

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ARQUITECTURA**  
**UNIDAD ACADÉMICA DE ARQUITECTURA DE PAISAJE**

**TÉCNICAS DE FITORREMEDIACIÓN COMO ELEMENTOS  
DE CONFORMACIÓN DE PAISAJE APLICADOS A  
SISTEMAS LACUSTRES**

Tesis que para obtener el título de Arquitecto Paisajista  
presenta: Javier Mejía Anaya

Sinodales:  
Dra. Isabel Rocío López de Juambelz  
M. en A. Alejandro Cabeza Pérez  
Arq. Luis de la Torre Zatarain

Ciudad de México  
Septiembre de 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

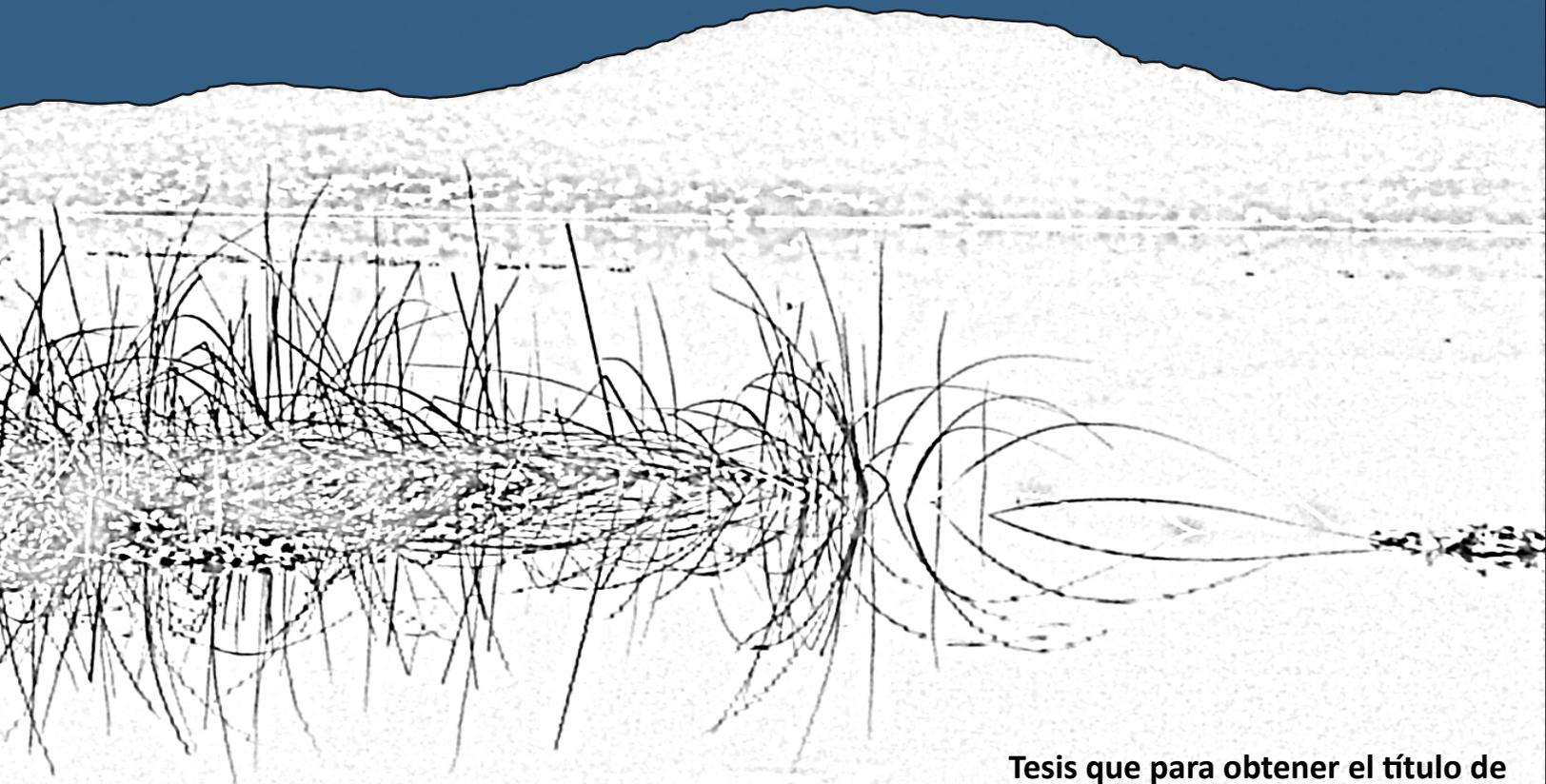
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ARQUITECTURA  
UNIDAD ACADÉMICA DE ARQUITECTURA DE PAISAJE

# TÉCNICAS DE FITORREMEDIACIÓN COMO ELEMENTOS DE CONFORMACIÓN DE PAISAJE APLICADOS A SISTEMAS LACUSTRES



Tesis que para obtener el título de  
Licenciado en Arquitectura de Paisaje presenta:  
Javier Mejía Anaya

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
--------------	---

## CAPITULO 1

LOS LAGOS DE LA CUENCA DE MÉXICO	7
1.1 Los orígenes de la cuenca	7
1.2 Los lagos de la cuenca de México	9
1.3 Lagos Dulces	11
1.4 Lagos Salados	11
1.5 La estacionalidad del lago y el funcionamiento de las subcuencas	12

## CAPITULO 2

LA ACCIÓN DEL HOMBRE SOBRE LOS LAGOS	15
2.1. El albaradón de Nezahualcóyotl	15
2.2. Tajo de Nochistongo de Enrico Martínez	16
2.3. Concepción del gran canal y el túnel de Tequixquiac de Porfirio Díaz	19
2.4. Funcionamiento del gran canal y el segundo Túnel de Tequixquiac	23
2.5. Drenaje profundo, emisor central y emisor poniente	24
2.6. Disposición de las aguas negras, sistema de vasos reguladores y presas del actual drenaje de la Ciudad de México	26
2.6.1. Sistema de vasos reguladores y presas que alimentan el drenaje de la Cuenca de México	26
2.6.2. Túnel Emisor Oriente	29
2.6.3. Disposición de las aguas negras en la Ciudad de México	30
2.7. La laguna de Zumpango	30

## CAPITULO 3

CARACTERIZACIÓN DE UN LAGO	33
3.1. Diferenciación entre lago y laguna	33
3.2. Elementos de limnología	33
3.3. Estratificación de los lagos	34
3.4. Vegetación	34
3.4.1. Formas de vida en las plantas	35
3.4.2. Distribución de las Hidrófitas en un cuerpo de agua	37

## CAPITULO 4

FITORREMEDIACIÓN	40
4.1. Definición	40
4.2. Tipos de fitorremediación	40
4.3. Humedales de fitorremediación	41
4.4. Islas flotantes	51

## CAPITULO 5

DISEÑO ECOLÓGICO PARA LA REMEDIACIÓN DEL LAGO DE ZUMPANGO	56
5.1. Construcción de un humedal	56
5.2. Consideraciones previas al diseño de un humedal.	60
5.2.1. Impermeabilización	60
5.2.2. Sustrato	60
5.2.3. La vegetación	61
5.2.4. Estructuras de entrada y salida	61
5.3. Ejemplo Práctico	62
5.4. Paleta vegetal	63

CONCLUSIONES	64
--------------	----

BIBLIOGRAFÍA	67
--------------	----

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres la confianza, la paciencia y el apoyo para mi desarrollo profesional.

A mi hermano Esteban y a mi otro ya hermano Alejandro, por toda su confianza y cariño.

A mis sinodales, el Maestro Alejandro Cabeza por compartir su conocimiento y su talento, al Arq. Luis de la Torre por toda la experiencia aprendida.

A la doctora Rocío, por todos sus conocimientos, su confianza y la enseñanza que de ella emana la cual agradezco inconmensurablemente haberla compartido conmigo y sobre todo la paciencia y la dedicación para culminar este proyecto.

A Karina, que sin su apoyo y sin su esfuerzo que fue más allá, este trabajo no hubiera sido posible, muchísimas gracias.

A mis amigos, Diana, Emilio, Bruno, por toda la experiencia compartida y aprendida en esta aventura.

A todas aquellas personas que compartieron su tiempo, las experiencias y el conocimiento, muchas gracias.

# INTRODUCCIÓN

## El agua en la configuración del paisaje

El agua es un elemento que hace de la tierra un lugar distinto, un lugar habitable. Es el agua la que nos permite distinguir el azul del cielo, gozar de una temperatura estable, regula el ambiente y es la que permite que la tierra tenga la vida que conocemos y de la que gozamos.

El agua cubre un 70% de la superficie de la tierra y la podemos apreciar en forma dinámica, como el mar y sus olas, en la corriente de un río o su expresión estática en el reflejo de una laguna. El agua nos evoca tranquilidad, paz, sensaciones que nos transportan y nos inducen imaginar otros lugares, pero también concede el sentimiento de apropiación.

A través del tiempo, el hombre se ha interrogado sobre la naturaleza del agua. Los filósofos griegos como Parmenides<sup>1</sup>, describen al agua como uno de los cuatro elementos de la realidad universal; mientras que en una visión cosmogónica, el agua aparece en la Biblia. Y desde el Génesis se relata que en los principios “Dios crea los cielos y la Tierra; El espíritu de Dios cubre la superficie de las aguas”. Esta idea fue predicada durante siglos, dando como resultado dos visiones importantes.

La primera visión, una idea sagrada del agua tomo fuerza en el cristianismo dominante de occidente, donde el agua extraída de la pila bautismal lava el cuerpo del pecado; el agua, salvadora, no es corrupta y el contacto del cuerpo desnudo con este elemento primordial está prohibido, idea que inunda a la Europa medieval, por lo que las fuentes construidas por anteriores civilizaciones se vieron clausuradas o puestas bajo el patronazgo de San Martín de Tours (TORTOLERO, 2006), santo agrario que favorecía la cosechas.

La segunda, es una visión científica que surge a partir de siglo XV, donde los saberes acerca del cuerpo y la sociedad en el mundo empiezan a separarse de la concepción de la iglesia (TORTOLERO, 2006). En el S. XVI, las investigaciones del físico inglés Henry Cavendish<sup>2</sup>, relacionadas con los elementos que componen el agua, la definen como un compuesto de dos elementos y no el elemento, por sí mismo, como se creía. Pero es hasta el siglo XVII donde se intensifica la búsqueda de explicaciones científicas y racionales de la naturaleza del agua.

---

<sup>1</sup> Filósofo griego nacido en Elea en el año 540 a.C. donde residió hasta su muerte en el 470. Fundador de la escuela de Elea.

<sup>2</sup> Henry Cavendish. Físico y químico nacido en Niza en 1731, de padres nobles británicos, sus trabajos relacionados con los elementos que componen el agua, así como la composición del aire marcaron la era moderna de la ciencia. Murió en febrero de 1810.

Para finales del mismo siglo, en occidente, el libro fundador de la hidrología científica es la obra de Pierre Perrault "De l'origine des fontaines, publicado en 1674 en París. Perrault efectuó un balance hidrológico de una cuenca situada en el curso superior del Sena, estimando un volumen de evaporación y comparándolo con la cantidad de lluvia que se depositaba en la cuenca. Siendo este el principio del conocimiento del ciclo hidrológico o del agua.

En 1687, el británico Edmond Halley, estimó la evaporación del Mediterráneo, comparando luego esta evaluación con los aportes de los ríos.

Ya en el siglo XVIII con la invención de la primera máquina de vapor y la derivada revolución industrial, el agua fue un elemento vital para el desarrollo del ser humano y de la tecnología durante este y los siglos XIX y XX.

La importancia del agua está ligada al desarrollo del hombre y como tal de la configuración de su entorno. El presente trabajo se enfoca en mostrar el único lugar en el mundo donde el sedentarismo humano se presentó en función al agua y no a la agricultura. Así como su estrecha relación desde el desarrollo de los antiguos pobladores y su configuración del paisaje, hasta convertirse en el enemigo a eliminar siendo olvidado y sepultado bajo los cimientos de una metrópoli en constante crecimiento.

