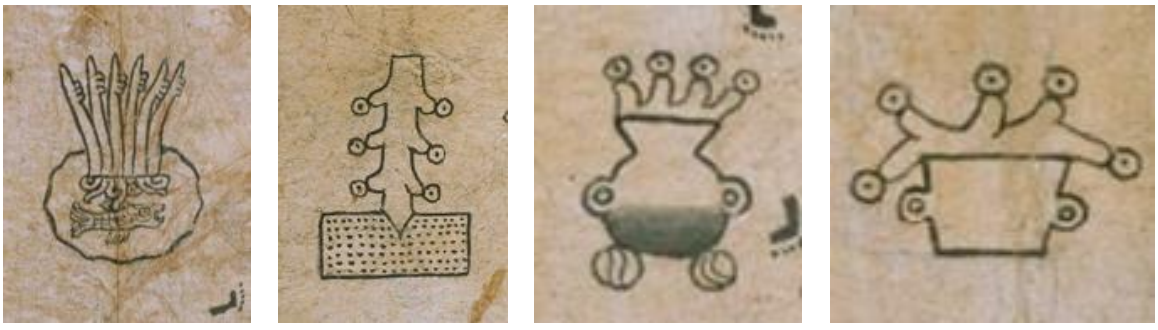
I. Componente Social

1.1 Nuestra relación con el agua en la Región Tula

El territorio del sur del Valle del Mezquital abarca la subcuenca del Río Tula y el Acuífero del Valle del Mezquital. Ha sido habitado por diversos pueblos y culturas. La vida urbana y de aldeas se estableció en esta región hace al menos 1,600 años, y la presencia del agua ha sido vital en cada uno de estos procesos humanos.

Aquí hubo asentamientos teotihuacanos por el año 400 d.C. Destacaron por su producción de cal a escala industrial, empleaban constantes cantidades de agua en sus procesos productivos. Posteriormente, los toltecas se asentaron junto al río Tula y afluentes (Coscomate, Rosas, Salado y El Salto), consolidando en Tollan-Xicocotitlan, y en un radio de 1,000 km^2, el epicentro del poder mesoamericano de su época. Las llanuras aluviales de estos ríos, ricas en nutrientes, fueron aprovechadas para la agricultura mediante sistemas de riego, primero teotihuacanos y luego toltecas, basados en diques y canales, que se expandieron por la región y han perdurado a lo largo del tiempo.

Es evidente que los pueblos que habitaron esta región otorgaron a los cuerpos de agua y ecosistemas inmediatos un valor simbólico primordial. Esto se refleja en los nombres de las poblaciones, donde el agua funge como elemento identitario, como se observa en el Códice Boturini, que hace referencia al tránsito azteca por la región antes de su asentamiento en Tenochtitlan:



a) Tollan b) Atitalaquia c) Atotonilco d) Apaxco

Figura 1 Poblaciones de la región en Códice Boturini

- Tollan: “en el tular”, representando un ecosistema acuático con tules y un pez.
- Atitalaquia: “Lugar donde se mete el agua”, posiblemente en referencia a una infiltración de un cuerpo de agua.
- Atotonilco: “Lugar donde brota agua caliente”, simbolizado por una olla tiznada y agua hirviendo, en referencia a las aguas termales locales.
- Apaxco: “Lugar donde escurre el agua”, en posible alusión a un manantial o una depresión (cuenco) sobre un cerro local.

Estos cuatro topónimos corresponden a los municipios actuales que conforman la zona núcleo de la Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental Tolteca: Tula, Atitalaquia, Atotonilco y Apaxco.

Este territorio ha proporcionado, desde tiempos inmemoriales, una gran diversidad de bienes naturales a las poblaciones humanas que lo han habitado y aprovechado sabiamente, como es el caso vigente del pueblo hñahñu, de rica memoria y herencia.

Con la fase colonial, la relación con el agua se fue transformando. Hubo deforestación masiva para introducir pastoreo, especialmente, de ovejas. Los ecosistemas fueron perdiendo diversidad, sobre todo, con la disminución de pinos, encinos y madroños, árboles que hoy sobreviven en las zonas altas de la subcuenca. El ecosistema mixto cedió al matorral xerófilo, donde predominaron cactáceas, agaves, arbustos y árboles espinosos. Estos cambios alteraron el paisaje y las interacciones entre especies nativas, y con ello el ciclo del agua también se modificó, lo que se tradujo en una disminución de los cuerpos superficiales y en la recarga del acuífero.

En 1781, tras más de un siglo de construcción, se inauguró el Tajo de Nochistongo, cuyo objetivo era desviar las aguas del río Cuautitlán hacia el río Tula, para contribuir así a la desecación de los lagos de la Cuenca de México. Esta fue la primera gran obra de infraestructura hidráulica para trasvases que llegó a la región.

La lógica del trasvase y del cultivo por riego se intensificó durante el periodo liberal y el México posrevolucionario. Porfirio Díaz implementó en 1900, con la llegada del drenaje profundo a Tequixquiac, un decreto para la dotación de aguas para riego, que irrigó en su origen cultivos de haciendas. Se sumó a esto, la construcción de la presa Requena en 1919, todos estos proyectos marcaron el inicio de la entrada masiva de aguas negras a la zona.

Se fomentó entonces una narrativa hegemónica que sostiene que la región es árida, con una población indígena marginada y con escasez de agua, ante lo cual se plantea que es prácticamente requerida la llegada de las aguas negras.

Esta dinámica se consolidó en la segunda mitad del siglo XX. La presa Endhó, construida a mediados de siglo, originalmente retenía agua dulce del río Tula para el riego agrícola, la pesca, el turismo y el deporte. Sin embargo, a partir de 1973, con la entrada en

operación del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México y su Zona Metropolitana, la región se transformó en la cloaca de la capital al recibir descargas de aguas residuales domésticas, industriales y pluviales, lo que permitió la expansión de los distritos de riego con aguas cargadas de nutrientes para los cultivos, pero también convirtió a los ríos y presas de la subcuenca en fuentes de contaminación por aguas negras.

El Túnel Emisor Oriente, inaugurado en 2019, es el componente más reciente de este complejo sistema. Con su gran capacidad de flujo en el trasvase, el TEO ha generado un riesgo social significativo, como lo evidenció el trágico desbordamiento del Río Tula en 2021.

1.2 Problemática Local

1.2.1 Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental

La región tolteca ha sido considerada como una Zona de Sacrificio, Infierno Ambiental o Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA). Esta región abarca en su zona núcleo los municipios de Apaxco, Atitalaquia, Atotonilco y Tula, principales generadores y dispersores regionales de agentes tóxicos y procesos contaminantes, que implican una grave amenaza para la salud ambiental.

El origen principal de estos elementos de contaminación es el corredor industrial local y sus procesos de producción, y la llegada, dispersión y riego de las aguas residuales del drenaje profundo.

En esta región convergen algunas de las fuentes de contaminación más significativas a nivel mundial: una refinería, una termoeléctrica, 4 cementeras y 3 caleras, así como la minería no metálica a cielo abierto asociada a estas industrias, 3 fábricas de agroquímicos, 115 industrias de diversos rubros, riego agrícola de mínimo 80 mil hectáreas con aguas negras, uso de agroquímicos y siembra de maíz transgénico. El extractivismo de agua para uso industrial debe ser analizado con énfasis en casos como el de la embotelladora de agua potable de exportación Niagara Bottling, ubicada en el Arco 53. Así se ha consolidado este infierno ambiental en un paraíso industrial.

A partir de finales de 2019 y principios de 2020, a través de la Caravana Toxitour México, se impulsó el Convenio Marco de Participación, firmado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Secretaría de Salud y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Este convenio proponía el seguimiento a la propuesta del exsecretario del

Medio Ambiente, Víctor Manuel Toledo, de solicitar al ejecutivo federal la declaratoria de Zona de Restauración Ecológica para los municipios de Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tula de Allende y Apaxco como zona núcleo, así como otros nueve municipios más dentro de una RESA. El convenio de participación se entorpeció en su desarrollo, ya que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) se distanció de los compromisos asumidos. La declaratoria llegó en 2024, modificó drásticamente sus polígonos y dejó fuera a muchos grupos comunitarios que venían participando en el proceso. El nuevo proyecto, que SEMARNAT siempre gestionó en paralelo con el grupo MST, tuvo como eje central a la presa Endhó y lo conocido como “su zona de influencia”. A final de cuentas, este esfuerzo subraya la urgencia de que tanto el gobierno como la población en general implementen proyectos que promuevan la reparación del daño y la restitución de derechos en un proceso de justicia socioecológica para la región.

1.2.2 Aguas Residuales y Trasvases

Uno de los conflictos ambientales más notables y complejos de la región tolteca es el de las aguas residuales. La presencia de estas ha traído afectaciones sanitarias, contaminación de acuíferos y pozos por infiltraciones tóxicas, dispersión de contaminantes por riego agrícola, daños al río Tula y su ecosistema y la inundación de la ciudad de Tula en 2021, con riesgo de repetición.

Las aguas residuales son transportadas a través de largos y costosos tubos que provienen de la ciudad capital, vía el drenaje profundo. Estas aguas son expulsadas en los portales de salida de los emisores, principalmente, en Atotonilco de Tula, para encauzar por el Río Tula, con una menor porción en Tequixquiac. Una vez allí, se vierten en canales de riego agrícola y en los diversos afluentes, como el río Salado, el río Tepeji y el propio río Tula.

Solo una menor cantidad de agua que arriba es tratada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Atotonilco. La calidad del agua obtenida no ha beneficiado al uso agrícola, pues se le han restado nutrientes y no se le han eliminado contaminantes nocivos, además de contener cloro que afecta tierra y cultivos. Los lodos excedentes del tratamiento se han almacenado en el monorrelleno, con ellos se han generado afectaciones sanitarias debido a los polvos y plagas que se han dispersado.

Los volúmenes de agua trasvasada al río Tula, sumados a los escurrimientos locales y el agua que no se utiliza en el riego ni se evapora, son conducidos hasta la presa de Zimapán. Desde ahí, a través de un acueducto, el agua se transporta al estado de

Querétaro para satisfacer la demanda de grandes usuarios. Así parece que el acanalamiento del río Tula no responde a las necesidades reales de los habitantes de Tula ni de los municipios y comunidades por los que atraviesa el río en su trayecto por el Valle del Mezquital, el objetivo principal sugiere que se utiliza este río como un canal de desalojo para el agua excedente de la megalópolis, con la finalidad de redistribuirla después hacia otros estados.

El acuífero del Valle del Mezquital presenta altos niveles de disponibilidad, debido a más de 100 años de recarga incidental a través del riego agrícola. Ante esto, el gobierno federal busca trasvasar agua limpia de este acuífero hacia la Cuenca de México, con el fin de facilitar el desarrollo del Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA), proyectado sobre el acuífero en detrimento del corredor Cuautitlán-Pachuca. Esta situación ha hecho sentir vulnerables a los pueblos del mezquital, pues se augura que se agudice un metabolismo perverso de dinámica neocolonial del siglo XXI, caracterizada por trasvases de entrada y salida de agua "sucia-limpia" en una relación federal que refleja un desequilibrio centro-periferia.

Este enfoque podría allanar el camino para grandes proyectos de desarrollo industrial e inmobiliario, contribuyendo a la expansión de la hiperurbanización e industrialización en el centro del país. Ejemplos de esto incluyen el corredor logístico/industrial TMEX Park, que conecta el AIFA con la ciudad de Pachuca, además de los numerosos proyectos inmobiliarios que se promueven en paralelo.

Las condiciones que han dado origen a estas problemáticas se han acumulado durante décadas, debido, en gran medida, a una planificación no sustentable en la relación intercuencas, a la falta de saneamiento de aguas urbanas e industriales, a la corrupción que ha priorizado los grandes negocios sobre las necesidades reales, a la discriminación estructural que favorece a la capital en detrimento de la periferia, y al cambio climático, que descarga lluvia intensa en períodos cortos de tiempo.

1.2.3 Río Tula

Los ecosistemas ribereños del río Tula, que han sobrevivido a la contaminación, se caracterizan por la presencia de ahuehuetes ancestrales, sauces y otras especies propias de humedales, como tules y carrizos. Sin embargo, desde 2017, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha implementado obras (frustradas en la 1ra fase por acciones comunitarias) para ampliar y revestir el cauce del río para dar mayor capacidad de flujo

de agua, ante el fin de operaciones del Túnel Emisor Oriente, en 2019. Estas obras han agravado el ecosistema por las talas masivas por secciones. Las autoridades se han negado a considerar soluciones alternativas, basadas en paradigmas de mayor sustentabilidad hídrica, en la conservación ambiental y en la recuperación del ciclo del agua.

Es importante destacar que, a dos años de la inauguración del Túnel Emisor Oriente, el 6 de septiembre del 2021 se produjo una inundación sin precedentes que afectó a más de 30,000 viviendas, principalmente en la zona urbana de Tula. Las intensas lluvias en el Estado de México y en la propia subcuenca colmaron los emisores y afluentes locales, pero esto se debió, sobre todo, a la forma estructural en que se gestionaron estas caudalosas avenidas, con una metodología más política que técnica. Es incluso un problema de origen, desde el diseño del sistema.

Aún con la crisis encima por la pandemia de COVID-19, esa noche el hospital del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) se hundió, al igual que toda esa zona de la ciudad, lo que resultó en la pérdida de 17 vidas. Al bajar el agua la ciudad quedó arrasada por lodos de drenaje, se terminó desechando casi toda pertenencia material. La economía y la vida social, ya afectadas por la pandemia, se estancaron aún más. Mil anécdotas sobre esa noche, lo que dejó y se llevó, calan en la memoria colectiva.

1.3 Cómo el Cambio de Paradigma Soluciona la Problemática

Para proponer un cambio de paradigma en el manejo de aguas negras en el Valle del Mezquital, es fundamental reconocer que la mitad del problema relacionado con el agua en la región tolteca debe ser abordado desde la Cuenca de México. La práctica actual de trasladar el problema de las aguas residuales y pluviales a Tula no solo es insostenible, sino también irresponsable. La Ciudad de México debe retener y tratar esta agua para su propio uso, reduciendo la carga sobre el Valle del Mezquital.

Cambios Necesarios en esta relación intercuencas:

- Descentralizar la visión hegemónica de la “Cuenca de México” y reconocer que esta no puede considerarse de manera aislada, sino dentro de un contexto de “cuencas interconectadas”. Esta nueva perspectiva debe visibilizar las desigualdades históricas y estructurales que han definido la relación entre la Cuenca de México y las otras cuencas aledañas, como el Valle del Mezquital y la Cuenca del Lerma, además de procurar justicia. La relación desigual ha sido

sostenida por argumentos políticos que priorizan las necesidades de la Ciudad de México, sin atender sus afectaciones y el papel crítico que estas otras cuencas han desempeñado en el manejo del agua y sus desechos.

- Debe impulsarse un nuevo modelo del manejo de las aguas residuales y pluviales en la Cuenca de México y su entorno.
- Se deben impulsar medidas para detener el aumento paulatino de volúmenes del trasvase del drenaje profundo a la región tolteca, incluso promover su decrecimiento.
- Frenar la dinámica neocolonial de llevar al Valle del Mezquital un trasvase de entrada de agua sucia y promover a la par el acondicionamiento de otro trasvase, pero de salida de las aguas limpias del acuífero del Mezquital para abastecer a la ciudad capital.
- Promover la participación de especialistas y comunidades en diálogo directo y diseño y construcción de alternativas en coparticipación.
- Exigir, desde cuencas interconectadas, el reconocimiento por autoridades del gobierno del Estado de Hidalgo de contralorías autónomas del agua.
- Es necesario desarrollar infraestructuras que permitan aumentar y diversificar cuerpos de agua y vasos reguladores para contener y almacenar de forma efectiva los picos de lluvia. Esto reducirá el riesgo de inundaciones y permitirá la liberación controlada y segura de agua, con esto se beneficiará al sector agrícola durante la temporada de estiaje. Este sistema brindaría a los campesinos del Valle del Mezquital acceso más equitativo al agua, mejoraría los riegos a lo largo del año y aseguraría un uso estratégico del agua en periodos críticos.
- Un modelaje integral de restauración del río debe enfocarse en la disminución de los volúmenes de agua vertidos al caudal natural, garantizar seguridad ante los volúmenes de las descargas y preservar el equilibrio del ecosistema ribereño.
- La restauración debe incluir la paulatina recuperación del cauce o su reforestación que ha sido alterada por la canalización, y su integración urbana para convertir el río en un espacio vital para la comunidad, además de promover su uso como un río de vida.

Esta propuesta debe diseñarse con una mirada incluyente y participativa, donde se combine el conocimiento experto con las contribuciones comunitarias. Involucrar a los diversos sectores —comunidades, académicos, campesinos y autoridades— en el diseño y gestión del modelo de restauración es clave para garantizar que las soluciones sean sostenibles, equitativas y adaptadas a las necesidades reales de la región. De esta manera, no solo se reducirá la presión sobre el Valle del Mezquital, sino que se generarán

beneficios sociales, ecológicos y económicos para ambas cuencas, fomentando una relación hídrica más justa y sostenible a largo plazo.

1.4 Integración de Saberes Comunitarios en el Proyecto Conceptual

Una parte fundamental en la concepción de los proyectos conceptuales, fue conocer la problemática de cada región y entender el funcionamiento actual de los sistemas de abastecimiento, drenaje, riego y navegación en cada uno de los sitios. Este entendimiento sería incompleto sin incorporar el conocimiento comunitario del agua, que aporta una visión insustituible sobre las dinámicas locales.

A gran escala, la extracción, distribución, saneamiento y drenaje del recurso hídrico son gestionados por entidades gubernamentales como CONAGUA, SACMEX, CAEM y CORENADR, a través de la infraestructura hidráulica disponible. Sin embargo, a pequeña escala, son las comunidades y los usuarios quienes enfrentan la tarea de adaptar estos recursos —frecuentemente insuficientes y de mala calidad— para satisfacer sus necesidades. Ellas se ven obligadas a buscar soluciones para mitigar afectaciones como inundaciones o contaminación, asumir los costos derivados de una mala gestión, y desarrollar estrategias resilientes frente a estas problemáticas. Por ello, para comprender verdaderamente el funcionamiento integral del sistema y sus vulnerabilidades, es imprescindible recurrir al conocimiento en sitio que poseen las comunidades.

Además, no se trata únicamente de entender el sistema desde un enfoque técnico, sino también de reconocer cómo los habitantes perciben su operación desde perspectivas sociales y culturales. En muchos casos, los sistemas actuales interfieren con el manejo tradicional del agua, alterando prácticas culturales profundamente arraigadas en las comunidades.