# CAPITULO 1

## LOS LAGOS DE LA CUENCA DE MÉXICO

### 1.1 Los orígenes de la cuenca

La cuenca de México, debe su nombre a las formaciones orográficas que se encuentran a su alrededor, cadenas montañosas que se forman de norte a sur y de este a oeste, conteniendo las aguas que bajan a través de ellas. Se encuentra en el altiplano central de nuestro país, cruzada por el Cinturón Volcánico Transmexicano.

Aquí se reconocen siete grandes periodos de actividad geológica (TAPIA VARELA, 2002) desarrollados durante el cenozoico que se inicia hace 65 millones de años. Los dos últimos periodos de esta era, son los más relevantes en la formación de la cuenca, ya que durante Neógeno, que se inició hace 24 millones de años se presentan dos épocas. En el Mioceno tardío, hace 6 millones de años surgen las sierras de Guadalupe, Tepotzotlán y Tepozán. (**Ver Imagen 1**); y el Plioceno, hace 4 millones de años, se forman las sierras de Guadalupe y Zempoala en el occidente, así como las sierras: Nevada, a la que pertenecen el Iztaccíhuatl y el Popocatepetl y Río Frío en el oriente, cuya formación se extiende hasta el pleistoceno, y constituyen las paredes este y oeste de nuestra cuenca.

En el Cuaternario, que se inicia hace 1.6 millones de años (TAPIA VARELA, 2002), y que se divide en dos épocas, el Pleistoceno, donde surgen los cerros de la Estrella, Pino, Chimalhuacán, Chiconautla y Gordo y algunos otros. Durante el Holoceno, se forma la sierra del Chichinautzin, desarrollada durante los últimos 700,000 años de este periodo, y el último volcán que se forma es Xitle con una antigüedad de 2000 años.

Antes que se surgiera la sierra del Chichinautzin, y cerrara la cuenca, esta era exorreica y el contenido de los ríos desembocaba al río Balsas, llegando hasta el Pacífico. Este desagüe probablemente ocurría a través de dos ríos con dirección suroriente y sur poniente hacia Cuautla y Cuernavaca respectivamente. Pero el surgimiento del Chichinautzin bloquea el paso del agua y ocurre la formación de cinco lagos, que dieron lugar al paisaje lacustre prehispánico y que actualmente las aguas son vertidas artificialmente al río Pánuco, perdiéndose irremisiblemente ese paisaje lacustre.

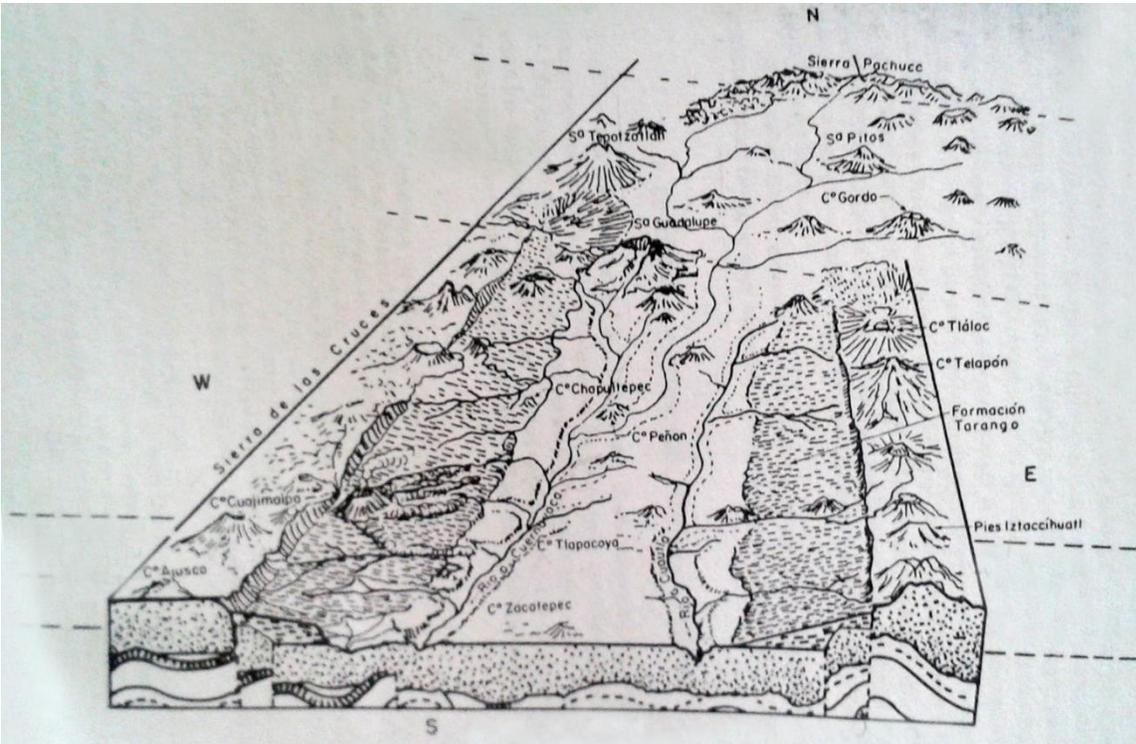


Imagen 1. Ilustra la hipótesis de la existencia de dos ríos hacia el poniente y el oriente que permitan el drenaje de esta cuenca hacia el sur, vertiendo sus aguas hacia el océano Pacífico.

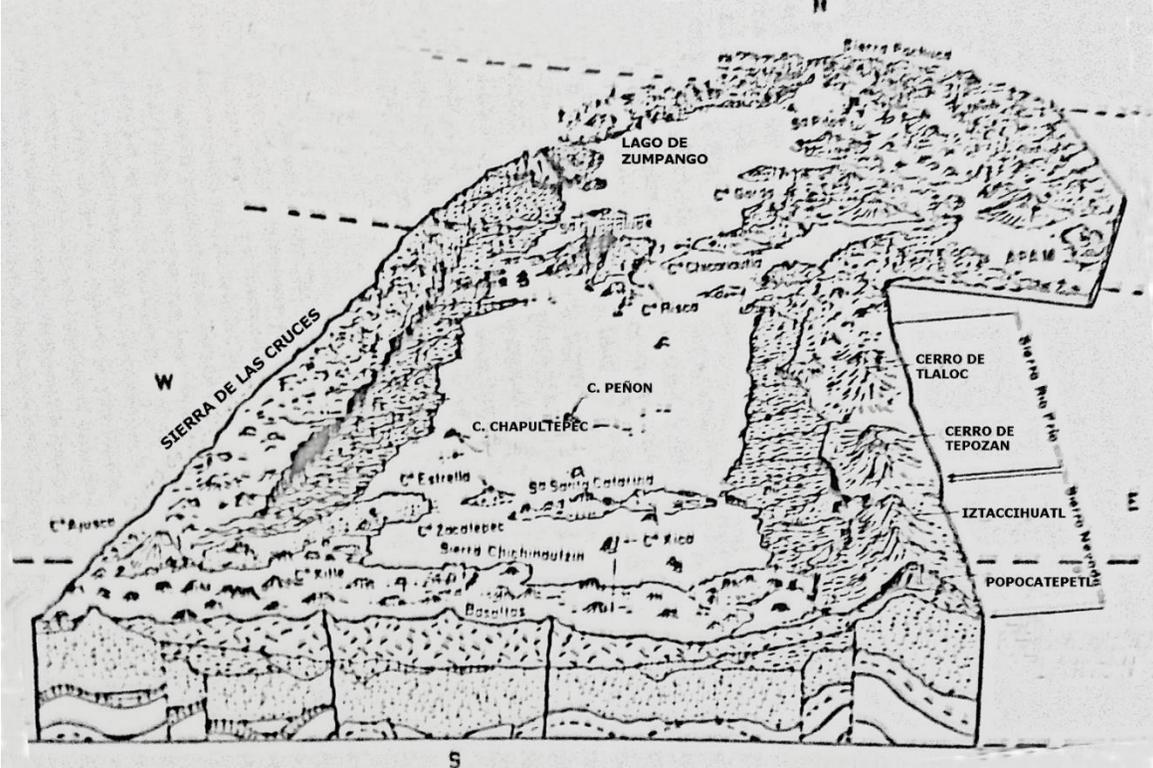


Imagen 2. Conformación de la cuenca endorreica de México, por el surgimiento de la sierra del Chichinautzin

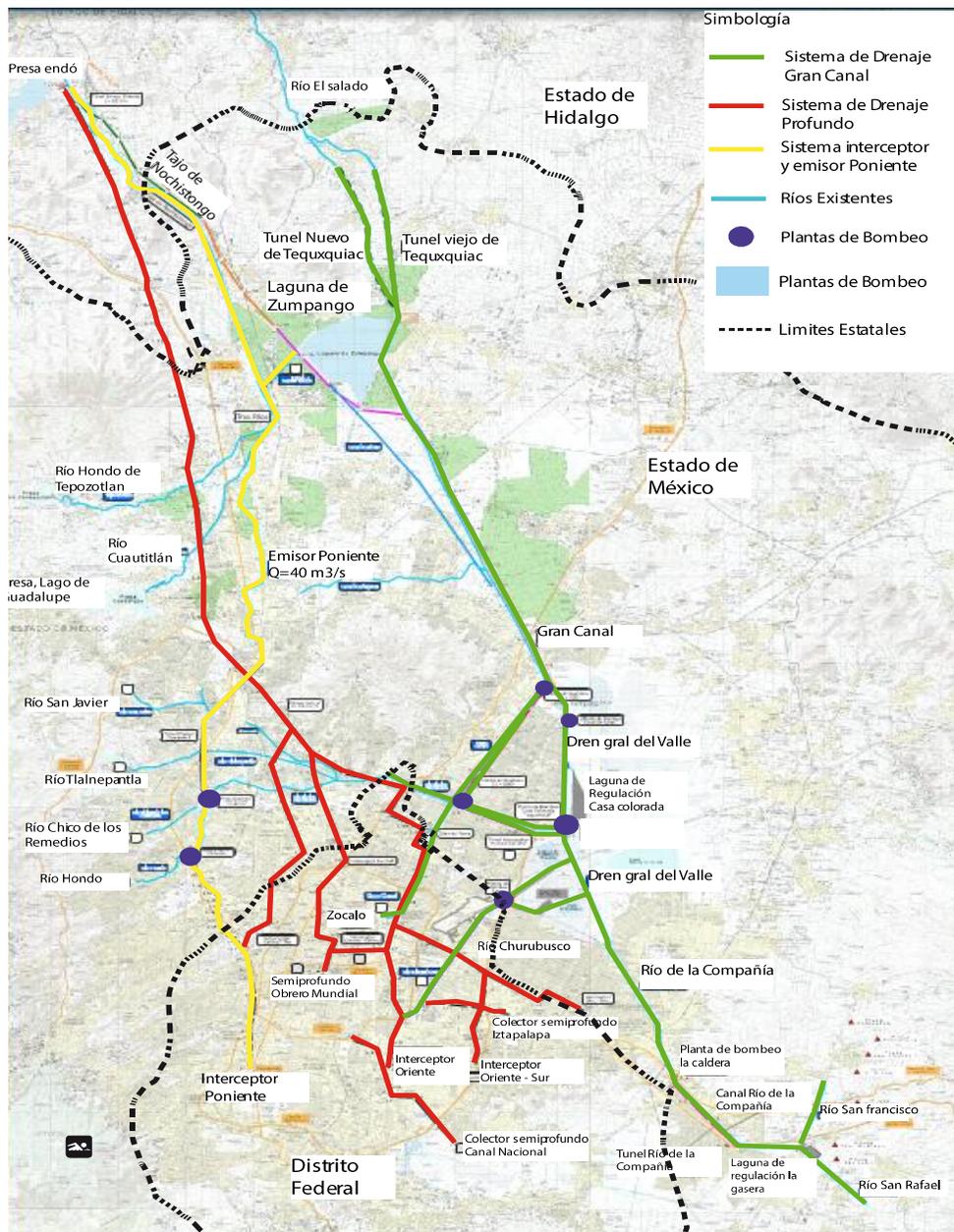
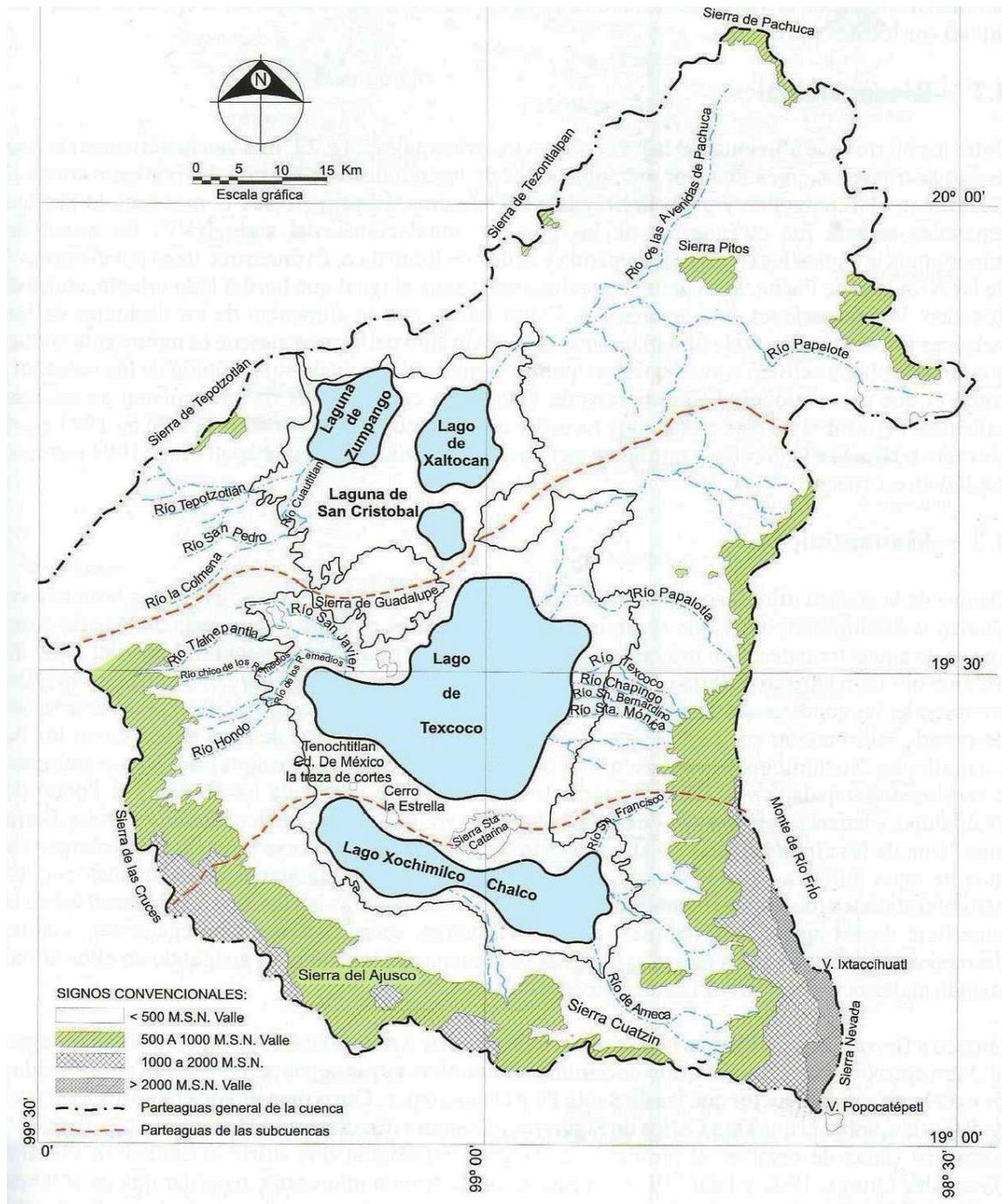


Imagen 3, drenaje actual de la cuenca hacia el río Pánuco, que vierte hacia el Golfo de México, a través del construcción del emisor poniente por el lago de Zumpango

## 1.2 Los lagos de la cuenca de México

A partir del surgimiento de la sierra del Chichinautzin, la cuenca exorreica se convirtió en endorreica, es decir una cuenca lacustre de aproximadamente 1200 km<sup>2</sup>, cerrando el flujo que desembocaba al Balsas (Ver Imagen 2). Aquí se estableció una serie de subcuencas que captaron el agua que bajaba de las

montañas y que formaron lagos. A través de los años, debido a constantes erupciones que estuvieron presentes en la cuenca, el agua en las subcuencas fue cambiando de formas y profundidades, fluctuando por diversas razones, entre arcillas que eran depositadas en el subsuelo, como en los manantiales que dotaban de agua a los depósitos, las temporadas de deshielo y lluvias fuertes, hasta las de sequía. (DURÁN, 2005)



### Imagen 3 Funcionamiento hidrológico de las subcuencas de México

La superficie de la cuenca de México se cubrió con el agua de 3 subcuencas (Ver Imagen 3); definidas, las cuales formaban 5 lagos, Xochimilco, Chalco, Texcoco, Xaltocán y Zumpango; los dos primeros de agua dulce, con una gran diversidad biológica, los otros 3 de agua salada, debido a las características del fondo que los aloja, cubierto por el producto de las exhalaciones ocurridas en la formación de la Sierra Nevada. En los lagos de agua salada es menor la diversidad, pero sus aguas acumuladas, teñidas por el alga *Spirulina*, son el apreciable espejo del cielo, las montañas y la vegetación, así describe Duran este paisaje acuático:

*...especialmente que la veían crecer y menguar, y estar algunas veces de una color y otras de otra... ella es salobre y gruesa y sucia, y unas veces está clara y otras, muy turbia, otras veces azul, otras verde y otras muy negra.* (DURÁN, 2005)

### 1.3 Lagos Dulces

El agua nace en las montañas que rodean los lagos y baja hasta encontrar su destino en el fondo de la cuenca. Xochimilco recibe sus aguas de los manantiales que se alimentan de la infiltración en la sierra del Chichinautzin y Chalco de los ríos que se forman en la Sierra Nevada.

### 1.4 Lagos Salados

El lago de Texcoco era el más extenso de la cuenca, recibe sus aguas de la sierra nevada, en el oriente, de las sierras de las cruces y Zempoala en el poniente, a través del río Magdalena, que desemboca en el río Churubusco y es uno de los afluentes más importantes. Cabe destacar que Texcoco es la parte más baja de la cuenca 2200 msnm (INEGI 2003), por lo que directa o indirectamente, todas las aguas que recibe las subcuencas se dirigen hacia el Lago Texcoco.



**Imagen 4. Aspecto del sistema lacustre mayor de la cuenca de México durante la primera ocupación mesoamericana** (ESPINOZA, El Embrujo del Lago. El sistema lacustre de la cuenca de México en la cosmovisión mexicana, 1996)

Los Lagos de Xaltocán y Zumpango o Lagos del norte tienen una diferencia muy clara sobre el resto de los lagos, su lecho se encuentra 6 metros por arriba del lecho del lago de Texcoco (Ver tabla 2), por lo

que su configuración es independiente ya que recibían sus aguas de las montañas de Pachuca a través del Río de las Avenidas y el Lago de Zumpango recibía sus aguas del río Cuautitlán, considerado de gran caudal por ser el que concentra los escurrimientos de la parte norte de la sierra de las Cruces, Guadalupe, y Tepetzotlán

**1.5 La estacionalidad del lago y el funcionamiento de las subcuencas**

La cuenca de México por su topografía y la forma en que se alimenta el agua conforma 5 lagos, mediante 3 subcuencas: la de los lagos de Zumpango y Xaltocán al norte, la del lago de Texcoco en el centro y la de los lagos de Xochimilco y Chalco al sur, que pueden entenderse bajo el proceso de estacionalidad (Ver Imagen 4).

El funcionamiento de la cuenca debido los cambios altitudinales es como si fuera una fuente, cada lago es un plato, que al llenarse se derrama sobre el de menor altura, de tal manera que durante época de lluvias el paisaje era homogéneo observando una conexión total entre los lagos; Sin embargo en época de secas, cada plato estaba separado, funcionando individualmente. **Tabla 2**

Lago	Nivel del Fondo
Lago de Zumpango	6.062m
Lago de Xaltocan	3.474m
Lago de Texcoco	0.00m
Lago de Xochimilco	3.139m
Lago de Chalco	3.082m

**Tabla 1. Niveles del fondo de los lagos dentro de la cuenca** (ESPINOZA, El Embrujado del Lago. El sistema lacustre de la cuenca de México en la cosmovisión mexicana, 1996). **Tomando al lago de Texcoco como nivel 0.00m.**

Orozco y Berra, 1862 (OROZCO Y BERRA, 1864) y Espinosa en 1902 (ESPINOZA, Prescencia del lago en la cosmovisión mexicana (principios del s. XVI: un primer acercamiento), 1992), Establecieron los datos del nivel de fondo de los lagos. (Tabla 2) lo que muestra que el lago de Texcoco es el más profundo. Este lago se alimenta de las aguas de los lagos dulces de Xochimilco y Chalco en la parte sur, así como por los lagos de Xaltocán y Zumpango en la parte norte, siendo este último el del fondo más alto en la cuenca, teniendo 6 metros sobre el nivel del lago de Texcoco.

El lago de Texcoco por ser el más profundo recibe las aguas de todas las subcuencas y presenta la mayor extensión. En la parte poniente de éste se funda la ciudad de Tenochtitlan que se encuentra sobre terrenos libres de sales. Por el contrario, el oriente del lago de Texcoco se desplanta en terrenos resultado de la acumulación de las cenizas de la formación de la Sierra Nevada, donde se encuentran volcanes como: el Iztaccíhuatl y Popocatepetl; razón por la que las aguas en esta porción del lago son salobres (SANTOYO VILLA, OVANDO SHELLEY, MOOSER, & LEÓN PLATA, 2005).

Los asentamientos mexicas en el islote fundacional de Tenochtitlan conllevan a la primera modificación dentro de la cuenca, que hace el hombre, conduciendo a un cambio en la configuración visual, biológica y física de los lagos, mediante la construcción de un dique conocido como el albarradón que logra separar el oriente del lago de Texcoco de la porción poniente, permitiendo que esta parte adquiriera condiciones de lago de agua dulce, al que posteriormente se conoce como:

Lago de México **(Ver Imagen 5)**

Los límites del lago son: al norte, la sierra de Guadalupe; al sur, el estrecho de la península de Iztapalapa; al poniente, la sierra de las cruces, y al oriente, el albarradón, construido por Nezahualcóyotl en 1449 (VELA, 2007; TAPIA VARELA, 2002), que logra dividir para siempre el agua dulce de la salada.