El conocimiento comunitario del agua se integró en la concepción de los proyectos conceptuales de dos maneras claves: primero, para entender el funcionamiento integral de los sistemas hídricos y sensibilizarnos frente a sus afectaciones, y segundo, para diseñar soluciones que sean verdaderamente holísticas, considerando tanto las necesidades técnicas como las perspectivas sociales y culturales de las comunidades.

Para que las propuestas conceptuales sean técnicamente fundamentadas y socialmente viables, articuladas con los saberes comunitarios y la acción colectiva de los nodos de

incidencia, se siguieron los siguientes cinco principios fundamentales propuestos por McCall y Álvarez (2023, pp. 16-17):

- Representar el conocimiento espacial local de la comunidad en productos cartográficos que aporten al diagnóstico y gestión del territorio.
- Consolidar un intercambio flexible y adaptable entre los saberes comunitarios y el conocimiento de expertos, adecuado al entorno social, cultural y físico del territorio.
- Asegurar que el acceso y el uso de la información del conocimiento espacial local representado quede bajo la responsabilidad de las personas que proporcionaron dicho conocimiento.
- Crear espacios de diálogo y formación para capacitar en el manejo de tecnologías de información geográfica que sean de fácil utilidad.
- Combinar distintas metodologías participativas con instrumentos tecnológicos como vuelos de dron para obtener imágenes del territorio, aplicaciones de celular para levantar puntos en campo, entre otras.

En la figura 2 se muestra el flujo de trabajo realizado entre el equipo social, técnico y de cartografía comunitaria, para el desarrollo de los proyectos conceptuales.

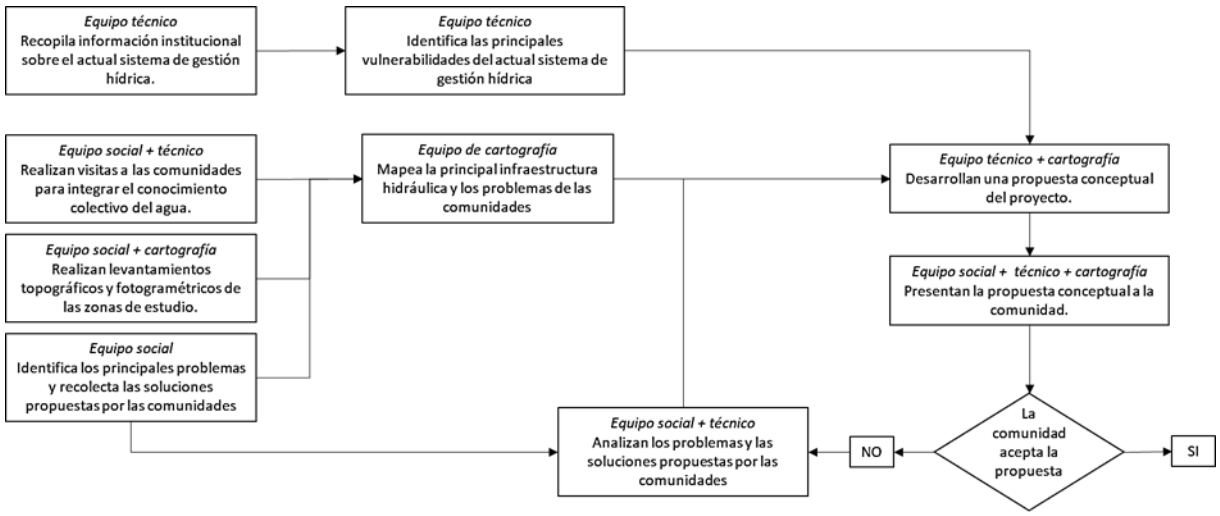


Figura 2 Flujo de trabajo para el desarrollo de los proyectos conceptuales.

Figura 3. Actividades realizadas en el encuentro con la comunidad.

En la figura 3 se muestran las actividades realizadas en el encuentro con la comunidad, se realizaron acciones de concientización por parte de la comunidad, sirviendo como una introducción para la plática por parte del grupo promotor de Tula y el grupo técnico

Figura 4. Presentación del proyecto por parte del grupo social a la comunidad.

En la figura 4 se muestra la presentación del proyecto por parte del grupo social a la comunidad, la presentación se llevó a cabo en el quiosco del centro de Tula, además se abordaron las inquietudes de la comunidad, estas fueron respondidas por el grupo técnico que también estuvo presente para mostrar la metodología de trabajo, así como unos primeros esquemas de un anteproyecto de la zona.

Figura 5. Actividad durante el Estudio Técnico Justificativo

En la figura 5 se muestra la actividad durante el Estudio Técnico Justificativo para la Zona de Restauración Ecológica en el área de influencia de la Presa Endhó, realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales para justificar la expedición del Decreto por el que se declara zona de restauración ecológica el área de influencia de la Presa Endhó, se tuvo una intervención en la mesa del Agua, donde se comentó la necesidad de trabajar en conjunto con diferentes secretarias de diferentes estados para poder abordar el tema de las aguas residuales que desembocan en el río Tula.

1.5 Visitas de Campo y Levantamiento Fotogramétrico

Los levantamientos fotogramétricos tienen el objetivo de integrar carpetas de información que faciliten la observación de relaciones entre los componentes hídricos urbanos de cada sitio, así como visualizar los potenciales espacios para cada emplazamiento.

El material obtenido es información actualizada de los sitios y de un formato de alta calidad (4K), teniendo como resultado un trabajo adecuado para llevar a cabo la modelación tridimensional a partir de nubes de puntos en los proyectos conceptuales de cada nodo.

Estos vuelos fueron realizados a lo largo del año 2023 y 2024 en distintos escenarios climatológicos, en acompañamiento de los representantes de cada nodo que aportaron un acercamiento con cada problemática local, esto ha representado un enlace de colaboración que permitió obtener esta información.

Por otro lado, el objetivo primordial de las visitas de campo fue el de sensibilizar al grupo técnico con el territorio de cada región, así como de escuchar las opiniones de los pobladores de estas zonas y poder tener un panorama más amplio de la zona de estudio.

Sí bien por la extensión de las zonas de estudio no fue posible hacer los vuelos sobre todos los cuerpos de agua, la utilidad de esta información también radica en la posibilidad de crear montajes de los renders o ubicar los modelos propuestos para la gestión del agua en un escenario actual que permita dar una idea sobre su integración, también es importante hacer mención de otras herramientas empleadas durante el proceso como GPS, información oficial de INEGI o la propia experiencia local de los nodos para determinar las zonas de estudio a partir de un acercamiento seguro a las zonas, la integración de esta información iría evolucionando agregando nuevos determinantes o temas de interés a la información recopilada.

1.5.1 Fotogrametría

La fotogrametría es la técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto.

El concepto de fotogrametría es: "medir sobre fotos". Si trabajamos con una foto podemos obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si trabajamos con dos fotos, en la zona común a éstas (zona de traslape), podremos tener visión estereoscópica o, dicho de otro modo, información tridimensional.

Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición.

Figura 6. Personal del equipo técnico realizando Vuelos con Dron en la zona de la planta de tratamiento de Atotonilco.

1.5.2 Portal de Salida

El recorrido por el cauce del río Tula inicia en el Portal de Salida. En las instalaciones de este conjunto de obras se pudo apreciar la magnitud de los escurrimientos que llegan de la Zona Metropolitana del Valle de México y descargan hacia el río Tula. A continuación, se muestran las imágenes obtenidas de los ingresos, derivaciones y excedencias del Portal de Salida.

Figura 7. Descarga del Túnel Emisor Oriente en el Portal de Salida

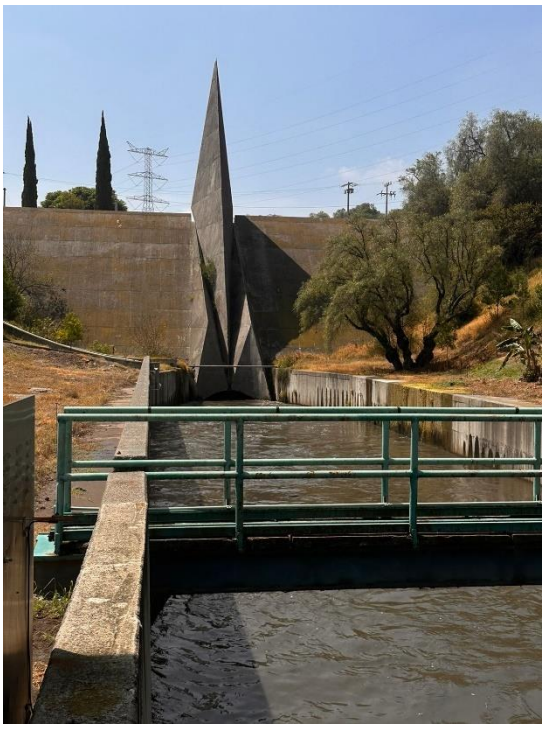


Figura 8. Descarga del Túnel Emisor Central en el Portal de Salida

Figura 9. Descarga del río Cuautitlán en el Portal de Salida

Figura 10. Derivación de Portal de Salida hacia la PTAR Atotonilco.

Figura 11. Excedencias de Portal de Salida hacia el río Tula.

1.5.3 PTAR Atotonilco y presa Requena

La PTAR Atotonilco recibe una fracción de los escurrimientos que llegan al Portal de Salida, pero solo trata el caudal que demandan las unidades de riego; el resto es regresado al cauce del río Tula.

En la figura 12 se muestra una vista aérea de la PTAR Atotonilco. En ella se puede observar las excedencias de la PTAR hacia el cauce del río Tula. En la figura 13, se identifican los diferentes procesos de la planta de tratamiento.

Figura 12. Vista aérea de la PTAR Atotonilco

Link de visualización de foto 360°: PTAR Atotonilco y presa Requena

https://www.google.com/maps/@19.964382,-99.2987244,3a,64.5y,353.3h,67.85t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipN9hj4wIJ0vByu0q8Jm9Iozr-V_94MR2dmp2O1r!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Flh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipN9hj4wIJ0vByu0q8Jm9Iozr-V_94MR2dmp2O1r%3Dw900-h600-k-no-pi22.148592394398605-ya353.299021834871-ro0-fo100!7i8192!8i4096?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MTExNy4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

La presa Requena regula los escurrimientos provenientes del río del mismo nombre. Este río es uno de los tres afluentes principales del actual río Tula aguas abajo del Portal de Salida.

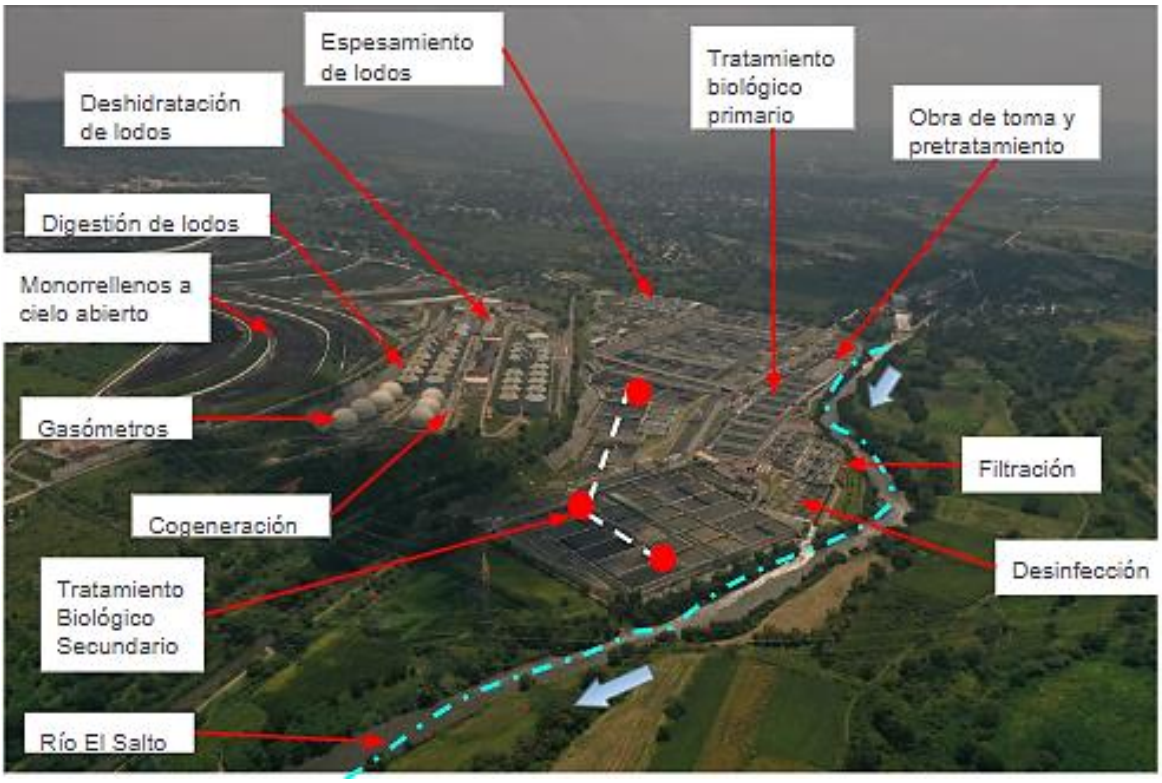


Figura 13. Diagrama con ubicación de los componentes de la PTAR Atotonilco

Figura 14. Vista aérea de la presa Requena

•

Capítulo 2
Estudio Hidrológico

II. Estudio Hidrológico

2.1 Contexto Hídrico

El actual río Tula nace en la estructura hidráulica llamada el **Portal de Salida**, pocos kilómetros aguas arriba de la descarga de la presa Requena, en el estado de Hidalgo. Sigue su cauce a través de la ciudad de Tula hasta descargar en el vaso de la presa Endhó. En su recorrido, recibe las descargas de otros cauces naturales como el río Rosas.

Al **Portal de Salida** llega gran parte de las descargas residuales y pluviales de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), específicamente aquellas recolectadas por el Túnel Emisor Central (TEC) y el Túnel Emisor Oriente (TEO), que se suman a los escurrimientos del río Cuautitlán.

Solo una fracción de las descargas que llegan al Portal de Salida son derivadas a la planta de tratamiento Atotonilco, el resto, descarga directamente sobre el cauce del río Tula sin ningún tratamiento y por lo tanto con una carga de contaminantes elevada.

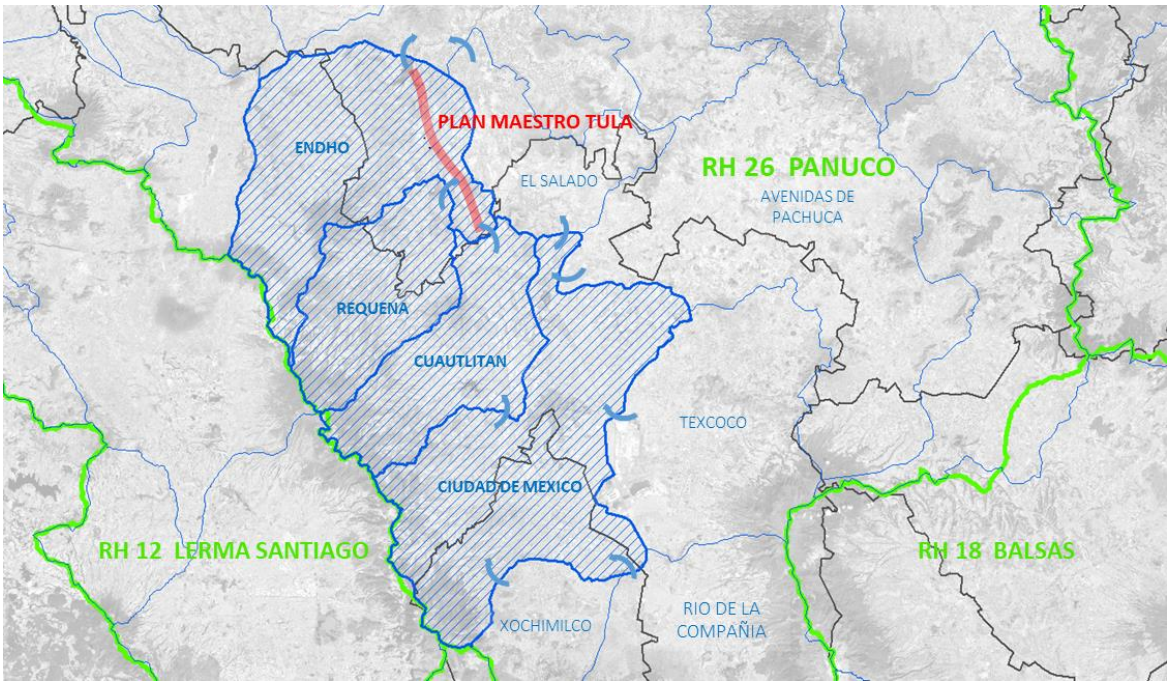


Figura 15. Contexto Hídrico del Plan Maestro Tula.
(— Estado, — Región Hidrológica, — Cuenca Hidrográfica)

El **Plan Maestro Tula** se centra en el saneamiento de este tramo del río Tula, desde el **Portal de Salida** hasta el vaso de la presa Endhó, y se suma a las acciones del **Programa de Restauración Ecológica de la Región Tula**.

En un contexto hídrico, el cauce del río Tula se ubica en la cuenca superficial de la presa Requena y Endhó. Sin embargo, las descargas residuales de la ZMVM, a través del **Portal de Salida**, se administran desde las cuencas superficiales de la Ciudad de México y del Río Cuautitlán (figura 15).

2.2 Sistema Hidrográfico

El sistema hidrográfico del Plan Maestro Tula se puede dividir en dos partes. La primera, aguas arriba del Portal de Salida, que comprende la red de drenaje del río Cuautitlán, del Túnel Emisor Central y del Túnel Emisor Oriente. Y la segunda parte, aguas abajo del Portal de Salida, que comprende el tramo del cauce a intervenir con su llanura de inundación y afluentes.

La red hidrográfica del subsistema del Portal de Salida comprende a todos los ríos del poniente. Estos ríos son interceptados por el Interceptor Poniente, el vaso de Cristo y el Emisor Poniente. Además, comprende al Drenaje Profundo de la Ciudad de México, que alimenta al Túnel Emisor Central, y al Túnel Emisor Oriente (figura 16).

La red hidrográfica del subsistema del río Tula comprende el tramo del río Tula, desde la descarga del Portal de Salida hasta el vaso de la presa Endhó, las descargas de la presa Requena y del río Rosas (figura 17).

2.3 Escurrimientos en el Río Tula

Se refiere al caudal de agua que escurre sobre el cauce del río Tula y se estima como la suma de las descargas del Portal de Salida y de la presa Requena.

Para estimar estas descargas, se reconstruyen las series de escurrimientos medios diarios registrados en el rio Cuautitlán, el Túnel Emisor Central, el Túnel Emisor Oriente y la obra de excedencia de la presa Requena. En el cuadro 1 se muestra una relación de las estaciones hidrométricas utilizadas en el estudio.