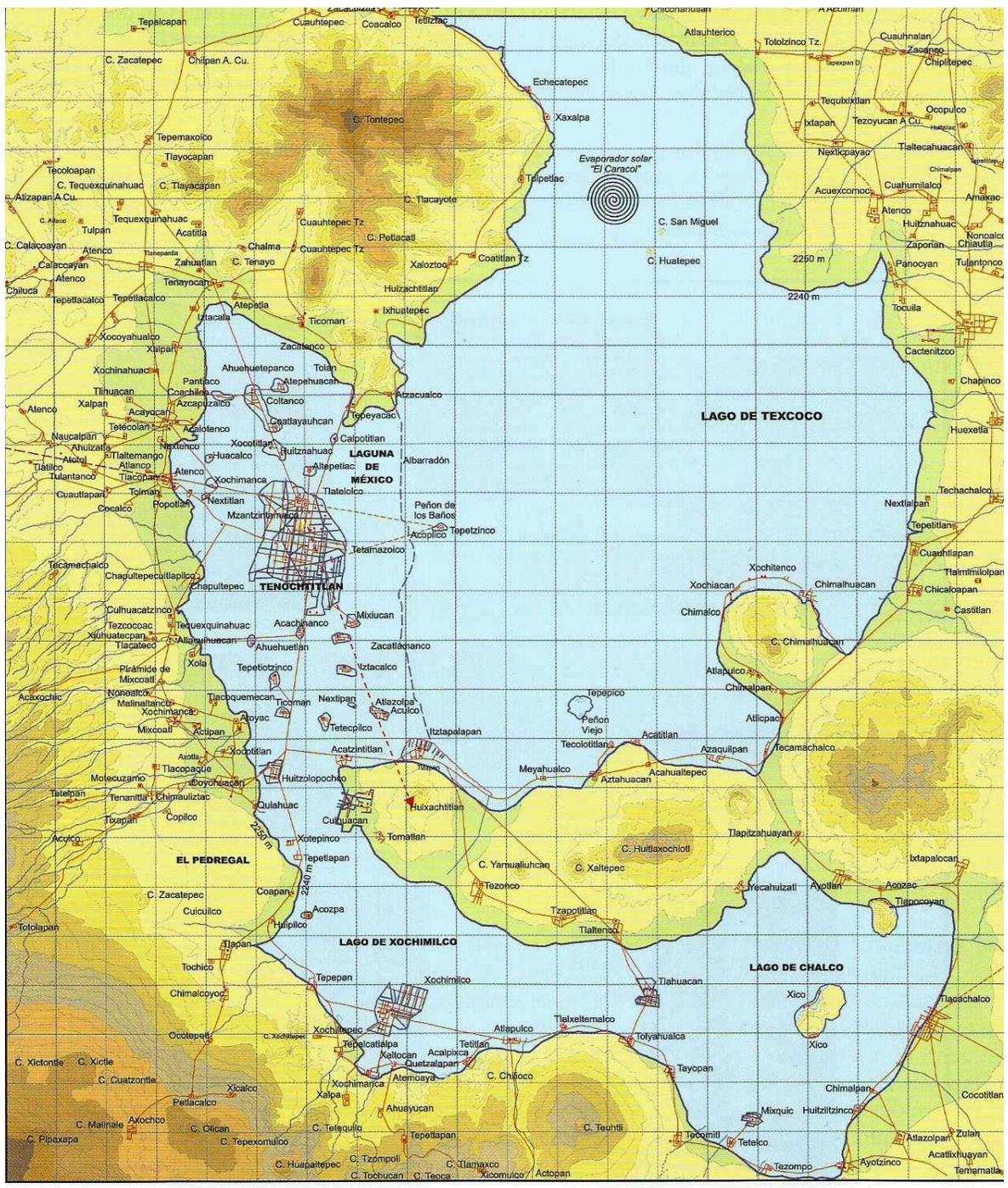


Imagen 5. Cuenca de México después de construido el albarradón. Se observa el lago que contiene la ciudad de Tenochtitlan, el cual ya es completamente dulce.

# CAPITULO 2

## LA ACCIÓN DEL HOMBRE SOBRE LOS LAGOS

### 2.1. El albarradón de Nezahualcóyotl

El primer gran cambio que sufre la cuenca de México, ocurre durante el periodo prehispánico con la gran obra hidráulica que Nezahualcóyotl construye, a través de su capacidad de observación y análisis del comportamiento topográfico e hidrológico de esta región; ya que comprende que la razón de la calidad salada del agua se debe a la tierra que lo contiene y que la profundidad de los lagos permite construir un elemento que impida que el agua dulce que rodea a la Tenochtitlan, proveniente de Xochimilco se mezcle con el agua salada reservada en la porción profunda del sector oriente. Así es como a partir de 1449 se construye el albarradón (**Ver Imagen 6**), de 12.6km. De longitud y 6.7m de ancho. El albarradón partía del pueblo de Atzacolco y llegaba a Iztapalapa (SANTOYO VILLA, OVANDO SHELLEY, MOOSER, & LEÓN PLATA, 2005). La acción del hombre cambia el paisaje de la cuenca y a través de esta obra se inicia el apogeo de la ciudad de Tenochtitlan, bajo el mando de Moctezuma Ilhuicamina, quien recibe los beneficios de la triple alianza conformada por Izcoatl de Tenochtitlan, Nezahualcóyotl de Texcoco y Totoquihuatzin de Tlacopan.



Imagen 6. Fotografía actual de lo que queda del albarradón de Nezahualcóyotl

Esta unión induce a Nezahualcóyotl a utilizar su habilidad en beneficio de Tenochtitlan, ya que el agua dulce en su alrededor permite la producción agrícola.

### 2.2. Tajo de Nochistongo de Enrico Martínez

Posteriormente, a la llegada de los españoles ocurre una nueva transformación radical en la cuenca. A la conclusión de la conquista, los españoles asentaron su ciudad sobre las ruinas de la antigua Tenochtitlan. A pesar de los problemas que conllevaba la fundación de la Nueva España sobre el lago, Hernán Cortes insistió en la utilización de este sitio para su construcción. En este periodo el agua fue tomada como enemigo a vencer, que provocaba constantes inundaciones, debido al desconocimiento que los españoles tenían de este paisaje. Así, suplantaron canales por avenidas, diques y acequias por nuevos asentamientos y la ciudad crecía de manera incontrolada y a la par las inundaciones, por lo que la solución fue desecar los lagos para ganar terreno sobre los cuales construir y controlar el volumen, como lo relata la siguiente descripción de Bernal Díaz del Castillo:

*«...Y diré que en aquella sazón era muy gran pueblo y que estaba poblada la mitad de las casas en tierra y la otra mitad en el agua, y ahora en esta sazón está todo seco y siembran donde solía ser laguna. Está de otra manera mudado que si no lo hubiere de antes visto dijera que no era posible que aquello que estaba lleno de agua, que esté ahora sembrado de maizales...»*

Ante el crecimiento de la población de la ciudad también fue necesario ampliar los cultivos para poder alimentar la gente, que fue poblando la cuenca, por lo que espacios antes cubiertos por agua, cedieron paso a la agricultura, habitación y una nueva actividad productiva que fue la ganadería.

A principios del siglo XVII las inundaciones azotan a la ciudad de México, por lo que el Virrey Luis de Velazco solicita la intervención de ingenieros que propongan soluciones a esta problemática. Se reciben entre otras la propuesta de Adrián Boot y Enrico Martínez. El primero un ingeniero holandés acostumbrado al manejo del agua dentro de la ciudad propone un proyecto que propone convivir con ella mediante el manejo topográfico de ésta, que asegura el funcionamiento de la ciudad con un dique que contuviera las aguas del lago de Texcoco, drenando la ciudad con canales que vierten hacía éste. Idea que fue desechada porque es una solución parecida al manejo indígena, cuya historia los conquistadores pretendían borrar.

La propuesta de Enrico Martínez se basa en la conducción del agua fuera de la cuenca, desviando los ríos Cuautitlán y Tepotzotlán desde la parte alta, para evitar que sus aguas lleguen al lago de Zumpango. Esta obra incluía la construcción de un túnel en el área conocida como Nochistongo, el cual le da salida

hidráulica al valle utilizando los ríos y escurrimientos existentes que vierten el agua hacia Tula, eliminando los excesos de aguas que aportaban estos dos ríos a la cuenca. Esta obra monumental del virreinato se conoce como tajo de Nochistongo (**Ver Imagen 7**).



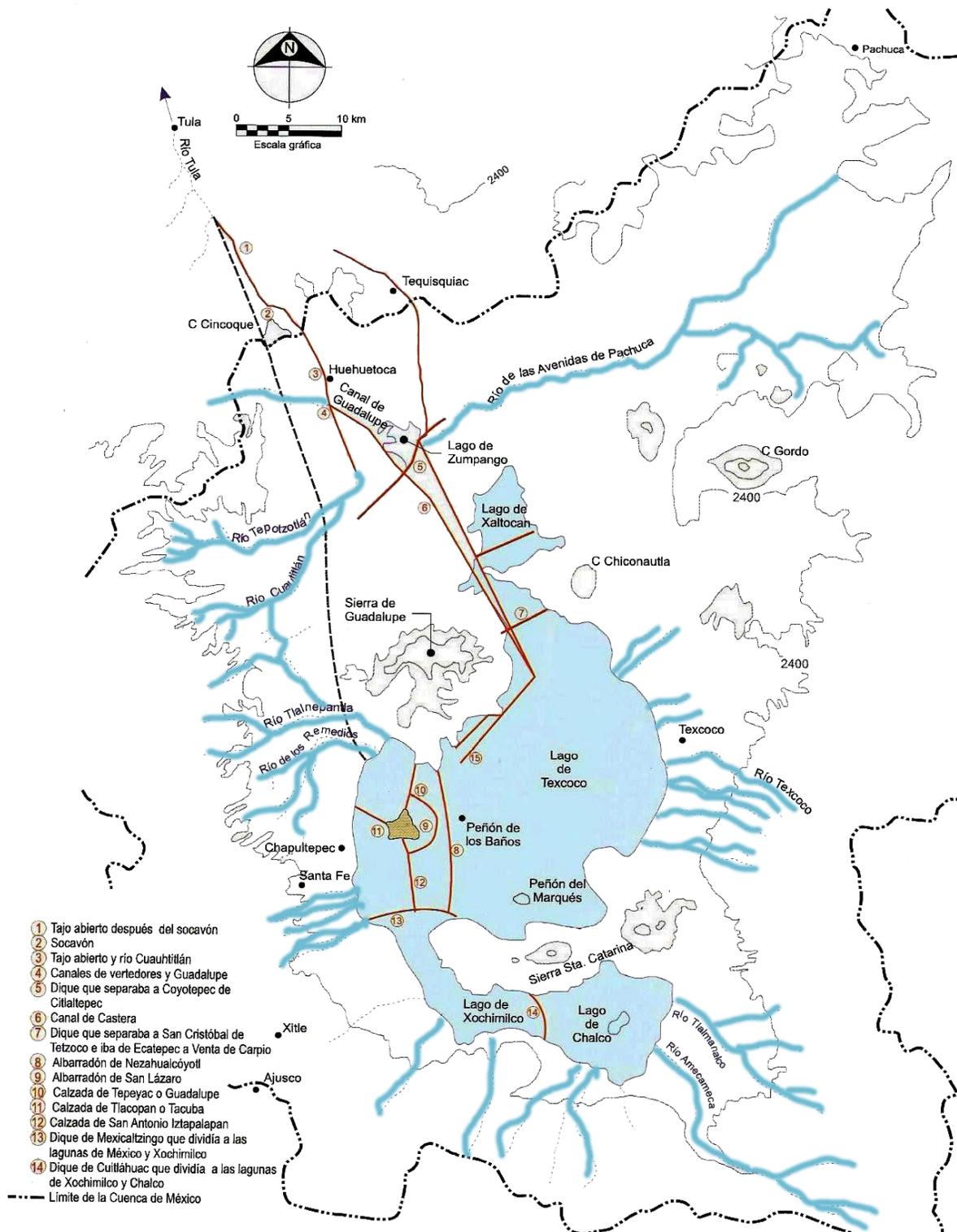
**Imagen 7. Ubicación del túnel o tajo de Nochistongo con lo que se desvían las aguas del río Cuautitlán, evitando que lleguen a Zumpango.**

Estas acciones logran que los lagos del norte no viertan sobre el lago de Texcoco y esto disminuye las aguas de éste y como la ciudad de México se encuentra en la zona menos profunda hace que las inundaciones disminuyan. Durante las obras en 1629 ocurre una gran inundación en la ciudad debido al cierre del canal en aras de proteger su construcción aun inconclusa, para 1637 se continúan los trabajos, modificando el túnel primeramente propuesto en la apertura del canal a cielo abierto. Con esto se consigue disminuir el volumen del lago de Zumpango lo que continúa el cambio de la fisionomía de la cuenca.

En 1783, bajo el mando del Arq. Francisco de Garay se terminaron los trabajos del tajo de Nochistongo, agregándole obras complementarias como la excavación de un tajo de menores dimensiones para descargar la laguna de Zumpango (SANTOYO VILLA, OVANDO SHELLEY, MOOSER, & LEÓN PLATA, 2005). Al que se le llamo: **Canal de Guadalupe**. Así como la reconstrucción de un dique localizado en San Cristóbal, para contener las aguas del lago de Zumpango (**ver Imagen 8**).

A partir de esta obra, el paisaje lacustre que rodeaba a cada habitante de la cuenca y que daba identidad a los pobladores, se perdió por la incapacidad de manejo del recurso hidráulico, que resuelven sacando las aguas que asediaban a la joven ciudad de México. A partir de ahí se desarrollaron cambios que romperían con el equilibrio de la cuenca. Los bosques se talaron para darle paso a la ganadería, kilómetros de bosque se convirtieron en praderas y el agua que fue cediendo lugar a los conquistadores se convirtió en parcelas

y en campos muy fértiles que formaron parte de la economía que predominó durante la colonia; las haciendas contribuyeron a crear este nuevo paisaje.



**Imagen 8. Ubicación de las obras del Tajo de Nochistongo, así como ríos, lagos, albardones que conformaron el sistema de control hidráulico en el s. XVII.**

### **2.3. Concepción del gran canal y el túnel de Tequixquiac, de Porfirio Díaz**

El tajo de Nochistongo solamente consiguió disminuir el volumen del agua que ingresaba a la cuenca pero por su pendiente no pudo aprovecharse íntegramente como un desagüe (SANTOYO VILLA, OVANDO SHELLEY, MOOSER, & LEÓN PLATA, 2005) por lo que en la época de lluvias el problema continuaba y formaba parte de la habitabilidad cotidiana de la ciudad de México, problemas que se extendieron hasta el siglo XIX, al igual que el crecimiento de la ciudad, con lo que el problema de las inundaciones pluviales se agravó con el manejo del drenaje, lo que impidió mantener la ciudad con un adecuado nivel de saneamiento.

En 1804, a petición del Virrey Iturrigaray. Alejandro de Humboldt, visitó la ciudad con el encargo de revisar todas las obras hidráulicas que se encontraban en la cuenca. Su opinión se centró en que la ciudad siempre estará en riesgo de inundación hasta que no se abra un canal que vacíe directamente al lago de Texcoco. En efecto, si bien se contaba ya con una obra que permitió derivar los escurrimientos de los principales ríos del norponiente, sobre todo el río Cuautitlán, evitando que la laguna de Zumpango se desbordara hacia el lago de Texcoco y éste hacia la ciudad, no se podían controlar las aportaciones de todas las demás micro cuencas situadas al sur, poniente y oriente de la obra concluida y el lago de Texcoco no tenía posibilidades de descargar fuera del valle, por lo que en septiembre de 1819 se observa una gran inundación en la Villa de Guadalupe.

En 1856 se convocó a un nuevo concurso nacional para resolver los problemas hídricos de la cuenca. El ganador fue el Arq. Francisco de Garay quien propuso en su proyecto un canal de drenaje de 50.4 km., y un túnel de 8.87 km que conduciría un caudal de 35 m<sup>3</sup>/seg. Abandonando el uso del tajo de Nochistongo, que hasta ese tiempo era una solución corta.

Esta obra se inició hasta 1866, bajo el mandato de Maximiliano de Habsburgo. Concebido como un canal a cielo abierto de 39.5 km, que inicia en el lago de Texcoco, atraviesa Xaltocán, entra a Zumpango, donde se inicia en el túnel que culmina en Tequixquiac y recibe el nombre de este último poblado, este túnel tiene una longitud de 10 km. Debido a conflictos sociales y complicaciones con el tamaño de la excavación esta obra se mantuvo intermitente durante el imperio y hasta después del gobierno de Benito Juárez.

En 1879 el Ing. Luis Espinoza elaboró un nuevo proyecto basado en el del Arq. Garay, resultando un túnel de 10 km de largo, y un canal a cielo abierto de 50 km de longitud con taludes formados a 45° y una pendiente de 0.185 m por kilómetro, que corresponde a menos del 2% (**Ver Imagen 9**). El cuál sería el proyecto definitivo que se construiría como solución a las inundaciones, ya durante el gobierno de Porfirio Díaz (COHEN, 1999).

En 1886 se designó a los miembros de La Junta Directiva del Desagüe que se encargarían de la construcción del proyecto del Ing. Luis Espinoza. Los problemas técnicos fueron graves desde el principio de la obra, principalmente por la incapacidad de las empresas contratadas de prever los problemas geotécnicos de los suelos de la zona lacustre. Sin embargo la pericia de los ingenieros y la relación cordial del presidente Porfirio Díaz con los dueños de las empresas contratadas, pudieron solucionar todos los problemas.

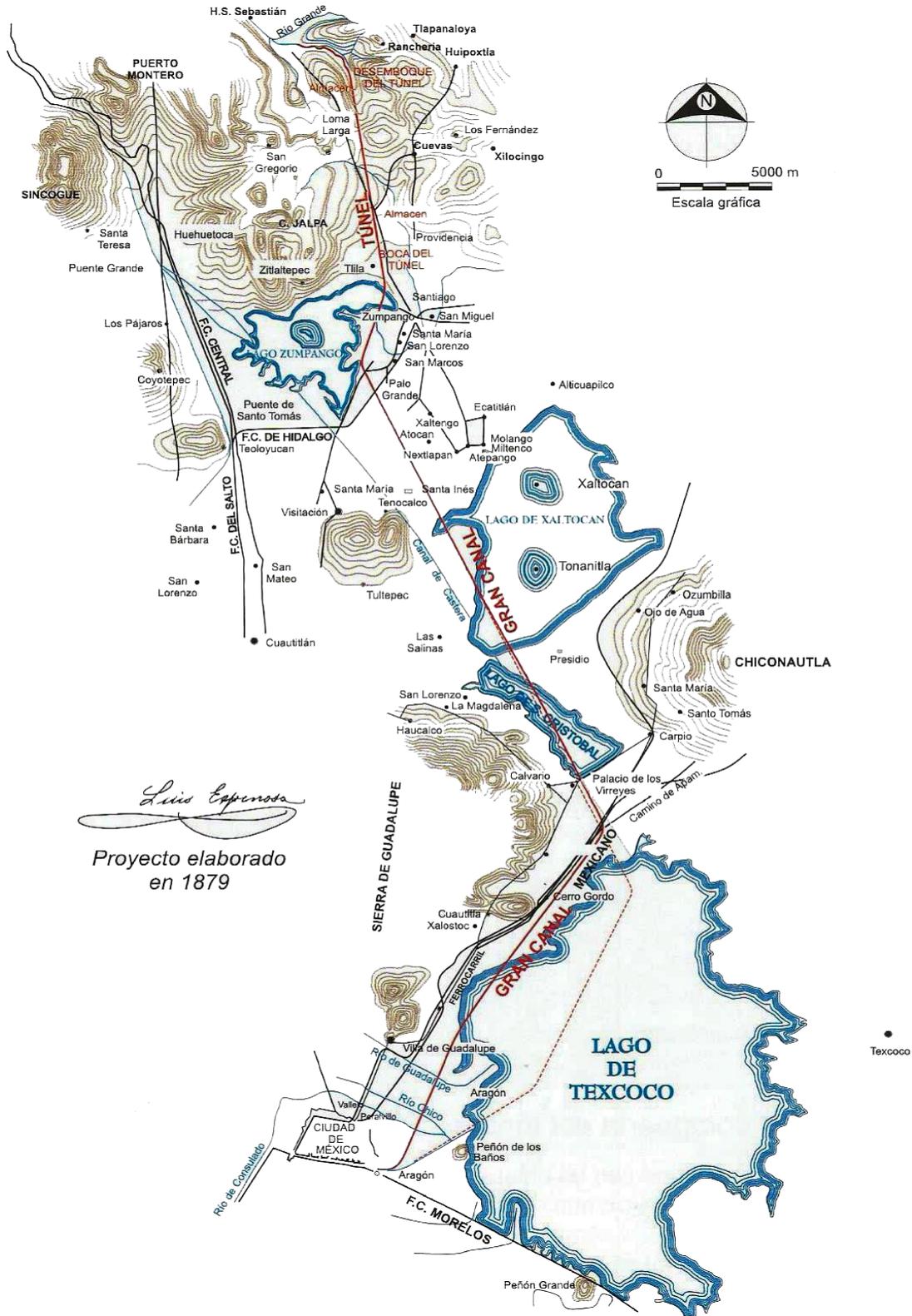


Imagen 9. Proyecto elaborado y firmado por el Ing. Luis Espinoza, 1879 (SANTOYO VILLA, OVANDO SHELLEY, MOOSER, & LEÓN PLATA, 2005)

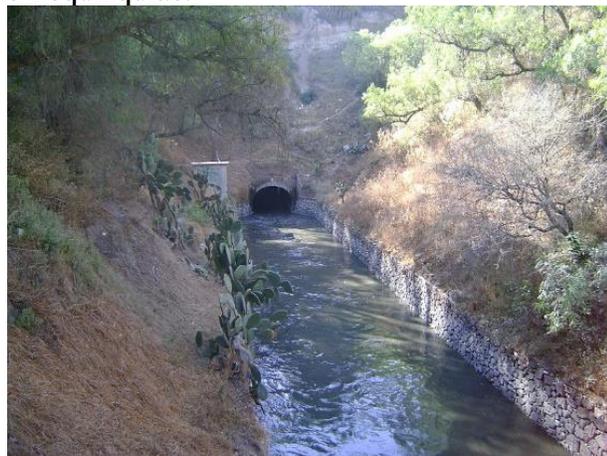
La obra constituyó la segunda salida artificial para el drenaje de México y fue terminada e inaugurada por el entonces presidente Porfirio Díaz el 17 de marzo de 1900, visitando el tajo abierto (**Ver Imagen 10**), la entrada del túnel de Tequixquiac que se encuentra en Zumpango (**Ver Imagen 11**), y la salida del túnel 10 km después, Zumpango (**Ver Imagen 12**), con lo que se pensó que se había dado una solución definitiva a las inundaciones de la ciudad, que para ese año albergaba poco menos de un millón de habitantes.