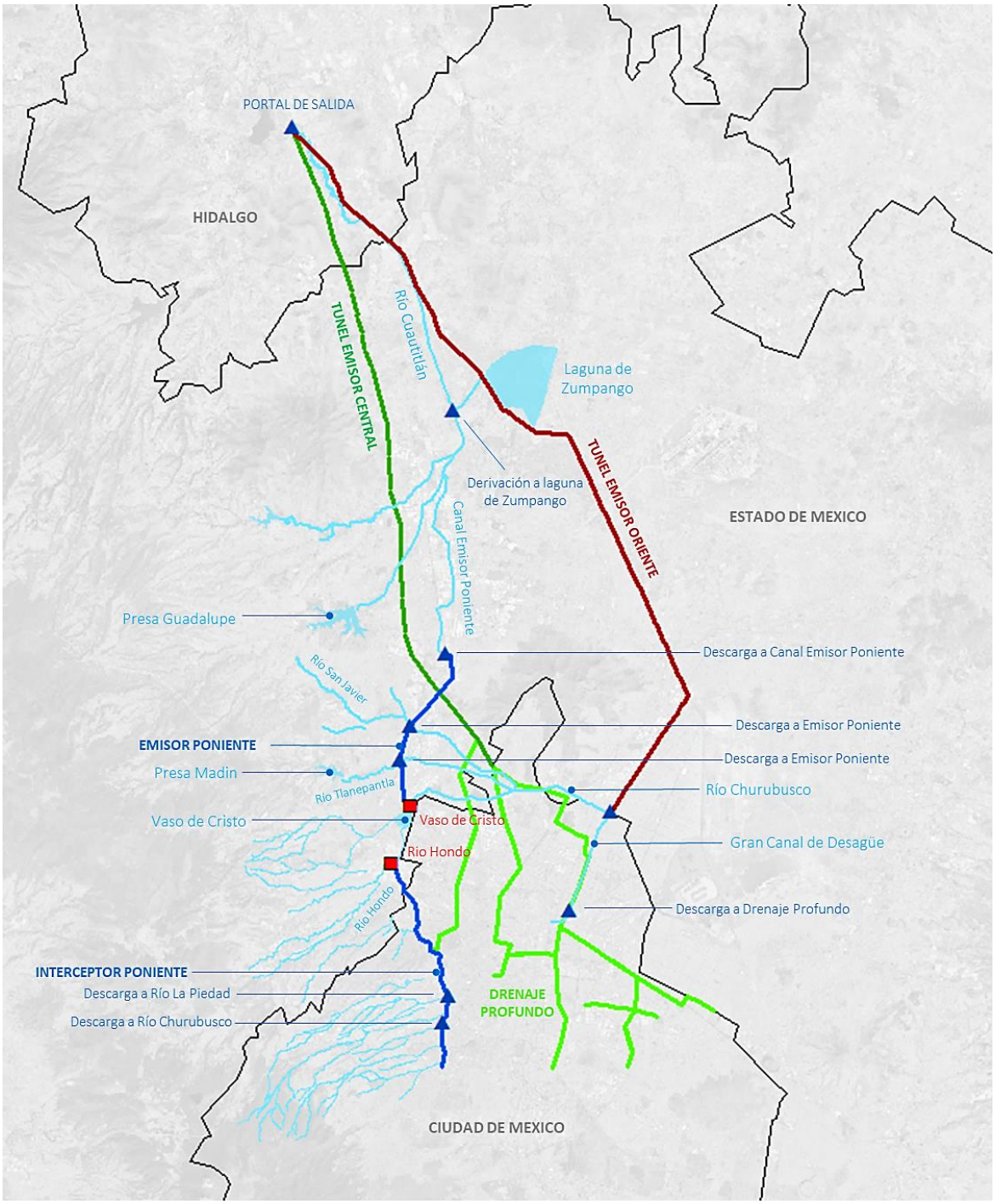


Figura 16. Subsistema Hidrográfico del Portal de Salida.
(— Estado, — Corriente, ■ Planta de Bombeo, Δ Obra de control)

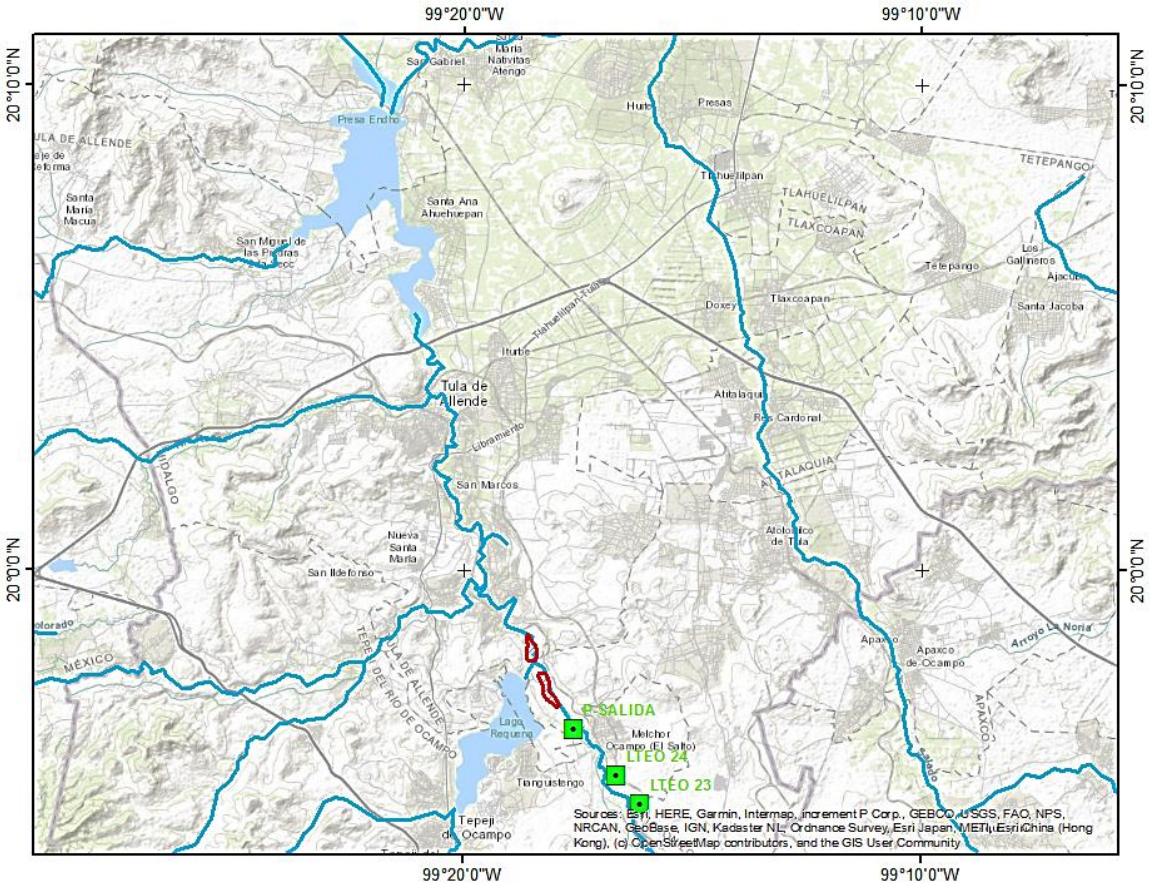


Figura 17. Subsistema del río Tula hasta la presa Endhó.

Cuadro 1. Estaciones hidrométricas de estudio.

Clave	Nombre	Descripción
B26074	Rio el Salto	Escurrimientos sobre el cauce del rio el Salto (o Cuautitlán), antes del Portal de Salida (SIH, CONAGUA) (Figura 5.4).
ARSHD		
PRQHD	Presa Requena	Gastos de la obra de excedencias de la presa Requena. (SIH, CONAGUA) (Figura 5.7).
EMPHD	Emisor Profundo	Excedencias de la descarga del Túnel Emisor Central en el Portal de Salida (SIH, CONAGUA) (Figura 5.5).
PSTEO	TEO - Portal de Salida	Excedencias en la descarga del Túnel Emisor Oriente en el Portal de Salida (VWS-Sistema de Drenaje Profundo, SACMEX) (Figura 5.6).

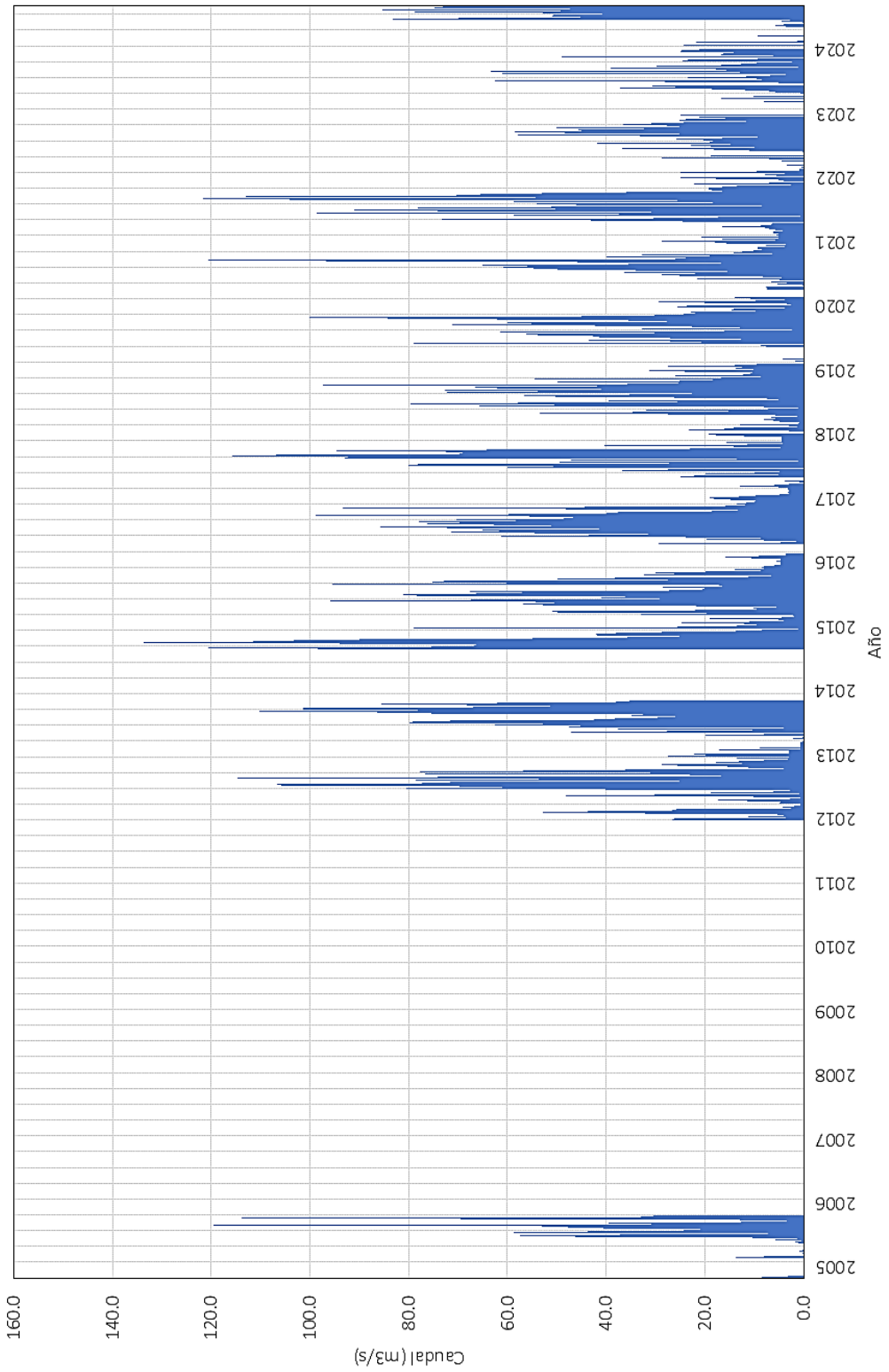


Figura 18. Escurrimientos medios diarios sobre el río Cuautitlán.

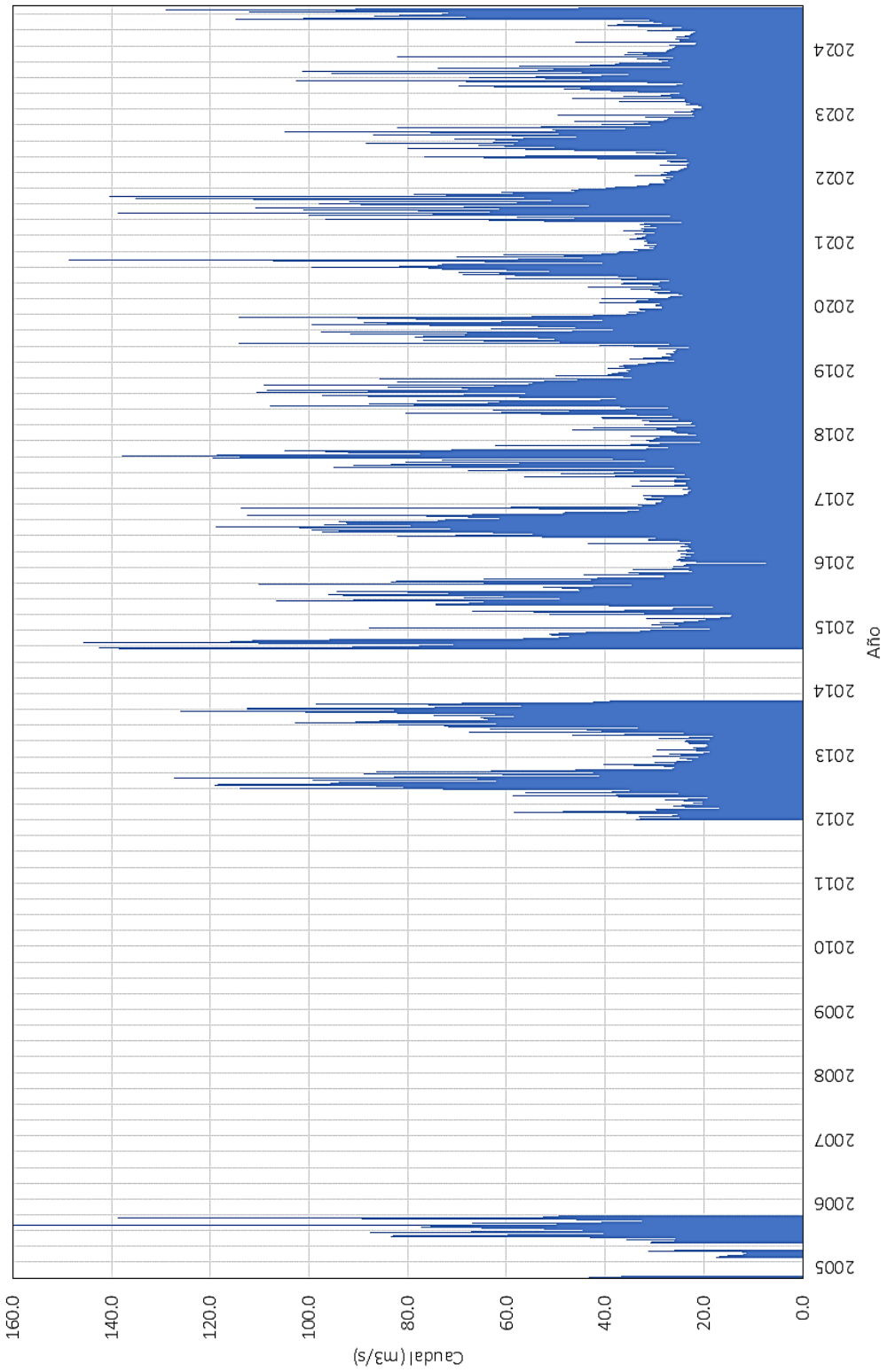


Figura 19. Excedencias en la descarga del Túnel Emisor Central.

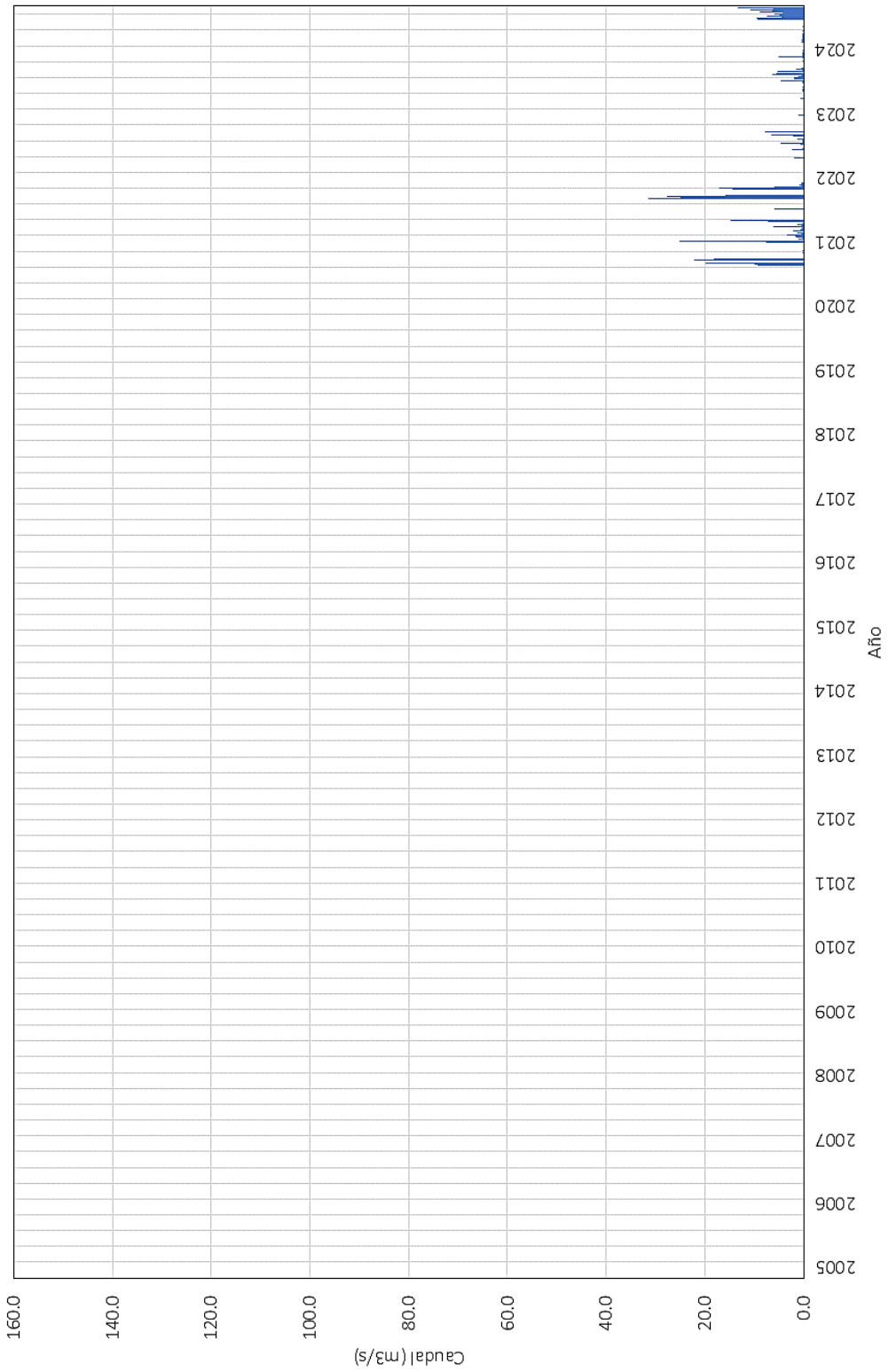


Figura 20. Excedencias en la descarga del Túnel Emisor Oriente.