**Imagen 10. Gran canal del desagüe, canal a tajo abierto el cual cruza los lagos de Texcoco, Xaltocán y Zumpango para entrar al túnel de Tequixquiac.**



**Imagen 11. Entrada al túnel de Tequixquiac, en Zumpango**



**Imagen 12. Salida del primer túnel de Tequixquiac y su desembocadura al río el Salado**

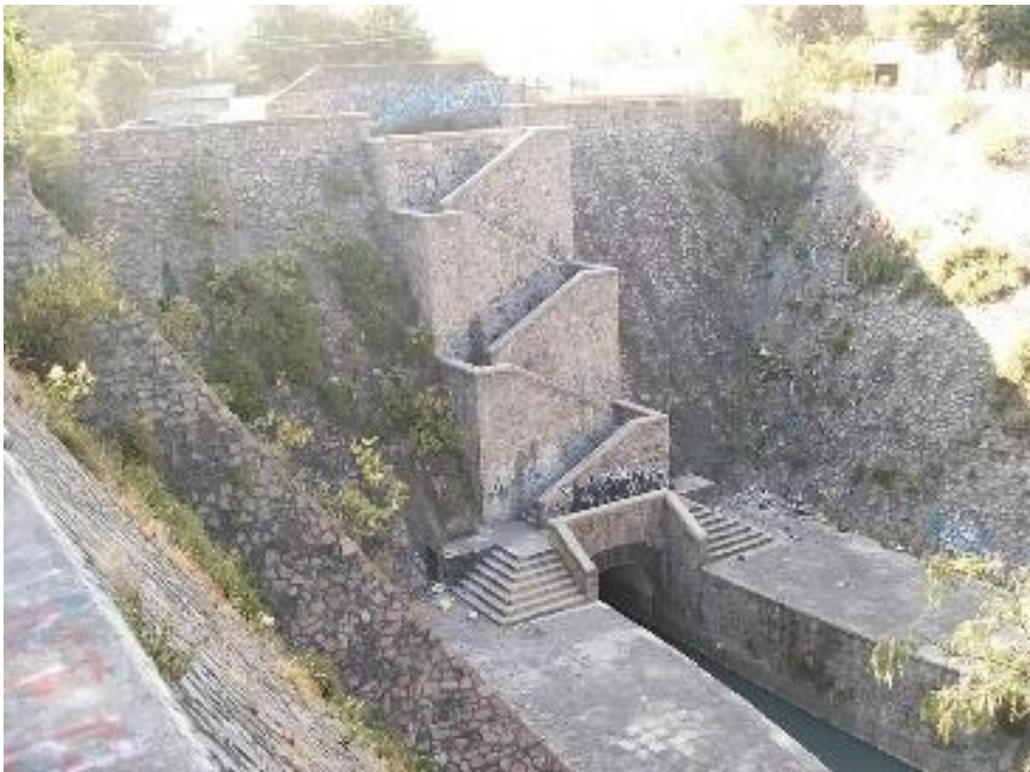
## 2.4. Funcionamiento del Gran Canal y el segundo Túnel de Tequixquiac

Posterior a los conflictos bélicos entre 1910 y 1930, se llegó a la estabilización del país y un incremento en el nivel de vida de las personas que habitan la cuenca de México. Lo que provocó un aumento en la población que demanda servicios de agua potable y drenaje. Se realizaron pozos para la explotación del acuífero y se re densificó la red de drenaje para sacar las aguas negras de la cuenca.

Procesos, que provocaron hundimientos cada vez mayores en

la ciudad, colocando a la ciudad en los niveles de los remanentes lagos, por lo que la probabilidad de inundaciones dentro de la ciudad fue más constante. Y así ocurrió, en los años de 1937, 1941, 1942 y 1944 (SANTOYO VILLA, OVANDO SHELLEY, MOOSER, & LEÓN PLATA, 2005), años en los que se registraron inundaciones dentro de la ciudad. Este riesgo aumento debido al decrecimiento de la funcionalidad del drenaje profundo que, debido a las inundaciones constantes, perdió capacidad de desfogue.

Fue entonces que en los años de 1937 y 1942 se construyera un segundo túnel en Tequixquiac y así incrementar la capacidad del gran canal que incremento su capacidad por algunos años más (**ver Imagen 13**).

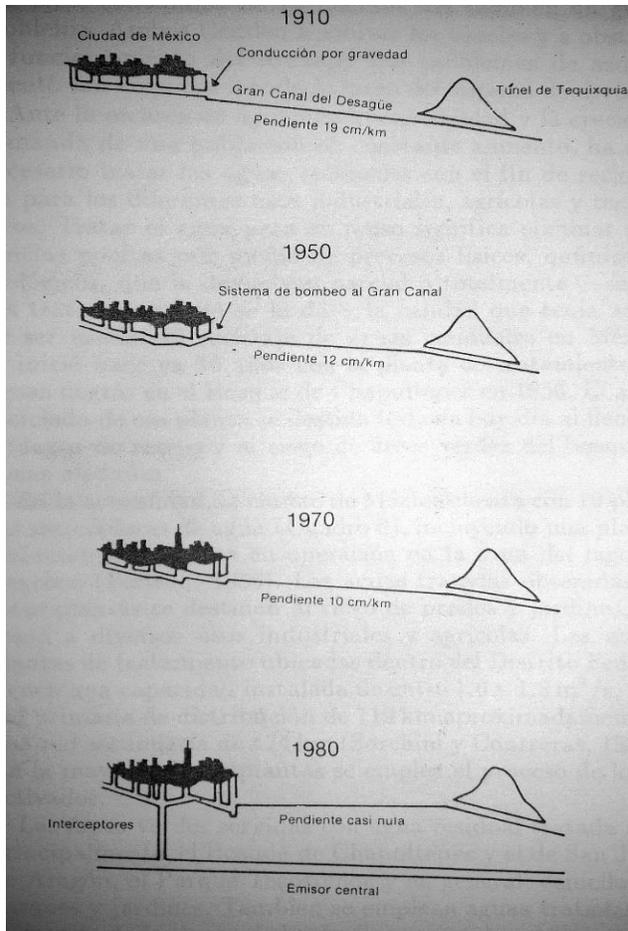


### **Imagen 13. Salida del túnel nuevo de Tequixquiac**

#### **2.5. Drenaje profundo, emisor central y emisor poniente**

A pesar de la renovación del gran canal por la construcción del segundo túnel de Tequixquiac, en 1949 ocurrió nuevamente una inundación en la ciudad de México, que la mantuvo así por más de tres meses. Provocando que se determinara nuevamente la necesidad de un sistema de drenaje que desahogara el gran caudal que se presentaba en la cuenca.

El grave hundimiento que persistió por la explotación de los acuíferos, provocó que el área de la ciudad quedara en contrapendiente **(Ver Imagen 14)**. Por lo que se tuvo que bombear el agua hacia el Gran Canal, y a partir de 1961 se construyó el interceptor poniente con una longitud de 16.6 km para recibir los caudales de los ríos del poniente de la cuenca y así evitar que lleguen al Gran Canal, a través de este emisor, las aguas son llevadas al Tajo de Nochistongo (EZCURRA, 2008) (GUERRERO, 1982) (AGUA, 1990)



**Imagen 14 Disminución de la pendiente en relación a los hundimientos presentados en la ciudad.**

Sin embargo, el constante crecimiento de la población hizo insuficiente la capacidad del emisor poniente y del Gran Canal. Era necesario un sistema que no fuera afectado por las inundaciones de la ciudad y sin necesidad de bombear el agua. En 1967 se inició la construcción del Sistema de Drenaje Profundo y del Túnel Emisor Central que completarían el principal sistema de drenaje y descarga de las aguas fuera de la cuenca (**Ver Imagen 15**). Diseñado por el Ing. Raúl Ochoa (SANTOYO VILLA, OVANDO SHELLEY, MOOSER, & LEÓN PLATA, 2005; OROZCO Y BERRA, 1864), consiste en una red de túneles de 135 km de longitud y un túnel de hasta 200 m de profundidad y 40 km de largo que conduce las aguas por el poniente hacia el río del Salto, recolectando también los remanentes del antiguo Tajo de Nochistongo y su reciente conexión con el emisor central. Fue inaugurado en 1975 y complementado con una serie de vasos reguladores para contener la sobre carga.

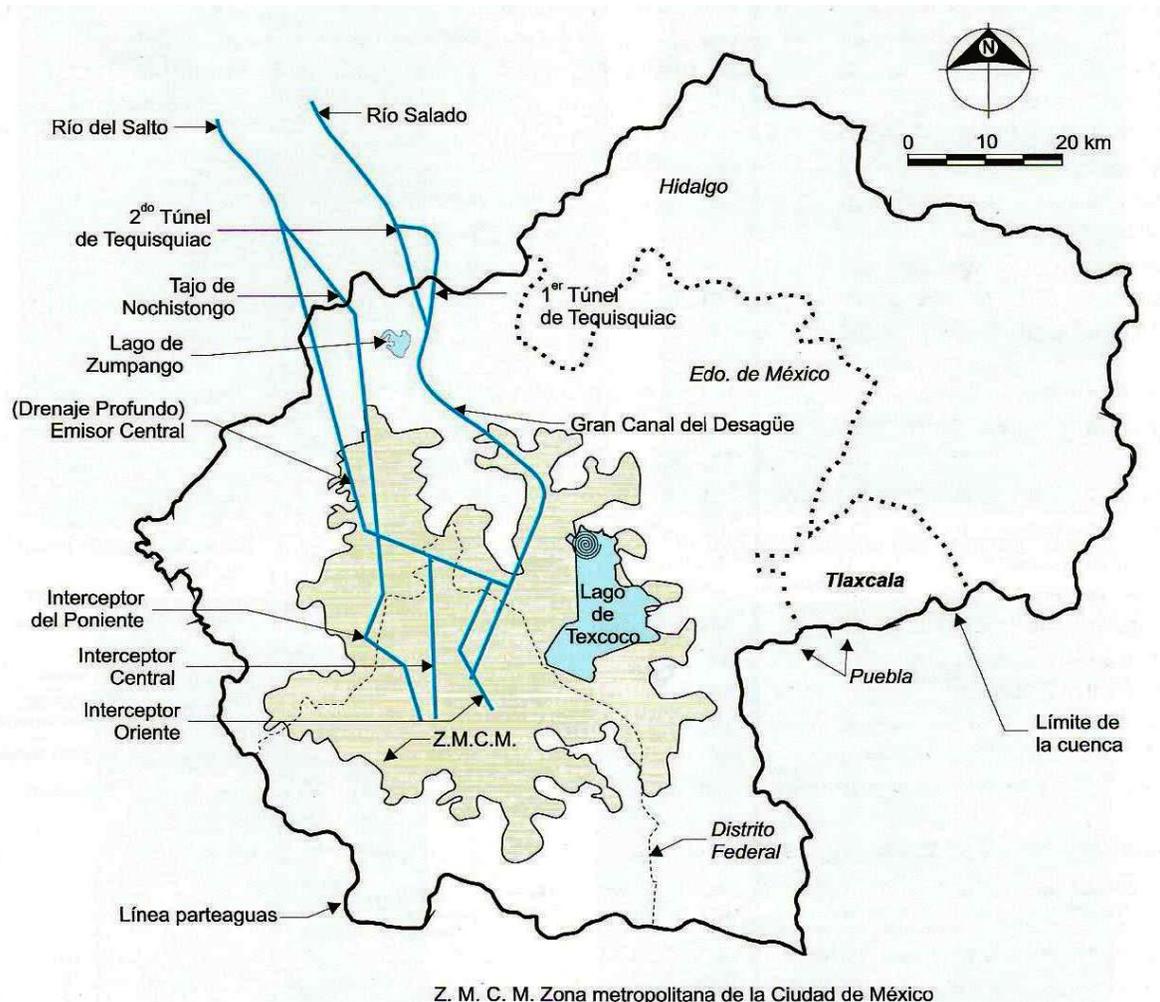


Imagen 15. Sistemas de drenaje de la cuenca de México, desde el Gran Canal de Desagüe, hasta el Drenaje Profundo, incluyendo los tres interceptores.

**2.6. Disposición de las aguas negras, sistema de vasos reguladores y presas del actual drenaje de la Ciudad de México.**

**2.6.1. Sistema de vasos reguladores y presas que alimentan el drenaje de la cuenca de México**

Se construyeron aproximadamente 35 presas en todos los ríos del poniente de la ciudad de México. Generando una red capaz de contener y regular la desembocadura de todas las aguas producto de las descargas residuales y pluviales, generando el Sistema de Drenaje de la Cuenca de México. El cual, está conformado por una red primaria de colectores con diámetros de 0.6 a 2.5 m y posee una longitud de 1 176 km; también contiene una red secundaria de tuberías con un diámetro entre 30 a 40 cm con una longitud de 12 000 km. Esta red desemboca en interceptores que canalizan las aguas hacia alguno de los tres sistemas de drenaje que las desalojan fuera del valle. (EZCURRA, 2008)

Las aguas desalojadas por estos sistemas llegan a la cuenca del río Tula en el Estado de Hidalgo y de ahí al Golfo de México a través de la cuenca del río Panuco.