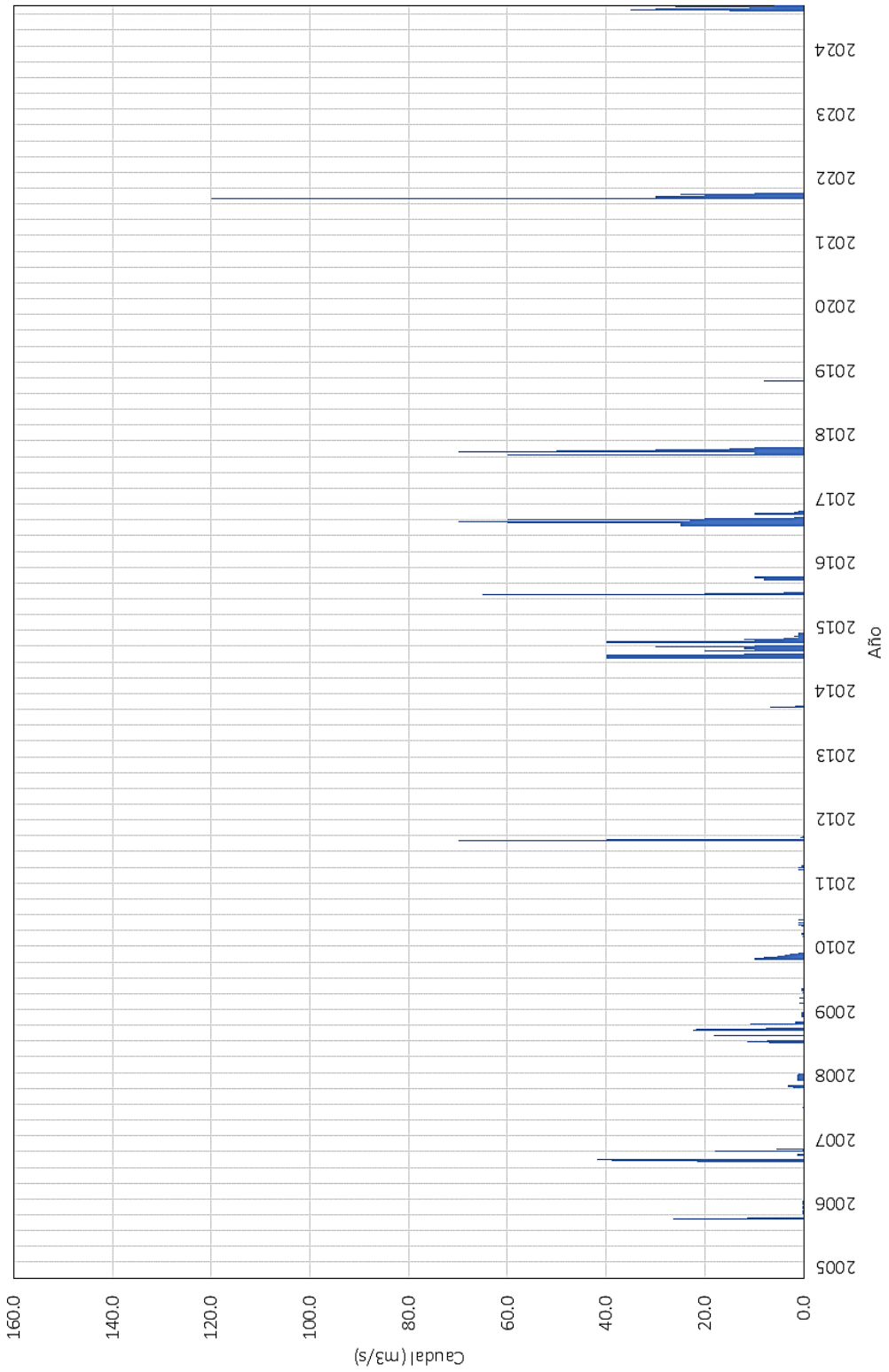


Figura 21. Excedencias de la presa Requena.

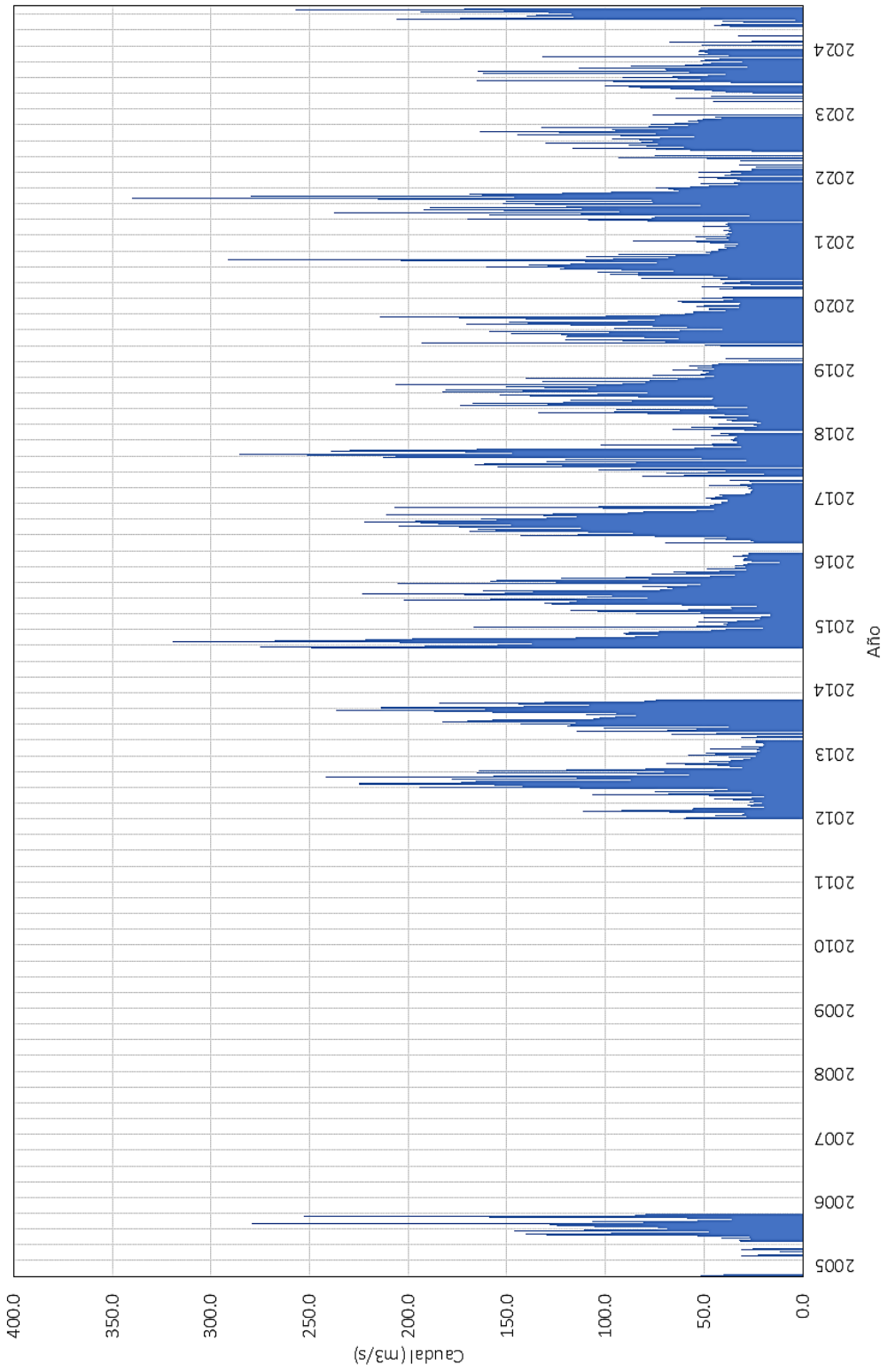


Figura 22. Escurrimientos medios diarios sobre el cauce del río Tula.

En las figuras 18,19, 20 y 21 se muestran las series de escurrimientos reconstruidos en el Portal de Salida y la presa Requena, como se describe en el cuadro 1. Finalmente, en la figura 22 se muestran los escurrimientos medios diarios sobre el cauce del río Tula.

•

Capítulo 3
Propuesta de Humedales para la Restauración Ambiental del Río Tula

III. Propuesta de Humedales para la Restauración Ambiental del Río Tula

3.1 Humedal Artificial

Los humedales de forma natural son ecosistemas muy dinámicos, debido a que estos son sitios de transición entre los ambientes terrestre y acuático, por lo tanto tienen una gran importancia ambiental, ya que los además de ser grandes reservorios de biodiversidad de micro y macroorganismos hablando de anfibios, reptiles, algunos mamíferos y un gran número de aves acuáticas, así como una amplia variedad de especies vegetales acuáticas o semiacuáticas, a su vez otorgan servicios ambientales, como el secuestro de carbono en forma de dióxido de carbono (CO_2).

Por otro lado, los humedales artificiales son infraestructuras basadas en la naturaleza que buscan recrear las cadenas de nutrientes, logrando una estabilización de los ecosistemas acuáticos, ofreciendo beneficios ecológicos tecnológicos y sociales. Dentro de los beneficios ambientales se encuentran:

- Regulación térmica del ambiente
- Secuestro de carbono
- Retención de contaminantes
- Transparentan el agua con la estabilización de sedimentos suspendidos
- Brindan refugio para estadios tempranos de animales como peces, anfibios y aves
- Recrean ecosistemas nativos o los complementan para establecer las cadenas de nutrientes deterioradas

No obstante, este tipo de infraestructura trae consigo beneficios sociales como:

- Espacios de recreo y entretenimiento para distintos sectores de la sociedad
- Otorga valor visual como paisaje
- Desarrollo urbano sostenible
- Valor cultural

Otro valor importante de los humedales artificiales ubicados en zonas urbanas colindantes, es que pueden ser utilizados como propuestas biotecnológicas en materia de biorremediación por medio del uso de plantas o microorganismos que gracias a sus características fisiológicas son capaces de amortiguar, mitigar y disminuir los impactos de contaminación acuática, además de que se pueden implementar como alternativa de depuración de agua posterior a un tratamiento primario de aguas residuales.

Debido a lo antes mencionado, los humedales artificiales desempeñan un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a sus características como “sistemas basados en la naturaleza" de fácil aplicación, con un óptimo costo, un uso eficaz y bajas exigencias operativas.

Son generalmente diseñados para la eliminación de contaminantes en aguas residuales como:

- Materia orgánica (medida como DBO5 y DQO, Demanda Biológica o Demanda Química de Oxígeno)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Nutrientes (nitrógeno y fósforo)
- Patógenos, metales pesados y otros contaminantes

El proceso de tratamiento de estos contaminantes se basa en una serie de procesos biológicos y físicos (adsorción, precipitación, filtración, nitrificación, depredación, descomposición, etc.). El proceso más importante es la filtración biológica que se realiza por la formación de la biopelícula que se compone por bacterias aerobias y facultativas.

Sin embargo, para utilizar los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales se requiere cumplir con ciertas consideraciones y requisitos, ya que al ser un "sistema de baja carga" debe tener suficiente espacio disponible, por lo que el espacio requerido es mayor en comparación a los sistemas convencionales.

En cuanto al clima de la zona, es preferible que no tengan períodos largos de heladas, en caso de que exista este tipo de condiciones, se puede adaptar el diseño los humedales artificiales para bien en este tipo de climas. Se recomienda tener condiciones totales de luz solar, debido a que es necesario que el área superficial se pueda secar de forma regular, en caso de generarse excesivas sombras en el proyecto se corre el riesgo de obstrucción debido al crecimiento excesivo de la biopelícula.

3.2 Elementos ingenieriles

Los humedales de forma natural son ecosistemas muy dinámicos, debido a que estos son sitios de transición entre los ambientes terrestre y acuático, por lo tanto tienen una gran importancia ambiental, ya que los además de ser grandes reservorios de biodiversidad de micro y macroorganismos hablando de anfibios, reptiles, algunos mamíferos y un gran número de aves acuáticas, así como una amplia variedad de especies vegetales acuáticas o semiacuáticas, a su vez otorgan servicios ambientales, como el secuestro de carbono en forma de dióxido de carbono (CO_2).

Por otro lado, los humedales artificiales son infraestructuras basadas en la naturaleza que buscan recrear las cadenas de nutrientes, logrando una estabilización de los ecosistemas acuáticos, ofreciendo beneficios ecológicos tecnológicos y sociales. Dentro de los beneficios ambientales se encuentran:

- Regulación térmica del ambiente
- Secuestro de carbono
- Retención de contaminantes
- Transparentan el agua con la estabilización de sedimentos suspendidos
- Brindan refugio para estadios tempranos de animales como peces, anfibios y aves
- Recrean ecosistemas nativos o los complementan para establecer las cadenas de nutrientes deterioradas

No obstante, este tipo de infraestructura trae consigo beneficios sociales como:

- Espacios de recreo y entretenimiento para distintos sectores de la sociedad
- Otorga valor visual como paisaje
- Desarrollo urbano sostenible
- Valor cultural

Otro valor importante de los humedales artificiales ubicados en zonas urbanas colindantes es que pueden ser utilizados como propuestas biotecnológicas en materia de biorremediación por medio del uso de plantas o microorganismos que gracias a sus características fisiológicas son capaces de amortiguar, mitigar y disminuir los impactos de contaminación acuática, además de que se pueden implementar como alternativa de depuración de agua posterior a un tratamiento primario de aguas residuales.

Debido a lo antes mencionado, los humedales artificiales desempeñan un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a sus características como “sistemas basados en la naturaleza" de fácil aplicación, con un óptimo costo, un uso eficaz y bajas exigencias operativas.

Son generalmente diseñados para la eliminación de contaminantes en aguas residuales como:

- Materia orgánica (medida como DBO5 y DQO, Demanda Biológica o Demanda Química de Oxígeno)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Nutrientes (por ejemplo, nitrógeno y fósforo)
- Patógenos, metales pesados y otros contaminantes

El proceso de tratamiento de estos contaminantes se basa en una serie de procesos biológicos y físicos (adsorción, precipitación, filtración, nitrificación, depredación, descomposición, etc.). El proceso más importante es la filtración biológica que se realiza por la formación de la biopelícula que se compone por bacterias aerobias y facultativas.

Sin embargo, se requieren ciertas consideraciones y requisitos para poder utilizar humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Al ser un "sistema de baja carga" debe tener suficiente espacio disponible ya que, requiere de un mayor espacio que los sistemas convencionales.

En cuanto al clima de la zona, es preferible que no tengan períodos largos de heladas, en caso de que exista este tipo de condiciones, se puede adaptar el diseño los humedales artificiales para bien en este tipo de climas. Se recomienda tener condiciones totales de luz solar, debido a que es necesario que el área superficial se pueda secar de forma regular, en caso de generarse excesivas sombras en el proyecto se corre el riesgo de obstrucción debido al crecimiento excesivo de la biopelícula.

3.3 Especies vegetales

Un punto importante a considerar para la implementación de este tipo de infraestructura verde, es el tipo de vegetación que se colocará, porque la vegetación empleada con fines de fitorremediación debe cumplir con una serie de puntos importantes, dentro de los cuales destacan.

- Altas tasas de crecimiento y producción de biomasa
- Arquitectura radicular compleja y ramificada
- Amplia distribución, así como un amplio potencial de adaptación para diferentes ambientes
- Alta tolerancia para las fluctuaciones en las características fisicoquímicas del agua y en la diversidad de contaminantes
- Alta resistencia contra patógenos
- Ser de fácil cultivo y cosecha

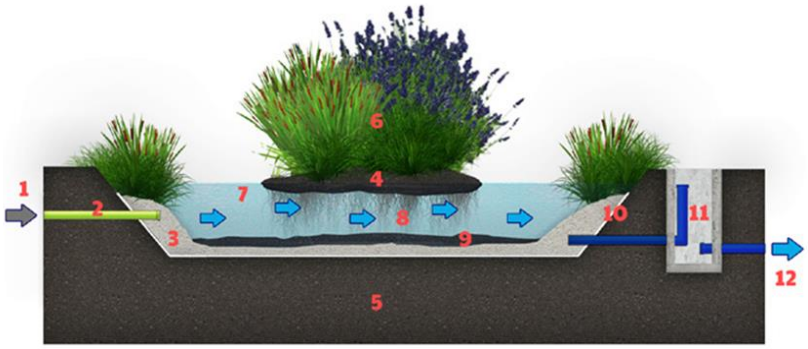
Otra manera con la cual se pretende realizar la remoción de contaminantes es por medio de las macrófitas, ya que pueden realizar la remoción mediante la asimilación de contaminantes en el agua, tales como nutrientes o elementos esenciales (ej. Nitrógeno, Fósforo, Aluminio, Zinc, etc.), también tienen la capacidad de remover y degradar contaminantes complejos (ej. polifenoles, hormonas, residuos de medicamentos, toxinas, etc.) hasta su almacenamiento o su volatilización.

Teniendo en cuenta esto último, hay una amplia variedad de especies vegetales que se han utilizado para la construcción de humedales artificiales dentro de la Ciudad de México, los cuales tienen la finalidad no solo de fomentar las áreas verde-azules de este tipo para uso recreativo, si no para el mejoramiento de aguas residuales, por ejemplo: el humedal de Chapultepec, el bajo puente de Cuemanco, Humedal Cuitláhuac, Humedal Cuautepec y Canal Nacional. Dentro de las especies vegetales que destacan en los sitios mencionados son: *Eleocharis macrostachya, Schoenoplectus americanus, Juncus effusus, Wolffia columbiana, Potamogeton illioensis, Typha latifolia, Beerula erecta, Hydrocotyle ranunculoides, Ceratophyllum demersumtum.*

3.4 Tipos de humedales

3.4.1 Humedales Flotantes

Los sistemas de humedales flotantes se realizan utilizando estructuras de soporte para macrófitas acuáticas (Fig. 9). Son altamente utilizadas y efectivas para fines de purificación. Este tipo de depuración permite tratar grandes volúmenes de agua en espacios relativamente pequeños y es adecuado para el tratamiento de aguas residuales en canales, ríos y acequias, pero también se puede realizar dentro de tanques instalados adecuadamente. El desarrollo de las raíces de las plantas y para exceder el metro de profundidad, desempeñando un papel importante de filtración física y absorción de efecto nutritivo y purificador combinado con comunidades microbianas simbióticas. Las plantas no sufren las fluctuaciones estacionales normales en el nivel del agua en la medida que flotan sobre él y, por lo tanto, el peligro de un período de sequía más o menos largo que deteriora su vitalidad (Borin et al., 2012 y Cross et al., 2021).



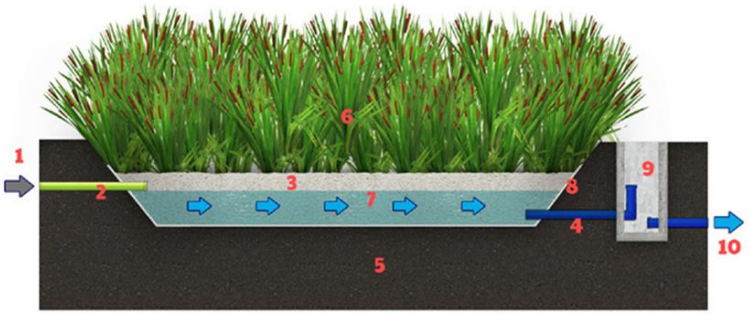
1 - Entrada
2 - Sistema de alimentación
3 - Medios reactivos
4 - Sistema de drenaje
5 - Suelo original
6 - Plantas
7 - Nivel de agua saturada
8 - Revestimiento impermeable
9 - Boca de inspección de regulación
10 - Salida

Figura 23. Corte esquemático humedal flotante, componentes del humedal

Figura 24. Ejemplo de Islas flotantes en el Parque Ecológico de Xochimilco, Ciudad de México.

3.4.2 Humedales de tratamiento de flujo horizontal (FTWS)

Los humedales de tratamiento de flujo horizontal (FTWS) consisten en bases cubiertas con sustrato, el cual suele ser grava, plantados con plantas macrófitas de formas de vida enraizadas emergentes, estos humedales promueven el flujo horizontal a través de los medios filtrantes. Los medios están completamente saturados con agua y pueden crear un ambiente anóxico, manteniendo un flujo subterráneo. Las partículas se retienen por colado o filtración, los solubles se absorben parcialmente de forma abiótica o biótica. La transformación adicional y la degradación de las sustancias retenidas se produce debido a procesos químicos y principalmente biológicos en los medios de filtro. La zona radicular proporciona un entorno altamente activo para la unión de biopelículas, oxígeno e intercambio, y sostiene el flujo hidráulico.

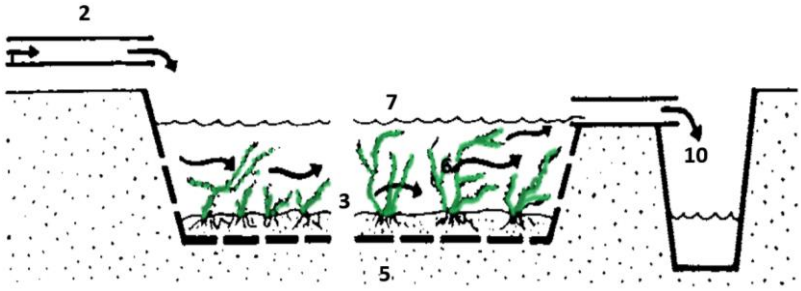


1 - Entrada	6 - Plantas
2 - Sistema de alimentación	7 - Nivel de agua saturada
3 - Medio poroso	8 - Revestimiento impermeable
4 - Sistema de drenaje	9 - Boca de inspección de regulación
5 - Suelo original	10 - Salida

Figura 25. Corte esquemático humedal flujo horizontal, componentes del humedal.

3.4.3 Sistema de Macrófitas Sumergidas

El sistema de macrófitas sumergidas es un tipo de humedales de flujo horizontal que utiliza plantas acuáticas de forma de vida sumergida, para transferir, estabilizar o eliminar contaminantes en las aguas residuales que tienen impacto negativo en los ecosistemas acuáticos debido a la introducción de nitrógeno, fósforo y contaminantes emergentes en el sistema. El Sistema es una fitorremediación (fito = planta y remediar = corregir) que utiliza una variedad de plantas para descomponer, extraer o retener los contaminantes presentes tanto en los suelos como en agua. Esta tecnología ha sido considerada como una alternativa de mitigación de contaminación y una opción de bajo costo en comparación con otros métodos, como biorreactores de membrana y otros (Moshiri, 1993, Nimptsch, et al. 2008, Pflugmacher et al., 2015).

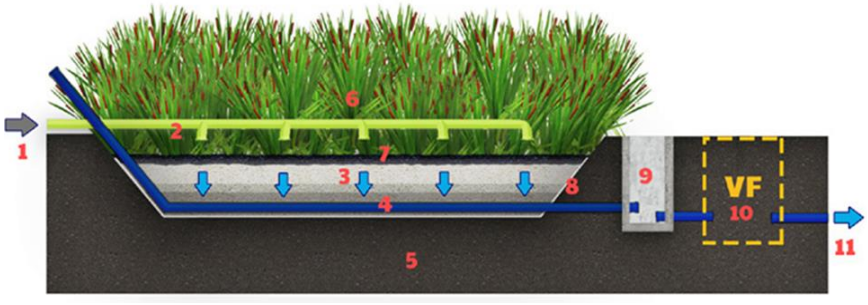


1 - Entrada	6 - Plantas acuáticas sumergidas
2 - Sistema de alimentación	7 - Nivel de agua
3 - Medio porosos	8 - Zona profunda
4 - Medios de enraizamiento	9 - Capa impermeable
5 - Suelo original	10 - Salida

Figura 26. Corte esquemático humedal de macrófitas sumergidas, componentes del humedal.

3.4.4 Humedal tipo francés o de Flujo Vertical

El humedal de tratamiento consta de dos etapas verticales posteriores con diferentes medios filtrantes. El diseño específico y esquema de funcionamiento permite un tratamiento de aguas residuales brutas después de pasar una simple criba. En particular, la primera etapa recibe aguas residuales brutas. Los lodos se acumulan y se mineralizan en la superficie; esto permite una operación sin eliminar este depósito de capa (20 cm máximo) entre 10 y 15 años. La segunda etapa suele ser un flujo vertical clásico, pero puede sustituirse por otras etapas de humedales para respetar la calidad del agua específica del contexto regulaciones (por ejemplo, flujo horizontal (HF) para desnitrificación) (Tondera et al., 2021).

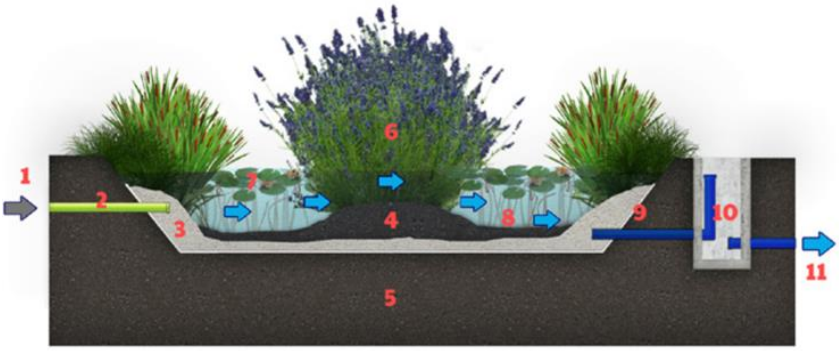


1 - Entrada
2 - Sistema de alimentación
3 - Medio poroso
4 - Sistema de drenaje
5 - Suelo original
6 – Plantas
7 - Capa de lodo
8 - Revestimiento impermeable
9 - Boca de inspección de regulación
10 - Segunda etapa de flujo vertical
11 - Salida

Figura 27. Corte esquemático humedal flujo vertical, componentes del humedal.

3.4.5 Humedal de tratamiento superficial de agua libre

Un humedal de tratamiento superficial de agua libre (FWS-TW) es más parecido a un humedal natural y se caracteriza por tener a lo largo del humedal un espejo de agua de 0.5 a 1 metro de profundidad. Se puede usar una combinación de diferentes tipos de plantas acuáticas y de humedales (flotantes, emergentes, y sumergidos) en áreas de aguas abiertas. La estructura de las distintas plantas sirve como sustrato físico para la biopelícula, mientras que las propias plantas incorporan amoníaco, nitrógeno y fósforo. Una parte importante de la biomasa vegetal se encuentra en la rizosfera. con planta la senescencia, los detritos y la basura se acumulan en el fondo, formando una estera en la superficie, y afectan el ciclo interno de las sustancias.



1 - Entrada
2 - Sistema de alimentación
3 - Medio poroso
4 - Medios de enraizamiento
5 - Suelo original
6 - Diferentes plantas acuáticas correspondientes a diferentes niveles de agua
7 - Nivel de agua
8 - Zona profunda
9 - Capa impermeable (geomembrana o arcilla compacta)
10 - Boca de inspección de regulación
11 - Salida

Figura 28. Corte esquemático humedal flujo superficial, componentes del humedal.

3.5 Propuesta de humedales artificiales para las descargas del Portal de Salida y la Presa Requena

Debido a la carga de contaminantes que actualmente transportan las aguas del Río Tula, se plantea la construcción de dos humedales artificiales, los cuales tratarán de forma parcial el caudal del río mediante el retiro de la carga de contaminantes del agua y devolviendo el agua tratada de vuelta al río, esto fomentará una mejoría en la calidad de agua, debido a que muchos de los contaminantes químicos (ej. residuos de tintes o medicamentos, metales pesados y nutrientes) al estar en retención dentro de los humedales serán adsorbidos, absorbidos y en su caso asimilados por las plantas macrófitas.

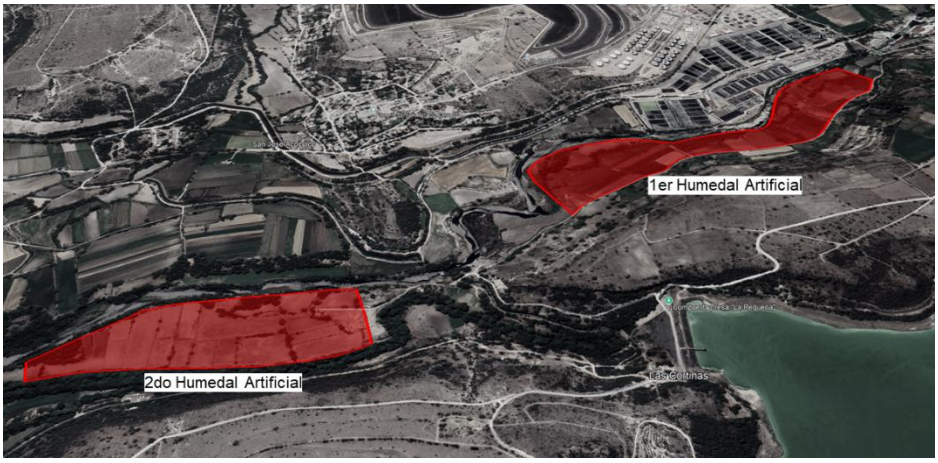


Figura 29. Ubicación propuesta para los Humedales Artificiales.

El primer humedal artificial (Figura 21) se localizará entre la Planta de Tratamiento de Atotonilco y la presa Requena, este humedal tendrá una superficie de 23.5 hectáreas, de las cuales 19.81 hectáreas serán para el tratamiento del agua. El humedal artificial se dividirá en tres módulos (Figura 22) con la finalidad de crear flujos tanto horizontales como verticales, los cuales logren en conjunto tener el máximo tratamiento posible del agua, retirando sedimentos y contaminantes disueltos en el agua (como nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno).

Antes de los humedales se necesitará una batería de 12 reactores anaerobios para el tratamiento inicial del agua, cada uno de los reactores con una capacidad de 10 litros por segundo, con estos reactores se espera una capacidad de remoción de contaminantes del 40%.

1. El primer módulo consistirá en un Humedal de flujo vertical dividido en 5 celdas, cada una de las celdas tendrá 4 divisiones interconectadas con flujos consecutivos, con el objetivo de tener celdas en mantenimiento sin detener el sistema. Se espera que esta configuración logré una reducción de contaminantes del 30%.
2. El segundo módulo considera la colocación de celdas 3 de Humedales flotantes, de las cuales 2 celdas tendrán lirio acuático (Eichhornia crassipes) y una celda tendrá lechuguilla. Debajo de estas celdas deberán existir 3 celdas de compostaje con una superficie entre 200m2 a 300m2. Posteriormente se tendrán dos celdas divididas en tres secciones, la primera con lentejilla, la segunda con wolffia y la tercera con azolla. Posteriormente existirá una celda de extracción de material de plantas acuáticas. Por último, se tendrá una última celda con plantas acuáticas sumergidas ceratophyllum para oxigenación del agua. Esta configuración tendrá una remoción del 30% de la carga de contaminantes.
3. El tercer módulo tendrá 9 divisiones formando celdas longitudinales, cada celda estará subdividida en paquetes de 3 con una línea longitudinal de entrada, una de retorno y una de salida. Cada bloque de celdas con diferentes sustratos entre ellos gravas, zeolitas y tezontle, para mejorar la adsorción. El módulo permitiría una remoción del 50% de los contaminantes.

De esta manera se podrá colocar una celda de oxidación por fitoplancton, para retirar un 20% adicional de remoción, para dejar tan solo un 12% de la carga de contaminantes remanentes en comparación al caudal de entrada.

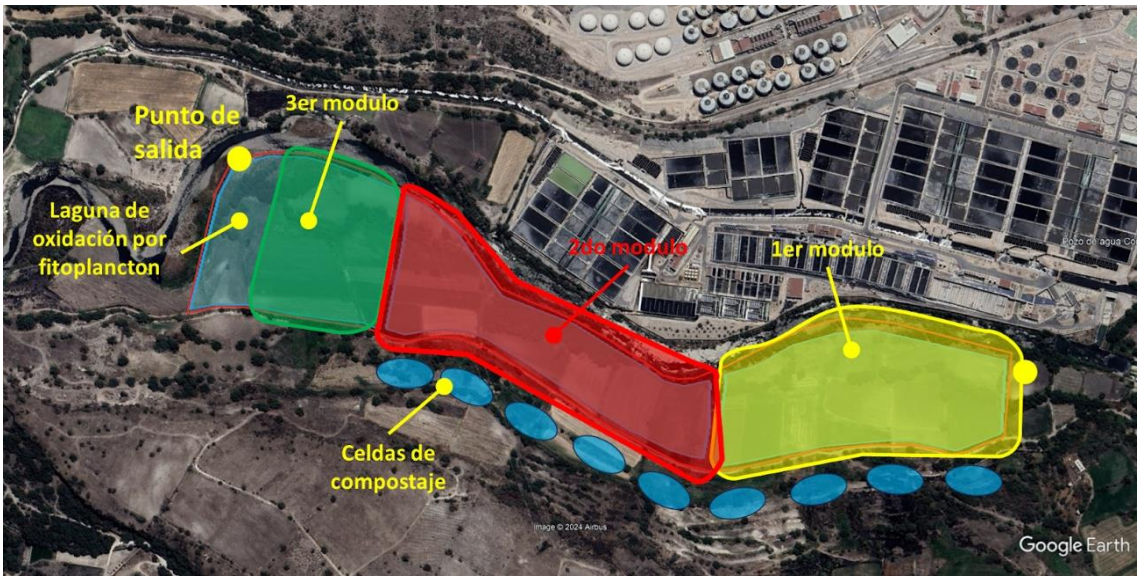


Figura 30. Configuración de módulos para el humedal 1.

Debido a que el humedal recibirá de forma directa el agua del Río Tula, es prioritario realizar pruebas de calidad de agua para determinar con precisión la carga de contaminantes que transporta el Río Tula y con esto ajustar las especies vegetales de tratamiento. La colocación de los reactores anaerobios ayudará en gran medida a controlar la cantidad de contaminantes que entra al humedal artificial gracias a la remoción de los sedimentos, por lo que será indispensable su colocación durante la etapa de diseño y construcción.

El gasto de tratamiento de este humedal se estimó a partir del volumen de retención que se tendrá dentro del mismo, este volumen de retención se determinó partir del área disponible, un tiempo de retención de 9 días y un tirante promedio. Aunque el tirante del agua varía dependiendo del tipo de humedal en cada celda, se consideró un tirante promedio de 0.50m para calcular el volumen de retención.

De forma combinada, el humedal artificial tendrá un gasto aproximado de 127 litros por segundo, permitiendo que el agua transite dentro un tiempo de 9 días entre la entrada y la salida del humedal.

El segundo humedal artificial se localizará después de la Presa Requena, este humedal tendrá un área aproximada de 14.6 hectáreas de tratamiento, el cual también se dividirá en tres módulos.

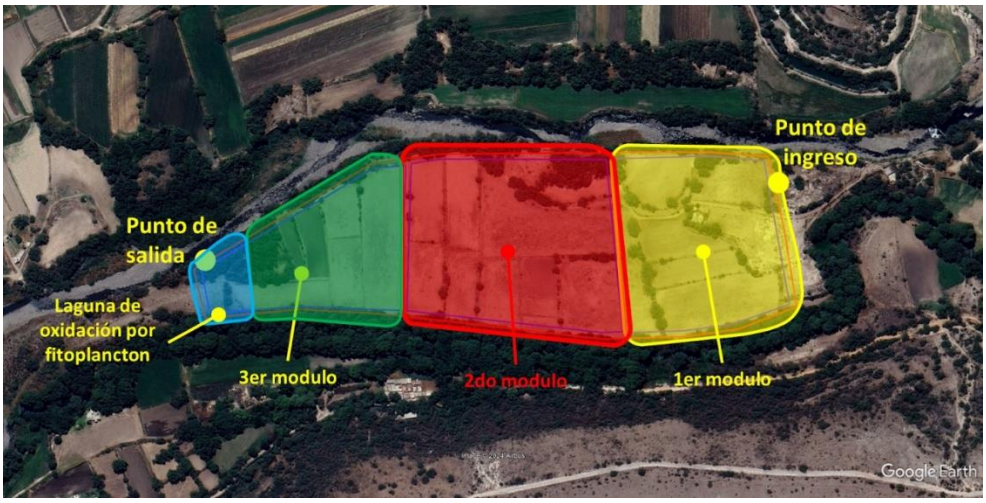


Figura 31. Configuración de módulos para el humedal 2.