Los tres sistemas principales que desalojan los caudales de aguas residuales y pluviales hacia la cuenca del panuco se describen a continuación: **(Ver Imagen 16)**

1. Interceptor – Emisor Poniente. Formado por el Interceptor que recibe los escurrimientos de las barrancas ubicadas en el sur poniente del valle, regulados por un sistema de 36 presas, 18 en Estado de México y 18 en la Ciudad de México, con una capacidad de 3.1 millones de metros cúbicos (GUERRERO, 1982) y el Emisor Poniente, que se compone de un túnel de 4 m de diámetro y 12.4 km. de longitud; inicia en Ciudad Universitaria y descarga en la planta de bombeo Río Hondo, donde a través del río del mismo nombre, vacía al vaso regulador de Cristo, situado en Naucalpan de Juárez, Estado de México y desfoga al Emisor Poniente. Este es un canal a canal a cielo abierto que recibe los afluentes de los ríos Tlalnepantla, San Javier, Cuautitlán y Tepotzotlán, hasta llegar a la derivadora Santo Tomas, donde se regulan las aguas hacia la Laguna de Zumpango o descargan al Tajo de Nochistongo, para incorporarse al río El Salto y posteriormente descargar al Río Tula y la Presa Endhó, donde se distribuye como agua de riego.
2. El Gran Canal. Inicia en la planta de bombeo de Lecumberri, cerca del centro de la ciudad, que recibe las aportaciones de la zona norte, centro y nororiente. En esta planta el agua negra es bombeada hacia el Gran Canal construido por Porfirio Díaz, ya que la ciudad se hundió y el canal permaneció en su nivel original. El destino final de esta agua son los distritos 3 y 100 de riego que vierte al Valle del Mezquital y Alfajayucan respectivamente. En su recorrido se incorpora el río de los Remedios con las aguas provenientes de la zona poniente de la ciudad de México. Las excedencias de los ríos Tlalnepantla, San Javier y aguas residuales de los municipios de Tlalnepantla, Naucalpan, Ecatepec y Nezahualcóyotl; También se incorpora en el km. 10+500 el canal de la draga, que conduce los caudales de los ríos de la Compañía y Churubusco, por el dren general del Valle.

Aledañosamente en su trayecto recibe descargas municipales de las poblaciones circundantes y tiene extracciones para diversos distritos de riego; cruza el municipio de Zumpango y fluye por los túneles de Tequixquiac, para incorporarse al río Salado. (GUERRERO, 1982)

3. El Sistema de Drenaje Profundo tiene actualmente 166 km en operación, construido en su primera etapa en 1975, cuenta con un emisor central de 6.50 m de diámetro y 50 km de longitud, este inicia en los límites de la delegación Gustavo A. Madero y Tlalnepantla. En una segunda etapa se construyeron 6 interceptores con diámetros que van de 3 a 5 m y profundidades de 20 a 48 m que drenan diversas zonas de la ciudad. Los seis interceptores de poniente a oriente son:

Interceptor Centro-Poniente que inicia en periférico y constituyentes, recoge las aguas del poniente.

Interceptor Central que inicia en la colonia Narvarte, colectando las delegaciones del centro sur

Interceptor Centro-Centro que inicia en el zócalo, colectando las aguas del centro norte.

Interceptor Oriente-Oriente, inicia en Iztapalapa y recoge parte de las aguas del río de La Compañía y el drenaje de la zona oriente.

Interceptor Oriente-Sur, inicia en Coyoacán, colectando las aguas de las delegaciones Iztacalco, Tlalpan y parte de Coyoacán

Colector Canal Nacional, que inicia en Xochimilco y recoge las aguas del sur.



### 2.6.2. Túnel Emisor Oriente

En el año 2008 y después de las constantes inundaciones que azotaron la zona oriente que comprende de Ecatepec a Aragón se adjudicó un proyecto para resolver este problema.

El proyecto contempla un túnel de 62 km de largo y 7 m de diámetro, los cuales tienen una capacidad de desalojo de aguas de 150 m<sup>3</sup>/s. La obra sigue en construcción, 10 años después del arranque, principalmente por falta de un proyecto ejecutivo que previera los análisis de las condiciones geológicas, geotécnicas y mecánicas del terreno que contiene el trazo del túnel **(Ver Imagen 17)**.



Imagen 17. Trazo del proyecto Túnel Emisor Oriente, se puede observar que el túnel pasa a un lado de la laguna de Zumpango.

### 2.6.3. Disposición de las aguas negras en la ciudad de México

En México se manejan dos métodos de disposición una vez descargadas las aguas: disposición por irrigación y disposición por dilución

La disposición por irrigación consiste en derramar las aguas negras sobre la superficie de un terreno sembrado lo cual se hace mediante diques y zanjas de regadío. Excluyendo una pequeña parte que se evapora, el resto se infiltra en la tierra proporcionando humedad benéfica para el crecimiento de los cultivos.

Esto sucede en los terrenos adyacentes del paso del drenaje profundo y de los túneles de Tequixquiac, así como el Valle del Mezquital en Hidalgo.

La disposición por dilución consiste en descargar las aguas negras en aguas superficiales como en un río, lago o mar. El grado de contaminación depende de la dilución o del volumen de aguas negras y su composición en comparación con el volumen de agua con la que se mezcla (HILLEBOE E., 2004)

## 2.7. La laguna de Zumpango

El lago de Zumpango constituyó uno de los tres lagos salados de la cuenca del Valle de México. A lo largo de la historia ha tenido diversos usos y destinos. Desde la época colonial este cuerpo de agua fue vaciado, convertido en laguna, con lo que se rompió la cuenca endorreica del Anáhuac para incluirlo en la Región Hidrológica del Pánuco.

Las lípidas aguas de Zumpango provenientes de los escurrimientos que forman los ríos de Las Avenidas, Cuautitlán y Tepetzotlán se transmutaron en un fétido cuerpo que recibe las aguas negras de la ciudad de México; a través del Emisor Poniente y el Drenaje Profundo y tienen como estación intermedia este lago, que entonces se convierte en un vaso regulador.

Zumpango ha sufrido continuas transformaciones, lago, laguna, terreno agrícola, área de asentamientos humanos y vaso regulador; pero su vocación de receptor de agua no ha cambiado, por lo que en este sitio ocurren frecuentes inundaciones.

El destino de vaso regulador ocurre a través de la modificación de sus límites y profundidad, donde desde la década de los ochenta se confinó a través de un bordo, a una superficie de 1865 has, con un perímetro de 18 km y una profundidad máxima de 7.5 m. Es alimentado sólo en la época de lluvias, a través del canal de Santo Tomás que se conecta con el Emisor Poniente. Cuando este emisor tiene demasías su contenido es derivado a través de exclusas a lo largo del citado canal de Santo Tomás, para depositar el agua negra en lo que alguna vez fuera el lago de Zumpango. Esta agua era dedicada al riego de terrenos

agrícolas aledaños, lo que a partir del 2003 ya no ocurre, porque se cerraron las bombas que lo desaguaban.

Actualmente este vaso regulador no tiene salida de agua, por lo que retoma su carácter de lago y desde el 2003 fue dragado, limpiado y declarado "santuario del agua" (Gobierno del Estado de México, 2003), por lo que únicamente la entrada de agua ocurre en la época de lluvias desde el Emisor Poniente. Las lluvias diluyen los contaminantes y durante el estiaje se cierran las compuertas para evitar que entren los contaminantes altamente concentrados. Así mismo el sitio está protegido de la explotación del agua como recurso agrícola.

En la evolución del lago de Zumpango se observa el cambio de nivel que ha sufrido el terreno. El borde de los lagos desde se consideraba sobre la cota máxima de agua en la curva de nivel 2240 msnm, que describía la forma de los cinco lagos de la cuenca de México (ESPINOZA, El Embrujado del Lago. El sistema lacustre de la cuenca de México en la cosmovisión mexicana, 1996). A partir de los estudios realizados por Christine Niederberger sobre los mapas del Estado Mayor del Ejército Mexicano referentes a la cuenca de México en 1950, la curva 2240 msnm pasaba al sur de Xaltocán, dejando fuera a los lagos Zumpango y Xaltocán, lo que se explica debido a la explotación del acuífero en el centro de la cuenca, que provoca hundimientos. Esta observación se hace patente en el nivel original de la columna de independencia construida en 1910 a nivel de piso y que actualmente para resolver la diferencia de altura entre el piso y la base del monumento ha sido necesario construir una escalinata. Esta pérdida de altura también se marca en el predio que ocupa la catedral. Hacia 1975, 25 años después, de los estudios mencionados, el mapa topográfico de CETENAL ubica la curva 2240 msnm otra vez al norte de Zumpango (NIEDERBERGER BETTON, 1987).

La recuperación del nivel que incluye otra vez al lago de Zumpango se debe al crecimiento habitacional ocurrida a partir de la década de los sesentas con la ineludible extracción de agua a partir de los mantos de esta región para el sostenimiento de la población; que culmina en los hundimientos de la región de Zumpango que conlleva a la nivelación con lo ocurrido en toda la cuenca de México.

En esta evolución del lago de Zumpango, de acuerdo con el planteamiento de Niederberger, Zumpango y Xaltocán, considerados los lagos del norte, deben de dibujarse claramente separados del lago de Texcoco a partir de esas modificaciones. **(Ver imagen 18).**

## SECUENCIA DEL DESARROLLO DE LOS LAGOS

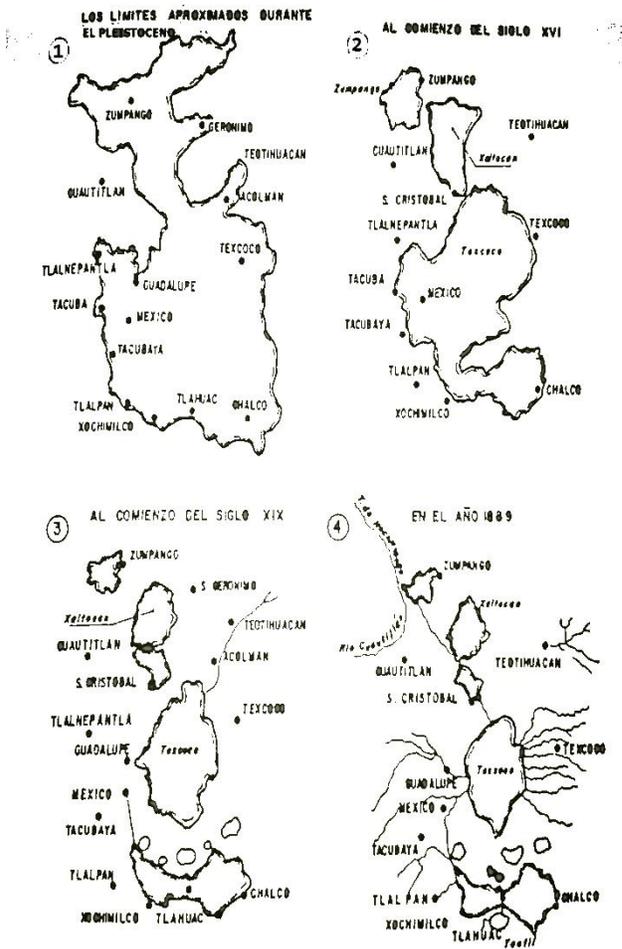


Imagen 18 Secuencia evolutiva de los lagos según Elizabeth Schilling Kiel (citado en Niederberger)

# CAPITULO 3

## CARACTERIZACIÓN DE UN LAGO

### 3.1 Diferenciación entre lago y laguna

Para los fines de esta tesis y del análisis del lago de Zumpango, la palabra lago se refiere a una extensión grande y profunda de agua que no tiene salida y que es el destino final de una cuenca endorreica. En contraste la laguna es un cuerpo menor de agua, con menor profundidad y que presenta entradas y salidas de agua. La diferenciación entre estos dos cuerpos de agua tiene como base distintos parámetros de acuerdo con la óptica de la disciplina que se esté analizando. (Bibliografía Lugo y Aguiló)

Un lago desde el punto de vista ecológico se considera una masa de agua que alcanza una profundidad mínima suficiente para el establecimiento de una estratificación termoclinal (MARGALEF L. , 1983).