Al tener una configuración similar que el primer humedal, se estima que será capaz de tratar un gasto de 93 lps logrando retirar un 88% de la carga de contaminantes contenidos en el agua.

Volumen de retención (Vr) Vr : 19.8 x 10,000 x 0.50 Vr : 99,000 m3 Tiempo de retención (Tr) Tr : 9 días Volumen de tratamiento por día (Vt) Vt : 99,000/9 Vt : 11,000 m3/día Gasto de tratamiento (Qt) Qt : 11,000/86,400 Qt : 0.127 m3/s Qt : 127lps	Volumen de retención (Vr) Vr : 14.6 x 10,000 x 0.50 Vr : 73,000 m3 Tiempo de retención (Tr) Tr : 9 días Volumen de tratamiento por día (Vt) Vt : 73,000/9 Vt : 8,111 m3/día Gasto de tratamiento (Qt) Qt : 8,111/86,400 Qt : 0.093 m3/s Qt : 93.8 lps

Figura 32. Estimación del caudal de tratamiento en los humedales.

La construcción y multiplicación de humedales artificiales a lo largo del río, cuya configuración combine tanto flujos horizontales como flujos verticales permite retirar la mayor carga de contaminantes contenida en el agua, debido a que esta configuración promueve y diversifica las cadenas de nutrientes que procesan, adsorben, absorben, filtran y dividen los contaminantes del agua. Sin embargo, la gran carga de contaminantes presentes en el Río Tula representa un reto importante para la búsqueda del saneamiento y equilibrio ecológico del agua y de la zona.

En ese aspecto, la mayoría de los contaminantes patógenos y metales pesados pueden ser retirados mediante la precipitación de las partículas sedimentables, investigaciones internacionales especializadas en el manejo y retiro de sedimentos de los cauces de ríos, establecen que retirar sedimentos con un tamaño de partícula menor a 100 micras conlleva una reducción considerable de contaminantes biológicos y de metales pesados que se encuentran adheridos en la superficie de las partículas sedimentables, mejorando significativamente el tratamiento del agua subsecuente, ya sea con medios tradicionales o con sistemas basados en la naturaleza.

Se propone el uso de sedimentadores tipo vórtice (Nautilus Pond) colocados a lo largo de puntos estratégicos del río, los cuales en conjunto logren retirar los sedimentos, concentrando los sedimentos en puntos de control para su fácil retiro y manejo responsable.

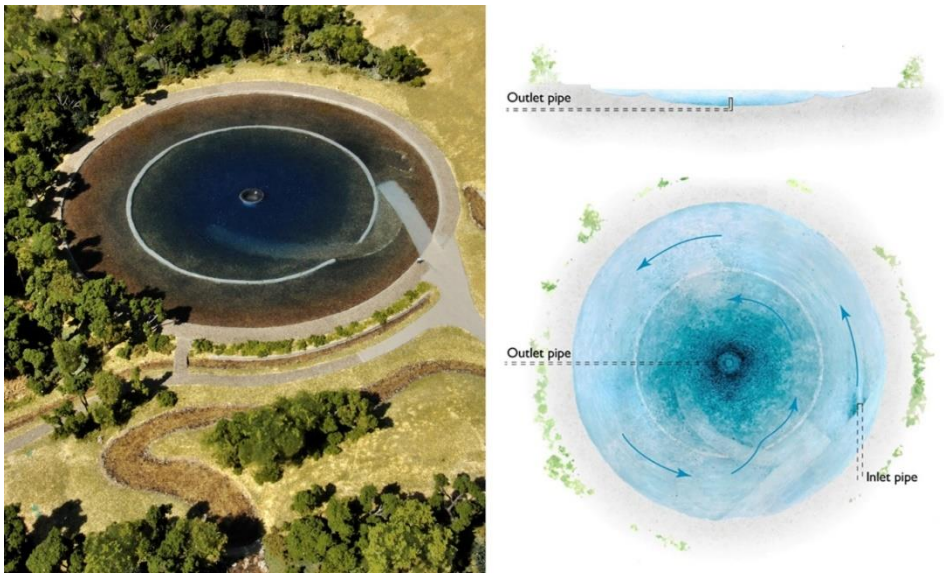


Figura 33. Sedimentador Vórtice Nautilus Pond, Canada, Soluciones Hidropluviales/Source2Source.

3.5.1 Especies vegetales para los humedales

Sección de humedal de flujo vertical:

- Phragmites australis
- Typha latifolia
- Sagitaria macrófila
- Juncus efusus
- Schoenoplectus lacustris

Sección de maccrófitas flotantes.

- Eichhornia crassipes
- Pistia stratiotes
- Wolffia sp.
- Lemna minor
- Azolla sp.

Sección de oxigenación de macrófitas sumergidas.

- Ceratophillu demersum
- Potamogeton crispus
- Najas sp.

Nombre científico: *Phragmites australis.*

Nombre común: Carrizo

Tipo de flujo: Superficial y/o Subsuperficial

Figura 34. Phragmites australis

Nombre científico: *Typha latifolia.*

Nombre común: Espadaña, totora, chuspata, cola de gato o tule.

Tipo de flujo: Superficial y/o Subsuperficial

Figura 35. Typha latifolia

Nombre científico: *Sagittaria macrophylla.* **Nombre común**: Papa de Agua. **Tipo de flujo**: Superficial y/o Subsuperficial	

Figura 36.Sagitaria macrófila

Nombre científico: *Elodea sp.* **Nombre común**: Peste de agua, Broza de Canadá, Yana o Maleza de estanque . **Tipo de flujo**: Macrófita sumergida	

Figura 37. Elodea sp

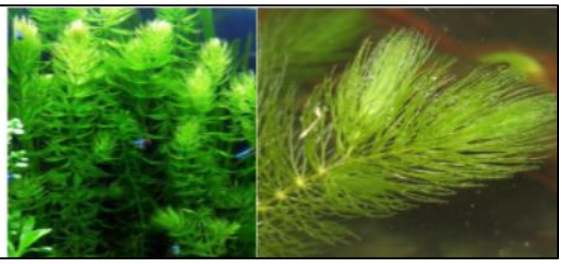
Nombre científico: *Ceratophyllum demersum.* **Nombre común**: Cola de Zorro, mil hojas de agua, bejuquillo o pinito de agua. **Tipo de flujo**: Macrófita sumergida	

Figura 38. Cola de zorro

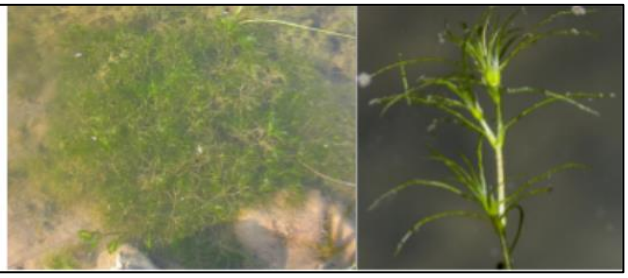
Nombre científico: *Najas minor.* **Nombre común**: náyade quebradiza o ninfa de agua quebradiza **Tipo de flujo**: Macrófita sumergida	

Figura 39. Najas minor

Nombre científico: *Nymphaea sp.* **Nombre común**: nenúfar, lirio de agua o ninfa de agua **Tipo de flujo**: Superficial	

Figura 40. Nenúfar.

3.6 Propuesta de Humedales Construidos para el Río Tula

El uso de humedales construidos es una estrategia sostenible y eficiente para la remediación del río Tula, considerando su capacidad de transportar hasta **40 m³/s**. Estos sistemas imitan los procesos de depuración natural de los humedales y pueden diseñarse para manejar caudales grandes. A continuación, se describe una propuesta técnica:

3.6.1 Alcance

1. Reducir contaminantes orgánicos y nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el agua.
2. Retener y degradar metales pesados.
3. Establecer áreas de biodiversidad que fomenten el equilibrio ecológico.

3.6.2 Pasos iniciales

- **Análisis de calidad del agua**: Identificar las concentraciones de contaminantes clave.
- **Caracterización del flujo**: Estudio hidrológico para determinar picos de caudal y variabilidad estacional.
- **Selección de sitios**: Identificar zonas adecuadas para construir humedales a lo largo del río.

3.6.3 Tipos de humedales sugeridos

1. **Humedales de flujo subsuperficial horizontal**:
    a. Para reducir la carga orgánica y los nutrientes.

   b. Adaptados a flujos medianos y con altas tasas de depuración.
2. **Humedales de flujo vertical**:
   a. Para aumentar la oxigenación del agua.
   b. Más adecuados para cargas orgánicas concentradas.
3. **Humedales de flujo libre**:
   a. Integrados como sistemas de amortiguamiento.
   b. Permiten manejar caudales altos y grandes áreas.

3.6.4 Dimensiones

- Para un caudal de **40 m³/s**, se propone dividir el flujo en tramos:
  - **10 humedales principales**, cada uno con capacidad para **4 m³/s**.
  - Área total estimada: **1,000 - 1,500 hectáreas**, distribuida en zonas estratégicas.

3.6.5 Capas del sistema

1. **Lecho filtrante**: Arena y grava para filtrar sólidos suspendidos y facilitar la depuración bacteriana.
2. **Plantas acuáticas**: Como **typha latifolia** (enea) y **scirpus spp.** (junco), que absorben nutrientes y estabilizan el sistema.
3. **Zonas de amortiguación**: Alrededor de los humedales, para mitigar riesgos de inundación.

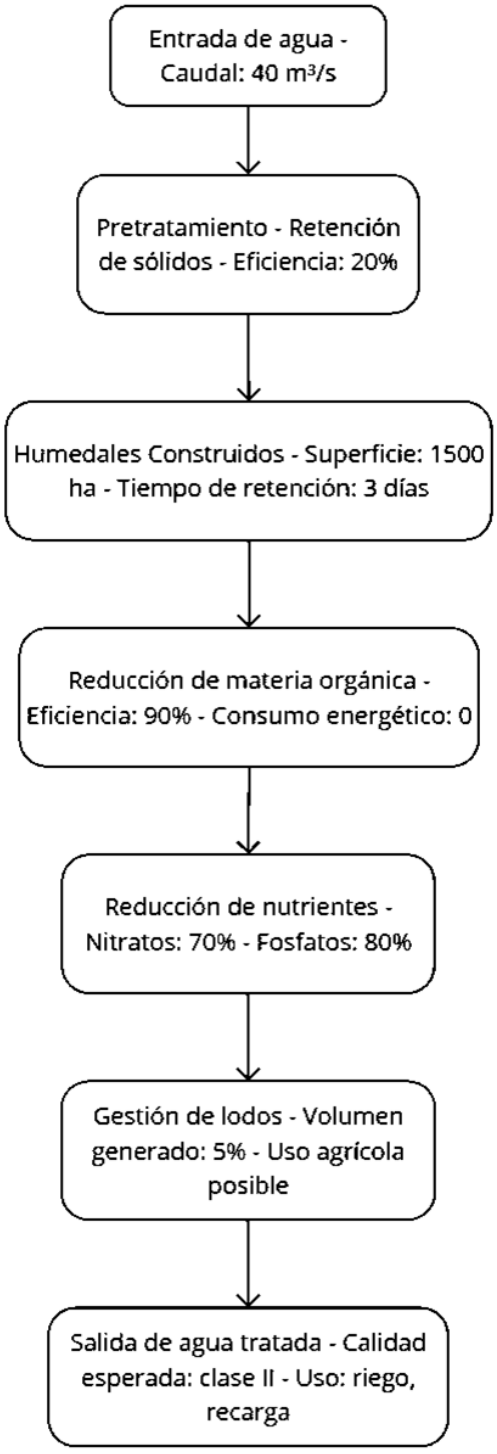


Figura 41. Diagrama 1: Proceso General

3.6.6 Beneficios

1. **Mejora de la calidad del agua**:
    a. Reducción de hasta **90%** en materia orgánica.
    b. Disminución significativa de nutrientes y sólidos suspendidos.
2. **Biodiversidad**:
    a. Restauración de hábitats para especies locales de flora y fauna.
    b. Incremento en la diversidad biológica.
3. **Control de inundaciones**:
    a. Reducción del impacto de crecidas estacionales mediante amortiguación de caudales.
4. **Secuestro de carbono**:
    a. Captura de CO_2 a través de vegetación emergente.

3.6.7 Fases del proyecto

1. **Estudio y diseño (0-6 meses)**:
    a. Análisis detallado del caudal y selección de sitios.
    b. Diseño técnico e ingeniería de los humedales.
2. **Construcción (6-24 meses)**:
    a. Excavación, construcción de lechos y plantación de vegetación.
3. **Monitoreo y mantenimiento (24 meses en adelante)**:
    a. Seguimiento continuo para asegurar la eficiencia del sistema.

3.6.8 Costo estimado

- **Costo de instalación**: $100,000 - $200,000 USD por hectárea.
- **Mantenimiento anual**: 2-5% del costo de instalación.

3.6.9 Indicadores de éxito

- **Calidad del agua**: Reducción en DBO, DQO, nitratos y fósforo.
- **Impacto ecológico**: Número de especies nuevas o reintroducidas.
- **Gestión de caudales**: Mitigación de picos de flujo durante lluvias.

3.6.10 Sinergias

- **Agricultura**: Uso del agua tratada para riego sostenible.
- **Educación ambiental**: Crear espacios de aprendizaje en torno a los humedales.
- **Turismo ecológico**: Desarrollo de senderos educativos para fomentar la participación ciudadana.

.

Capítulo 5
Evaluación Geológica-Geotécnica

IV. Evaluación Geológica-Geotécnica

4.1 Marco Fisio

4.1.1 Fisiografía

El relieve es la forma física en que se presenta la superficie de la tierra, al respecto México es extraordinariamente variado, desde cadenas montañosas hasta grandes planicies pasando por valles, cañones, altiplanicies y depresiones entre otras formas, en este sentido, y con base en estas características el país se ha dividido en Provincias Fisiográficas las cuales se definen como: regiones donde el relieve es el resultado de la acción de un mismo conjunto de agentes modeladores del terreno, así como de un mismo origen geológico.

Bajo las consideraciones anteriores la zona de estudio, el municipio de Tula y toda la porción sur del Estado de Hidalgo, forma parte del denominado Eje Neovolcánico; un espacio donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos tectónicos desde principios del periodo Terciario; los materiales que constituyen el subsuelo de esta provincia corresponden a intercalaciones de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas que incluyen materiales granulares provenientes de las partes topográficamente altas que circularon hacia los valles, caracterizados por el predominio de derrames basálticos Cuaternarios, derivados de numerosos volcanes existentes, cubriendo a dichos materiales (en espesores variables), se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto de la alteración de rocas antiguas (figura 42).

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.

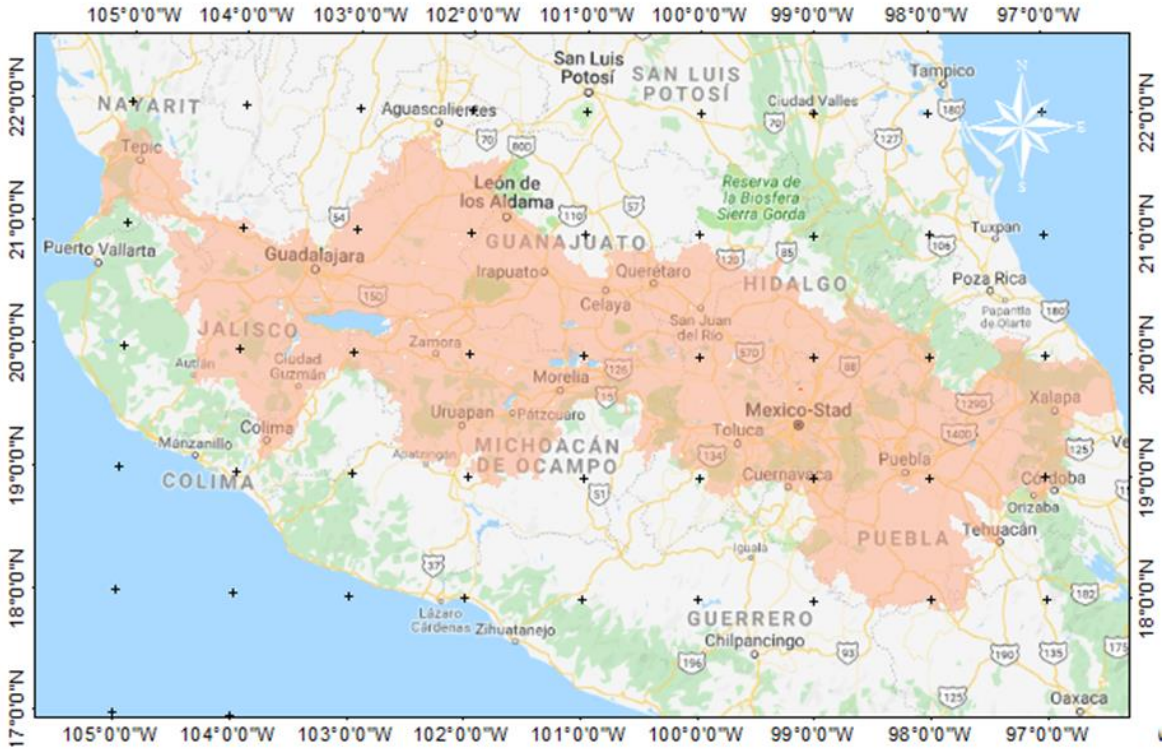


Figura 42 Localización y distribución de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico. Elaboración propia, base Google Earth, 2019.

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.

La zona de estudio se ubica específicamente en la denominada subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, la subprovincia se extiende de poniente a oriente, consta de sierras volcánicas o grandes aparatos volcánicos individuales que alternan con amplias llanuras formadas, en su mayoría, por vasos lacustres, conformado sistemas de topoformas características de planicies aluviales.

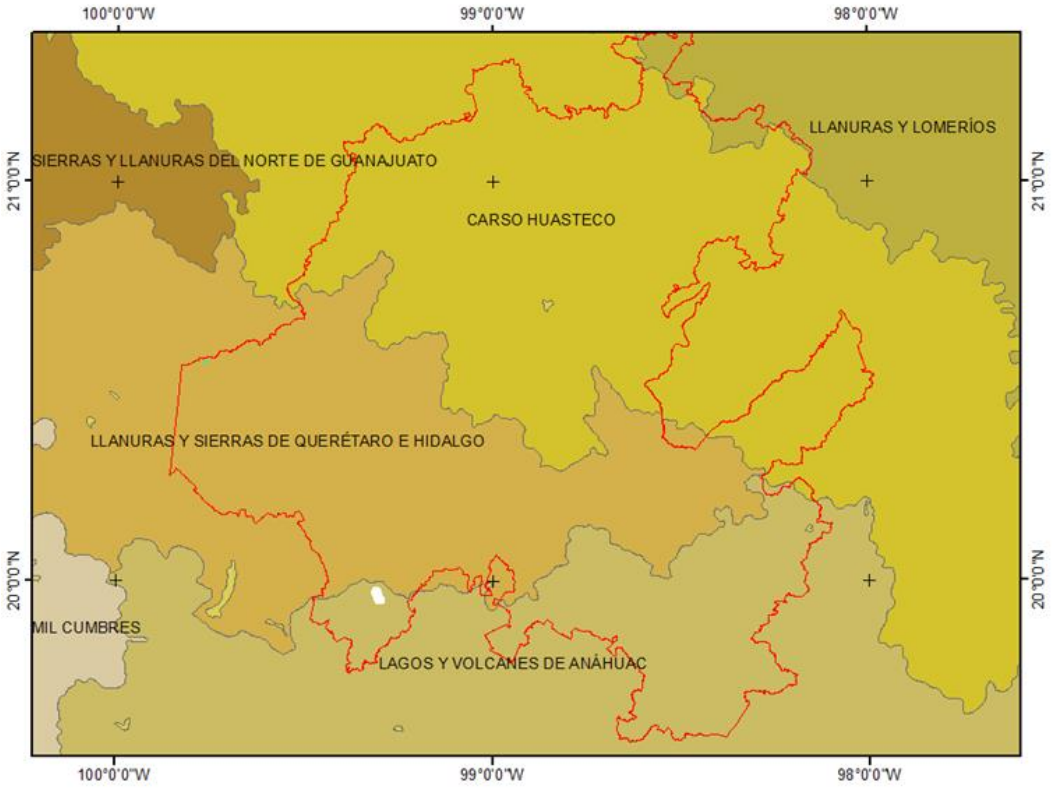


Figura 43. Elaboración propia. Localización y distribución de Subprovincia fisiográfica.

4.1.2 Geomorfología

La caracterización geomorfológica de una zona consiste en la descripción cualitativa de distintos parámetros morfológicos tales como; patrones de drenaje, grado de las pendientes, altitudes, perfiles, etc., con lo cual es posible determinar y establecer, ciertas características geológicas del terreno. Para mostrar estas características del terreno se utilizó el modelo digital de elevación (MDE), perteneciente a la carta E14A19, editadas por INEGI en el año 2015, el cual se presenta en la Figura 4.

En la región se presenta dos subregiones: Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, así como Lagos y Volcanes de Anáhuac. Éstas se caracterizan por presentar grandes sierras volcánicas o aparatos individuales que se alternan con amplios vasos lacustres.

- Lomerío de tobas. Esta subunidad es la de mayor relevancia debido a la superficie que ocupa, se encuentra integrada por depósitos vulcano-sedimentarios, endógeno acumulativos, que muestran una topografía suave con lomeríos, básicamente conforman la mayor parte de los alrededores de las zonas de estudio.

- Llanura aluvial. Propiamente dentro de esta zona es donde se localizan las áreas de estudio se, propiamente las zonas corresponden a llanuras exógenas acumulativa formada por aluviones, que captan gran parte de los escurrimientos que provienen de los altos topográficos de la zona,

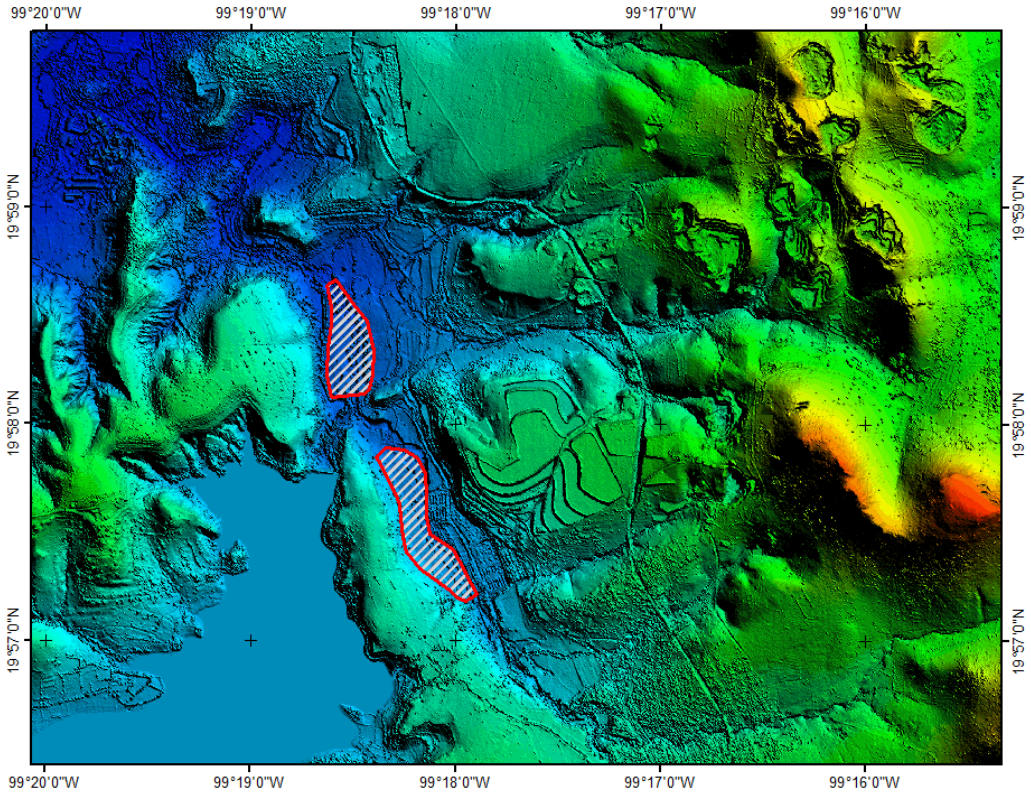


Figura 44. Localización morfológica regional de la zona de estudio.

4.2.3 Clima Regional.

Específicamente y de forma local de acuerdo con la clasificación de climas de Köppen y modificado por Enriqueta García, el clima de la zona, Figura 42, presenta varios tipos entre ellos:

- ·C(wo) que corresponde a un clima Templado,subhumedo, temperatura media anual entre 12˚C y 18˚C, temperatura del mes mas frio entre -3˚C y 18˚C y temperatura del mes mas caliente bajo 22˚C. Precipitacion en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con indice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitacion invernal del 5% al 10.2% del total anual.

- ·BS1Kw(w)(e) g el cual es semiseco estepario, el más húmedo de los semisecos, templado con verano cálido con régimen de lluvias en verano y escaso porcentaje de lluvia invernal, extremoso y la temperatura del mes más cálido se presenta antes del solsticio de verano.

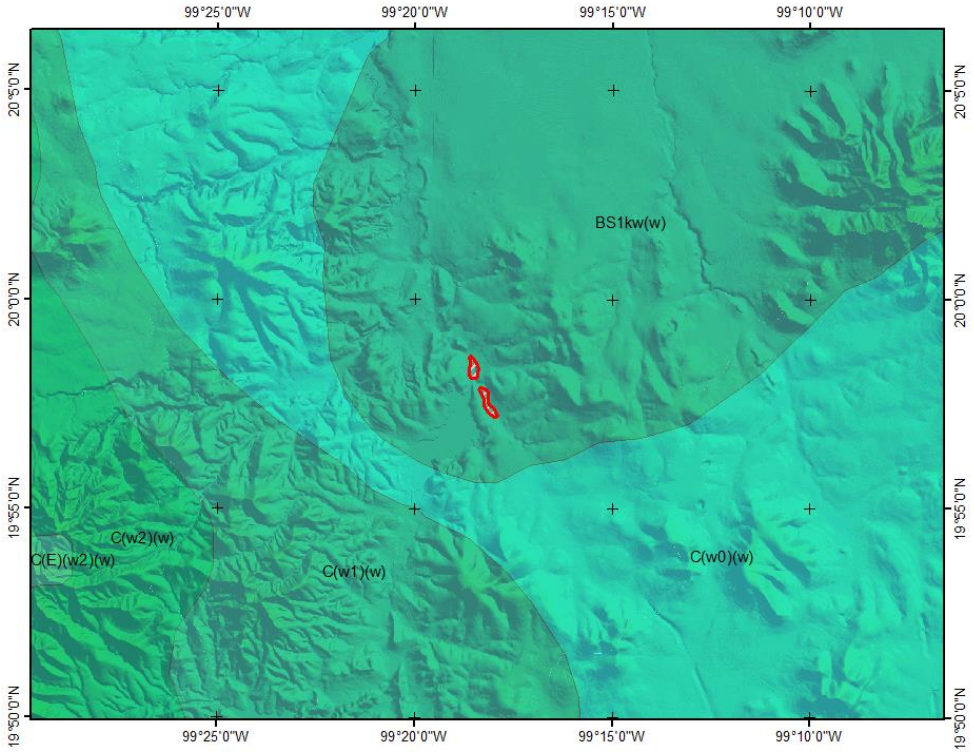


Figura 45. Elaboración propia, base MDE INEGI Localización y extensión de climas en la zona.

Como resultado de lo anterior, los sistemas meteorológicos predominantes definen claramente dos épocas climáticas con particularidades bien definidas: la época de "lluvias" de julio a septiembre, caracterizada por aire marítimo tropical con alto contenido de humedad y la época de "secas" que se identifica con humedad relativa baja, debido a que la masa de aire correspondiente normalmente es de tipo polar continental.

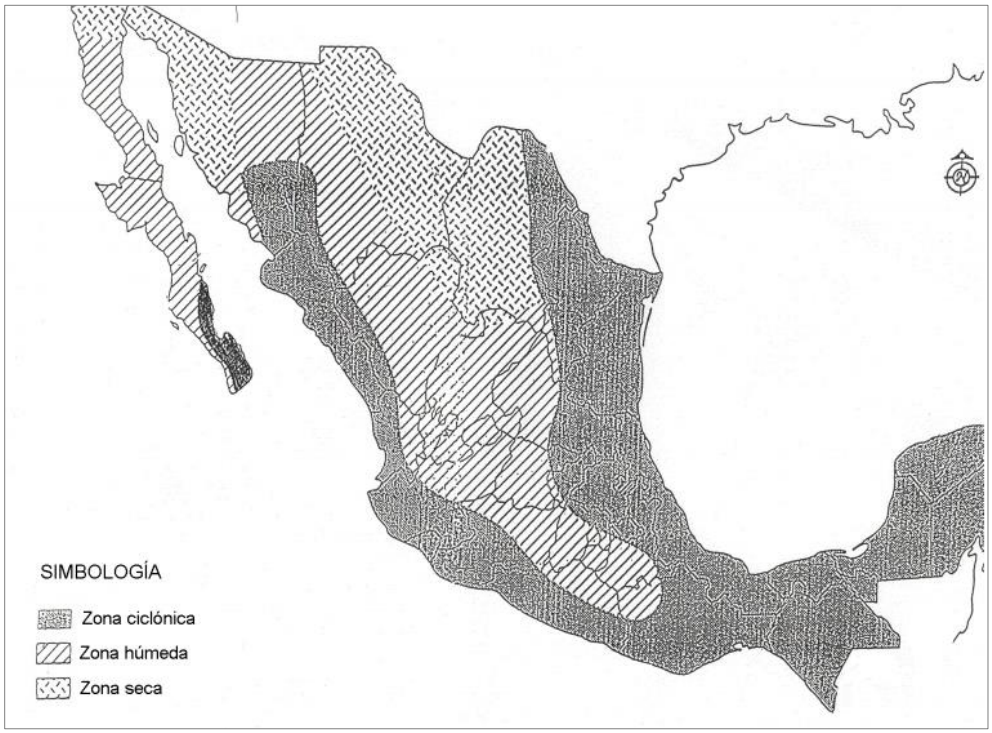


Figura 46. Localización de Predio sobre Carta Hidrológica de la República Mexicana.

4.2 Marco Geológico

4.2.1 Geología regional

El marco geológico de la zona se fundamentó en la recopilación, análisis y resumen de los estudios existentes de la zona, considerando para este punto, la información geológica regional representativa para todo el municipio de Atotonilco de Tula.

La historia geológica del área se caracteriza por una intensa actividad de origen ígneo. Dicha actividad fue la responsable del emplazamiento de una diversidad de rocas volcánicas principalmente. El período de actividad volcánica inicia a partir del Oligoceno y continua prácticamente hasta nuestros días.

Por su parte, las rocas sedimentarias que existen en la zona de estudio corresponden esencialmente a una secuencia de lutitas areniscas, conglomerados, areniscas, calizas-lutitas, calizas, limonitas, areniscas y depósitos aluviales que abarcan desde el Cretácico hasta el Cuaternario, cuyo ambiente sedimentario incluye desde un ambiente marino hasta el continental. Estas formaciones se aprecian principalmente hacia la porción nororiental de la zona (figura 47).

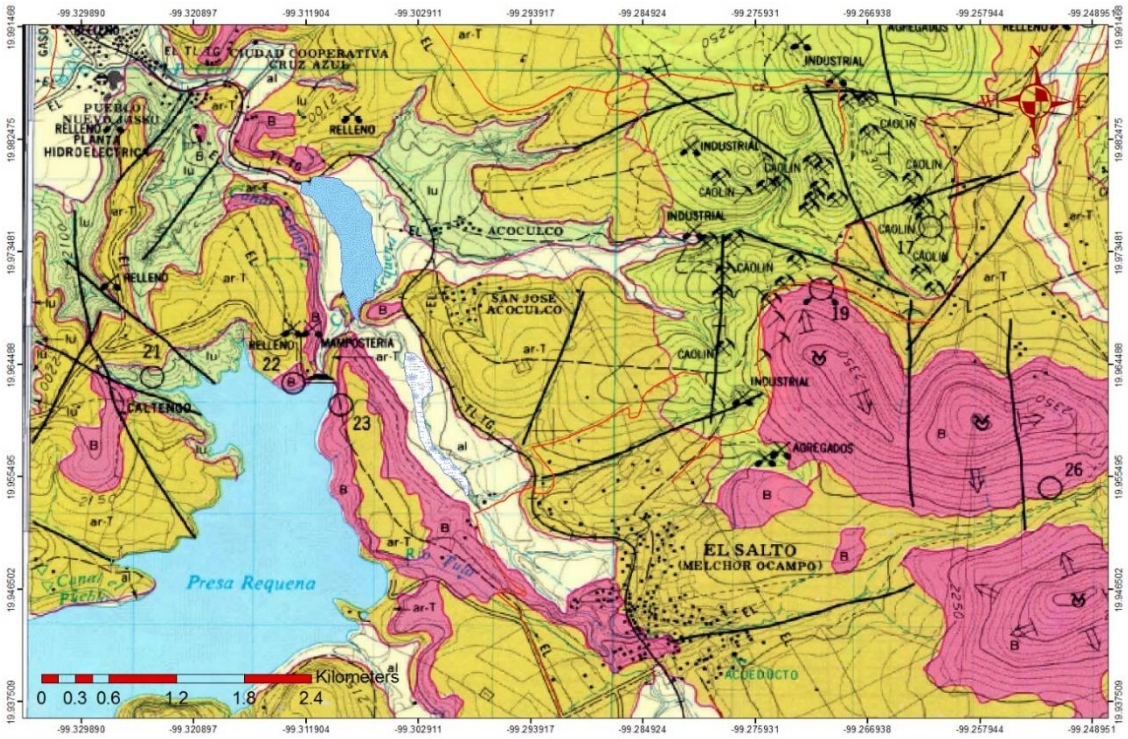


Figura 47. Elaboración propia, base geológica tomada de DETENAL 1978. Geología regional de la zona de estudio.

4.2.2 Rocas calcáreas correlacionables con la formación Cuautla

En las proximidades del área de estudio se presentan afloramientos importantes de calizas de la formación Cuautla, las cuales afloran en el Cerro Blanco y otros pequeños cerros en las inmediaciones de Apaxco, así como en las inmediaciones de la comunidad Conejos.

La caliza se presenta en estratos gruesos de 60 cm a más de 2 metros de espesor, presenta un color café grisáceo a la intemperie y gris oscuro al fresco. La secuencia sedimentaria se presenta deformada. El macizo rocoso presenta fracturamiento generalizado de la roca.

4.2.3 Rocas andesíticas correlacionables con el Grupo Pachuca

Los afloramientos de estas rocas más próximas al área de estudio se encuentran en los cerros Mesa Grande aquel donde se ubica la colonia Pradera del Potrero, situados al este del área de estudio.

Estas rocas representan las primeras manifestaciones de vulcanismo dentro del área de estudio de acuerdo con sus relaciones estratigráficas a este conjunto litológico se le asigna una edad relativa de Oligoceno superior Mioceno medio.

Este grupo de rocas está constituido por derrames de lavas andesíticas de color gris verdoso con fabrica porfídica. En sus afloramientos suele presentarse en forma masiva con presencia de fracturamiento pseudocolumnar y presencia de diaclasas irregulares. Así mismo se presenta unidades de brecha volcánica asociadas a los derrames lávicos.

4.2.4 Andesitas del Plioceno medio y superior

Los derrames de lava, cuyo apilamiento edificó un gran número de conos andesíticos, incluyendo los volcanes tipo escudo gigantes. Sus productos eruptivos están constituidos por lavas y escorias de proyección. Existe en el área un segundo tipo de aparatos de menor envergadura más jóvenes y abundantes, presentan diámetros basales promedio de 1.5 Km., y una altura sobre la superficie en la que se edificaron del orden de 250 a 300 m. la litología es muy semejante a la que presentan los grandes volcanes de escudo salvo que éstos en ocasiones presentan cenizas que se intercalan entre los derrames de lava.

En general las lavas que expulsaron los dos tipos de aparatos son de color gris oscuro a negro con textura porfídica para el caso de los productos expulsados por los grandes volcanes y de textura microlítica en el caso de los volcanes pequeños. Los derrames emitidos tienden a ser delgados del orden de 5 a 10 m de espesor y una longitud de entre 4 y 6 Km.

4.2.5 Formación Tarango

Están constituidos por una mezcla de limos y arenas con gravas aisladas de color café grisáceo a gris claro. Por su similitud litológica es frecuente que se les confunda con la Formación Atotonilco el Grande, diferenciándose esta última de la anterior ya ésta presenta derrames de lava basáltica interestratificada con los rellenos de cuenca. Se reconocen. Además, depósitos lacustres conformados por calizas lacustres de textura arenosa con intercalaciones ocasionales de sedimentos clásticos y cenizas volcánicas.

La Formación Tarango presenta un espesor variable en la zona, aunque de acuerdo con los afloramientos y los contactos litológicos en las laderas de los cerros próximos al área de estudio esta parece acuñarse contra las rocas del basamento del Plioceno y Oligoceno.

A nivel regional, se presume la existencia de una pequeña fosa tectónica la cual formo parte del valle, de acuerdo con las observaciones de campo, así como a los resultados de los sondeos parece que esta hipótesis es válida, ya que se observa un paquete grueso de sedimentos en la zona sur del valle.

4.2.6 Depósitos Aluviales

Por último, se encuentran sedimentos aluviales producto de la erosión transporte y sedimentación de las rocas que afloran en la periferia del valle. Este conjunto se caracteriza por depósitos de pie de monte y abanicos aluviales.

En general estos sedimentos se componen por mezclas heterogéneas de grava arena y arcillas y limos las cuales sufren cierto grado de clasificación hacia el interior del valle haciéndose estos más finos. Ocasionalmente se presentan pequeños horizontes de cenizas volcánicas intercaladas entre los sedimentos del valle.

La figura 48, expone de manera general la estratigrafía de la zona mediante la construcción de una sección que corta la línea del trazo en la parte sur.

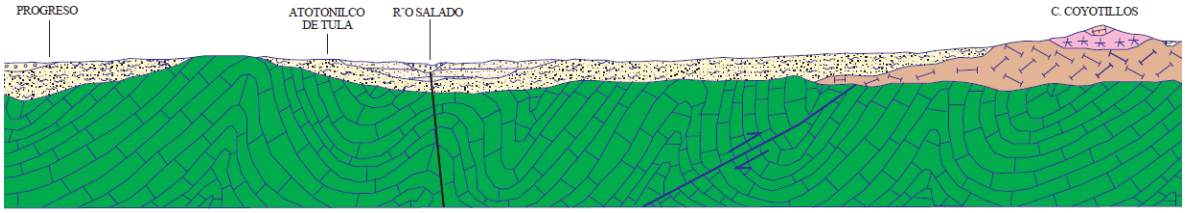


Figura 48. Tomado de SGM 2009 Sección estratigráfica esquemática

4.2.7 Estratigrafía local

Del Terciario. Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío superior.

Se les llama así a las rocas volcánicas que difieren en composición litológica y posición estratigráfica con respecto a las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. Sus afloramientos se distribuyen por toda la cuenca en áreas pequeñas, en la mayoría de los casos se encuentran cubiertas por los materiales volcánicos más recientes.

Del Terciario. Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano.

Es un conjunto de rocas extrusivas que representan un segundo periodo magmático, misma que aflora localmente hacia la porción occidental de la zona de estudio formando elevaciones topográficas las cuales han sido explotadas

actualmente como bancos de material; y sobreyacen discordantemente a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, cubiertas de la misma forma por unidades volcánicas del Plioceno Tardío y Cuaternario. La composición de estas rocas varía de andesítica a dacítica, las secuencias piroclásticas no son consolidadas y constituyen tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas.

De acuerdo con el plano geológico elaborado por el Servicio Geológico Mexicano, la zona de estudio se encuentra sobre depósitos de materiales del terciario superior clasificados como volcanoclásticos, corroborados durante los recorridos de campo, efectuados. A nivel superficial se aprecia la existencia de capas de tobas limo-arenosas seudo-estratificadas con espesores mayores a un metro, con una amplia extensión en el área (figura 49), a esta secuencia le subyace un potente paquete de material piroclásticos, constituido por fragmentos de rocas de forma angular y mal empacados (figura 50).

Figura 49. Secuencia de tobas Limo-Arcillosas, que afloran en la zona de estudio.

Figura 50. Secuencia Volcanoclásticas, que afloran en la zona de estudio.

La secuencia volcanoclástica se encuentra ampliamente distribuida en toda la zona principalmente evidentes hacia el occidente de la zona de estudio, misma que ha sido explotada actualmente como banco de material, el cual se localiza hacia al poniente de la zona de estudio.

4.2.8 Reconocimiento geológico

Como parte de este trabajo se realizaron reconocimientos geológicos, en la zona e inmediaciones de esta, con el fin de conocer el marco geológico de forma particular.

La mayoría de los depósitos son de constitución arcillosa con horizontes limo-arenosos y están asociados a un transporte y depósito de diversas maneras, la distribución de estos es variable, lo mismo que su textura, dando como resultado que la secuencia estratigráfica sea complicada (figuras 51 a 60).

Figura 51. Vista general

Figura 52. Vista zonas de cultivo de la zona

Figura 53. Detalle de secuencia corriente

Figura 54. Zonas de cultivo

Figura 55. Trazo de rio en zona de interés

Figura 56. Vista general de trazo de rio

Figura 57. Detalle de paredes existentes

Figura 58. Zona baja de rio

Figura 59. Recorrido por zona

Figura 60. Detalle de parte baja

4.3 Marco Geofísico

4.3.1 Transitorios electromagnéticos. (TEM,s)

Dentro de la información recopilada se cuenta con información de 3 sondeos electromagnéticos realizados en la zona donde se localiza la mina Conejos, aproximadamente 2.3 kilómetros al este de la zona de estudio. Su ubicación de presenta en la figura 61.

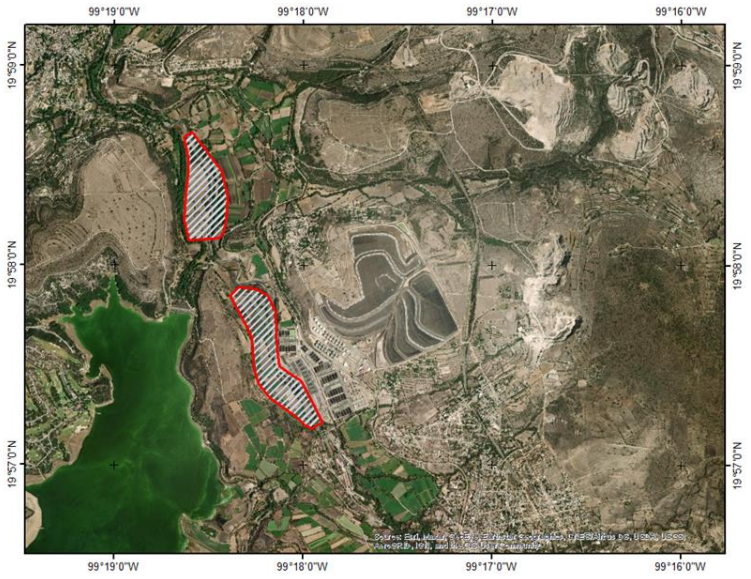


Figura 61. Sección de Calicateo Geo-eléctrico en la zona de estudio

La figura 62 muestra el perfil geoeléctrico, con una extensión aproximada de 950 metros y una dirección Norte-Sur. En este perfil se puede observar variaciones de resistividad a nivel superficialmente que van de 4 hasta 26 ohm-m, dicha variación se asocia a la presencia y formación de suelo con espesores de hasta 12 metros, principalmente desarrollados en la zona donde se realizó el norte.

Subyaciendo a esta unidad se observan la presencia de una secuencia granular caracterizado por valores de resistividad del orden de los 8 a 174 ohm-m, (color verde). Esta unida presenta variaciones en su espesor mostrando, un espesor máximo de 200 metros, alcanzando su base una cota de 2,125 msnm, este espesor de adelgaza hacia el hasta los 125 metros, donde la base de esta secuencia se encuentra a una elevación de 2,200 msnm.

Cabe destacar que al norte de la zona, los valores de resistividad se incrementan del orden de 73 a 178 Ohm-m, a una profundidad aproximada de 35 metros hasta alcanzar la profundidad de 165 metros (color amarillo y naranja), dicha secuencia se ha asociado litológicamente a una potente paquete de rocas volcanoclásticas alteradas en su mayor parte, dicha secuencia muestra un disminución en su espesor hacia el sur de la zona, desapareciendo casi por completo, donde su espesor es de apenas unos metros y sus resistividad alcanza los 48 ohm-m.

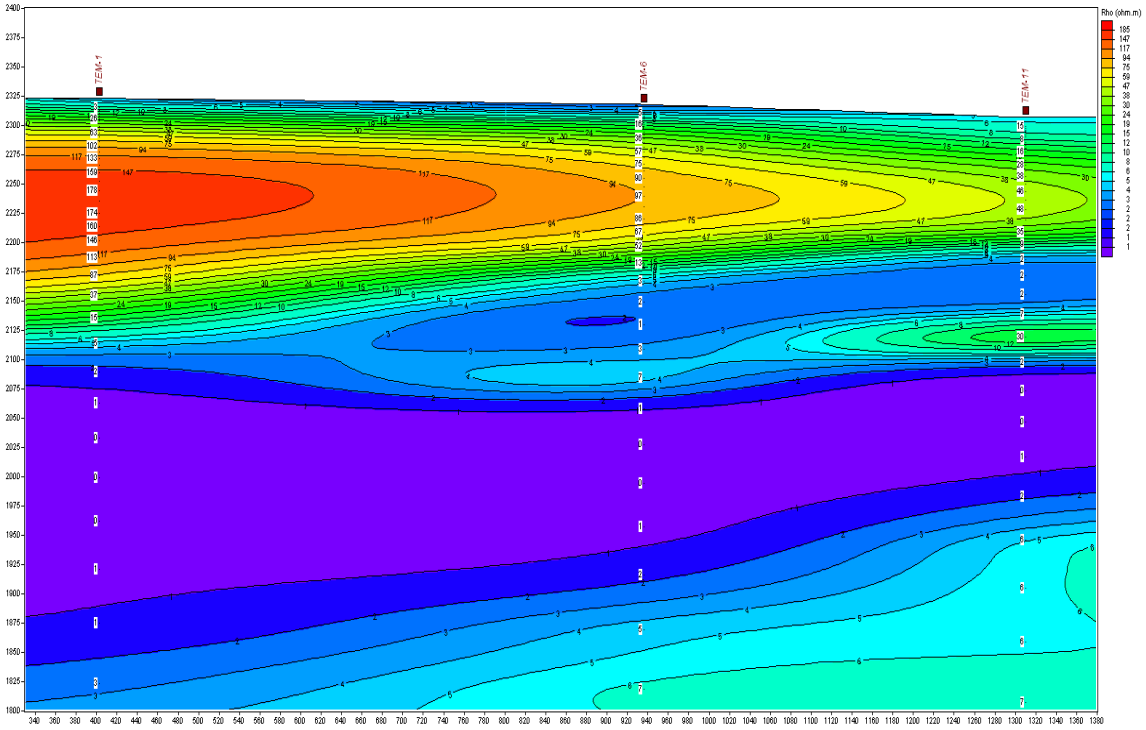


Figura 62. Perfil de resistividad real en la zona de estudio

4.4 Marco Geotécnico.

4.4.1 Regiones Sísmicas en México.

Se puede establecer que un sismo son sacudidas o movimientos bruscos del terreno, generalmente producidos por disturbios tectónicos (ocasionado por fuerzas que tienen su origen en el interior de la Tierra) o volcánicos (producido por la extrusión de magma hacia la superficie). En ambos casos hay una liberación de energía acumulada que se transmite en forma de ondas elásticas, causando vibraciones y oscilaciones a su paso a través de las rocas sólidas del manto y la litosfera hasta alcanzar la superficie terrestre.

Los sismos no pueden predecirse, es decir, no existe un procedimiento confiable que establezca con claridad la fecha y el sitio de su ocurrencia, así como el tamaño del evento. Sin embargo, los sismos se presentan en regiones bastante bien definidas a nivel regional y se cuenta con una estimación de las magnitudes máximas, en función de los antecedentes históricos y estudios geofísicos.

El análisis de sismicidad, en la república mexicana, se basa en la Regionalización Sísmica que se presenta en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993), así como en la recopilación e interpretación de registros históricos de sismos obtenidos de la base de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Con fines de diseño antisísmico, la República Mexicana se dividió en cuatro zonas sísmicas, utilizándose los catálogos de sismos del país desde inicios de siglo, de tal forma se estableció la siguiente clasificación (figura 63).

Figura 63. Figura tomada de: Manual de diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo) de la Comisión Federal de Electricidad. Zonas Sísmicas de México.

1. La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

2. Las zonas B y C son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.

3. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Con base al análisis e interpretación de lo anterior, prácticamente toda la porción central del país; el estado de México y la zona de estudio se ubica dentro de la zona clasificada como zonas intermedias “B” de la Regionalización Sísmica de CFE, donde los registros históricos indican que no se han reportado sismos de gran intensidad y las aceleraciones del terreno que se podrían esperar serían menores al 70% del valor de la gravedad (g).

4.4.2 Información geotécnica

De acuerdo con la CONAGUA, en su publicación Acciones de infraestructura de drenaje y abastecimiento de agua en el Valle de México 2007-2012, elaborada en su oportunidad por la Coordinación General de Proyectos Especiales de Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento del Valle de México, se tiene que, cerca de la zona de interés se ubica el Túnel Emisor Oriente (véanse siguientes figuras) y se tiene que las unidades geotécnicas identificadas como: i) y v), consisten en: a) Limos y arcillas con arena (de baja compresibilidad) y b) arcilla, limos y limos arenosos de alta plasticidad.

Figura 64. Zona con información geotécnica

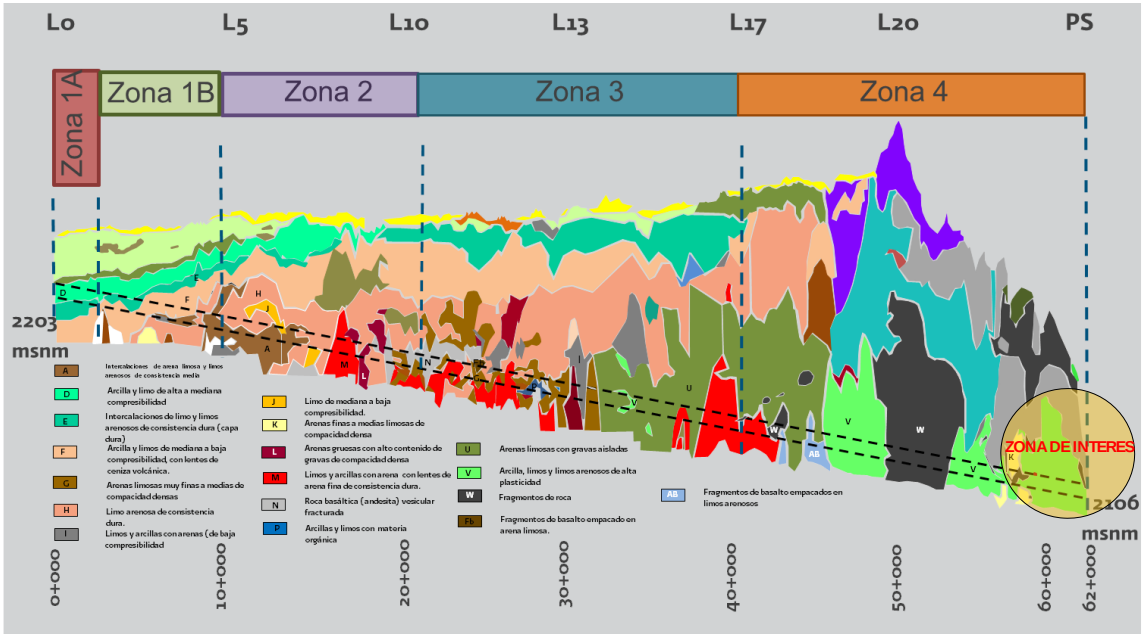


Figura 65. Perfil geotécnico del TEO próximo al Portal de Salida.

Conclusión

El proyecto del río Tula, 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.

Referencias

(S/f). Recuperado el 19 de septiembre de 2024, de http://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2005/04/asun_1850464_20050414_1113594645.pdf

(S/f-b). Recuperado el 19 de septiembre de 2024, de http://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www4.hcdn.gob.ar/dependencias/dsecretaria/Periodo2024/PDF2024/TP2024/0965-D-2024.pdf

AYALA-CARCEDO, F.J. Análisis de los conceptos fundamentales de riesgos y aplicación a la definición de tipos de mapas de riesgos geológicos. Boletín Geológico y Minero, 1990, vol. 101-3, p. 456-467.

Armando García-Palomo (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México. Central Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 25, núm. 1.

Borin, M., Maucieri, C., Mietto, A., Pavan, F., Politeo, M., Salvato, M., Tamiazzo, J. y Tocchetto, D. (2012). La fitodepurazione per il trattamento di acque di origine Agricola e di reflui zootecnici. In Veneto Agricoltura, Azienda Regionale per I settori Agricolo, Forestale e Agro-Alimentare.

CENAPRED (2001). "Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México", Centro Nacional de Prevención de Desastres, México D.F. Versión Electrónica 2014

Comisión Nacional del Agua, 1996. Diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de Pachuca-Tizayuca, Texcoco, Chalco-Amecameca y la Ciudad de México. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Custodio, Emilio y Llamas, Manuel Ramón. Tomos I y II. 1976. Hidrología Subterránea. Primera edición. Ediciones Omega.

Dante J. Moran, INEGI México, 1984. Geología de la República Mexicana.

De Cserna Z., M. De la Fuente-Duch, M., L. Triay, L.M. Mitre-Salazar, R. Mota-Palomino Palacios-Nieto (1987). Estructura Geológica-Gravimetría, Sismicidad y relaciones geotectónicas regionales de la Cuenca de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Bull. 104, 71.

Instituto de Ingeniería, UNAM-CENAPRED (2003) "Guía Metodológica para el Análisis del Peligro, Vulnerabilidad, Riesgo y Pérdidas Causadas por Desastres Naturales o Antropogénicos y su Reducción y Prevención"

López Ramos, Ernesto: Geología de México, 2da. Ed. 1980.

Nimptsch, J.et al. (2008) Cyanobacterial toxin elimination via bioaccumulation of MC-LR in aquatic macrophytes: An application of the "Green Liver Concept". Environ. Sci. Technol. 42 (22), 8552-8557. doi:10.1021/es8010404. • Moshiri, G. A. (1993). Constructed wetlands for water quality improvement. CRC Press.

Ortega G., A., J.A. Cherry and Rudolph D.L. (1993). Large-scale aquitard consolidation near Mexico City. Ground Water 31, 708-718.

Ordaz M. (mayo 1996), “Algunos Conceptos del Análisis de Riesgos”. Revista Prevención. CENAPRED, número 14, p.p. 6-11.

Pitre, C.V. (1994). Analysis of induced recharge from a waste water canal through fractured clays in Mexico City. M.Sc. Thesis, University of Waterloo, 224 p.

http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/ ; http://www.inegi.org.mx/

Pflugmacher, S. et al. (2015) Green Liver Systems® for water purification: Using the phytoremediation potential of aquatic macrophytes for the removal of different cyanobacterial toxins from water. AJPS 06 (09), 1607–1618. doi:10.4236/ajps.2015.69161.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológico-Minera “Ciudad de México” E14-2. Escala 1:250,000.

Tondera K., A. Rizzo, I. Srl y P. Molle, Cross, K.,2021. French vertical-flow treatment wetlands Tondera en: K., Rizzo, A., Andrews, L., Pucher, B., Istenič, D., Karres, N. y Mcdonald, R. Nature-Based Solutions for Wastewater Treatment. IWA Publishing.