En la evolución de Zumpango observamos que el cuerpo de agua pasó de ser destino final de la cuenca endorreica del Anáhuac, a ser parte del sistema de la cuenca exorreica del Pánuco y que, actualmente sólo tiene entradas de agua y ya, ninguna salida. Aunque su extensión disminuyó apreciablemente (SANTOYO VILLA, OVANDO SHELLEY, MOOSER, & LEÓN PLATA, 2005), lo consideramos como el relictos del histórico Lago de Zumpango y que es el motivo de la nominación de Santuario del Agua; aunque la cuenca de México, a partir de la desecación de los lagos, jamás volverá a ver el gran lago del Anáhuac, por lo que el lago de Zumpango quedo separado de la parte sur del gran cuerpo de agua.

### 3.2 Elementos de limnología.

Los sistemas acuáticos continentales como lagos o lagunas, presentan características ecológicas similares, por ejemplo, todos están determinados por las dimensiones, forma, topografía, y la cantidad de agua que se deposita en ella, así como la existencia de una **cuenca colectora** (HENRY J., 1999), la cual, por sus características topográficas y físicas mantiene en constante alimentación al cuerpo de agua. Las partes adyacentes no siempre se encuentran inundadas, sin embargo están definidas por su forma o vegetación que presentan.

El estudio de las características físicas, químicas y biológicas de ríos, lagos y lagunas se le conoce como **limnología**. (HENRY J., 1999).

### 3.3 Estratificación de los lagos.

La vegetación y la fauna en general de un lago o laguna también está clasificada con la cantidad de luz y calor que recibe, sucediendo principalmente en lagos profundos, donde el agua presente en la superficie tiende a calentarse más rápido que la de abajo, creando una estratificación termal.

La capa superficial más cálida se llama *Epilimnio*, y la capa inferior más fría se le conoce como *Hipolimnio*, entre ambas se encuentra una capa de transición llamada *Metalimnio*; donde la temperatura cambia drásticamente en pocos metros de altura. **(Ver Imagen 19).**

La estratificación térmica influye directamente en los procesos de un lago, los lagos de zonas templadas se estratifican térmicamente durante el invierno y el verano, mientras que circulan en primavera y otoño (HENRY J., 1999), es decir las aguas superficiales y profundas empiezan a mezclarse en estas estaciones favoreciéndose de elementos del clima como el viento, mientras que en verano e invierno permanecen estratificados por la diferencia térmica.

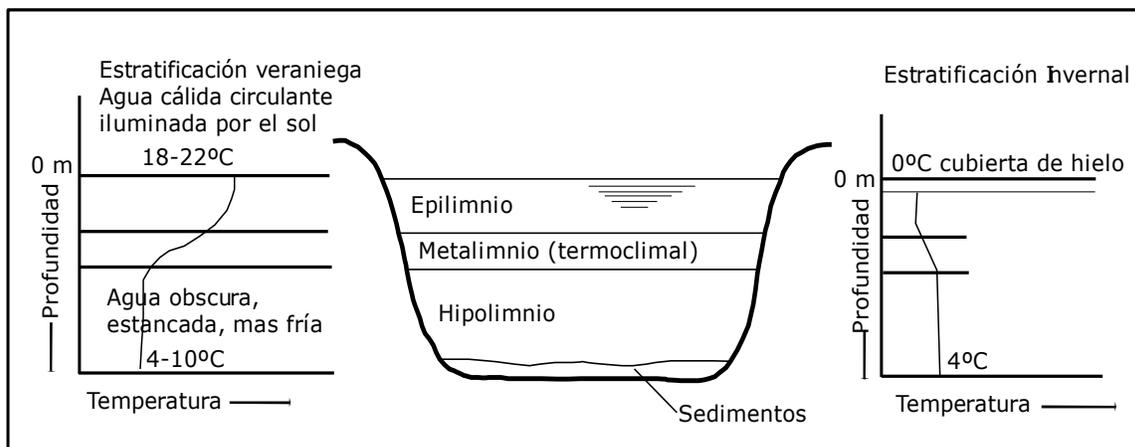


Imagen 19. Estratificación térmica de un lago profundo (HENRY J., 1999)

### 3.4 Vegetación

La vegetación en un lago y sus zonas adyacentes están determinadas por características muy particulares que se presentan en el cuerpo de agua, como las áreas de inundación, profundidad y temperatura. Estas características zonifican el cuerpo de agua, creando espacios de valor particular diferentes entre sí; y que son importantes a considerar en el diseño de paisaje.

Lo que diferencia este tipo de especies, no solo se encuentra en su forma física, sino en sus características, fisiológicas, biológicas que las llevo a adaptarse a un área determinada, así como su adaptación a las épocas más adversas. Cada especie vegetal tiene una capacidad de adaptación para la supervivencia en dichas

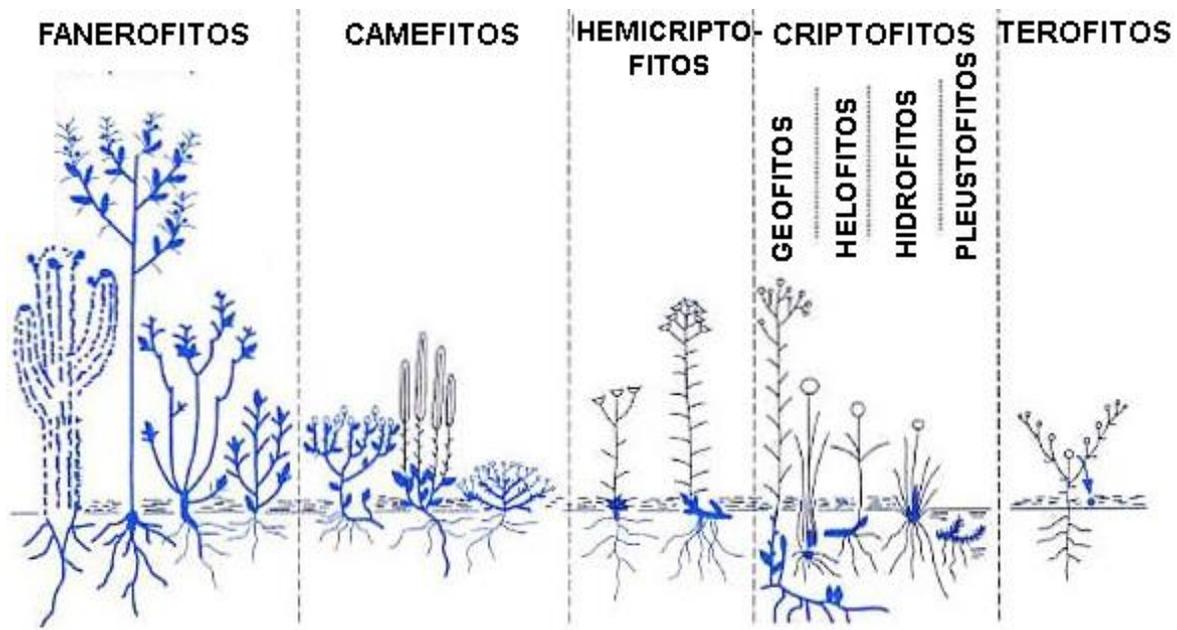
épocas y gracias a estas características se pueden generar asociaciones en cada región. A esta clasificación se le denomina formas de vida.

### 3.4.1 Formas de vida en las plantas

La clasificación de formas de vida más aceptada a nivel mundial es la desarrollada por Raunkiaer, (**Ver Imagen 20**) que se basa en las adaptaciones que tiene cada individuo para resistir la época adversa (LÓPEZ DE JUAMBELZ R. , 2008)

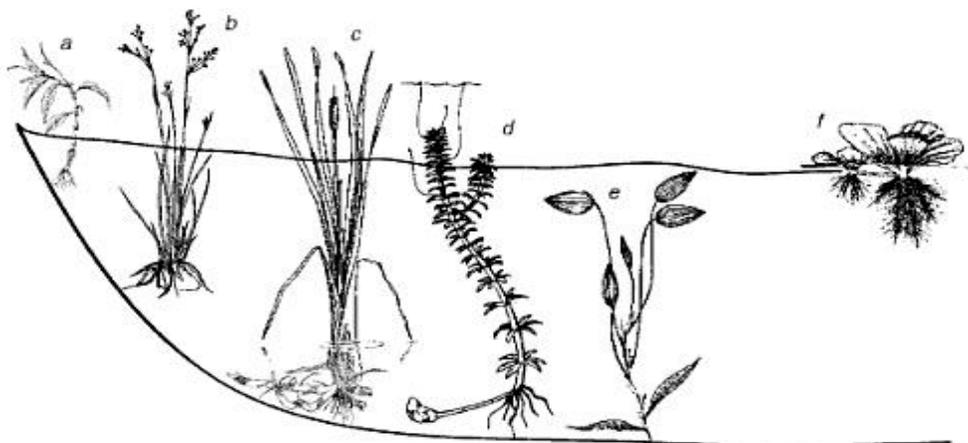
La clasificación consiste en:

1. **Fanerofitos:** Árboles y arbustos cuyas yemas sobrevivientes se elevan en el aire más o menos a 25 cm por encima del suelo, conservan los tallos íntegros y por eso están desprotegidas y expuestas a heladas y sequía.
2. **Camefitos:** Sus yemas se hallan apenas por encima del suelo (20-50 cm) y están protegidas contra el frío invernal por mantos de nieve que cae con regularidad. Entre estos, los matorrales enanos siempre verdes y verdes en verano.
3. **Hemicriptofitos:** Vegetales cuyos órganos por arriba del nivel del suelo desaparecen. Los brotes superficiales perecen o se conservan sólo parcialmente.
4. **Criptofitos:** Se retraen durante las temporadas desfavorables. Las yemas perennes se hallan a cierta profundidad en el **suelo (geófitos), en los suelos húmedos o debajo del agua (halofitas) y dentro del agua (hidrofitos)**. Los órganos subterráneos sirven para acumular materias de reserva. Por ese motivo los criptofitos son capaces de sobrellevar fases prolongadas de sequía y crecen en todas las regiones áridas.
5. **Terofitos o especies anuales.** Estas plantas mueren cuando las condiciones climáticas de las temporadas son extremas y perduran como semillas. Ellas inician su ciclo cada año con la desventaja de que han de desarrollarse siempre de nuevo y por eso necesitan mucho tiempo para que funcione su sistema vegetativo y retoñen hasta florecer y dar frutos. En las regiones frías —en donde el crecimiento de la vegetación está inhibido de todos modos— este proceso se efectúa con suma lentitud. Esta estrategia es útil sobre todo en regiones áridas en donde las plantas crecen la mayoría de las veces sin necesidad de competir con otras. (BORS DORF, 2012)



**Imagen 20. Formas de vida por Raunkiaer modificado a partir de (BORSDORF, 2012)**

Las plantas que se desarrollan en el ecosistema húmedo se encuentran en la categoría de los *criptofitas*, que se caracterizan por tener un periodo de latencia o retracción en las temporadas adversas, almacenando todos los nutrientes y energía en algún órgano subterráneo, se dividen en geofitas e hidrofitas. Las geofitas son de hábito terrestre. Las hidrofitas se componen de dos grupos, helofitas y pleustofitas. Las helofitas presentan sus órganos subterráneos inmersos en suelos fangosos, y se dividen en marginales y emergentes. Las marginales tienen sus órganos subterráneos a  $\pm 10$  cm de la superficie del agua y el resto del cuerpo es aéreo. Las emergentes enraízan a más de 10 cm y sus hojas alcanzan la superficie. Las Pleustofitas, son plantas errantes que se distribuyen por la superficie del cuerpo de agua y se conocen como flotantes. **(Ver Imagen 21).**



**Imagen 21** Perfil de un lago donde se muestran algunas plantas acuáticas de acuerdo con el hábitat. *a, b, y c*, emergentes; *d y e*, sumergidas; *f*, flotantes.

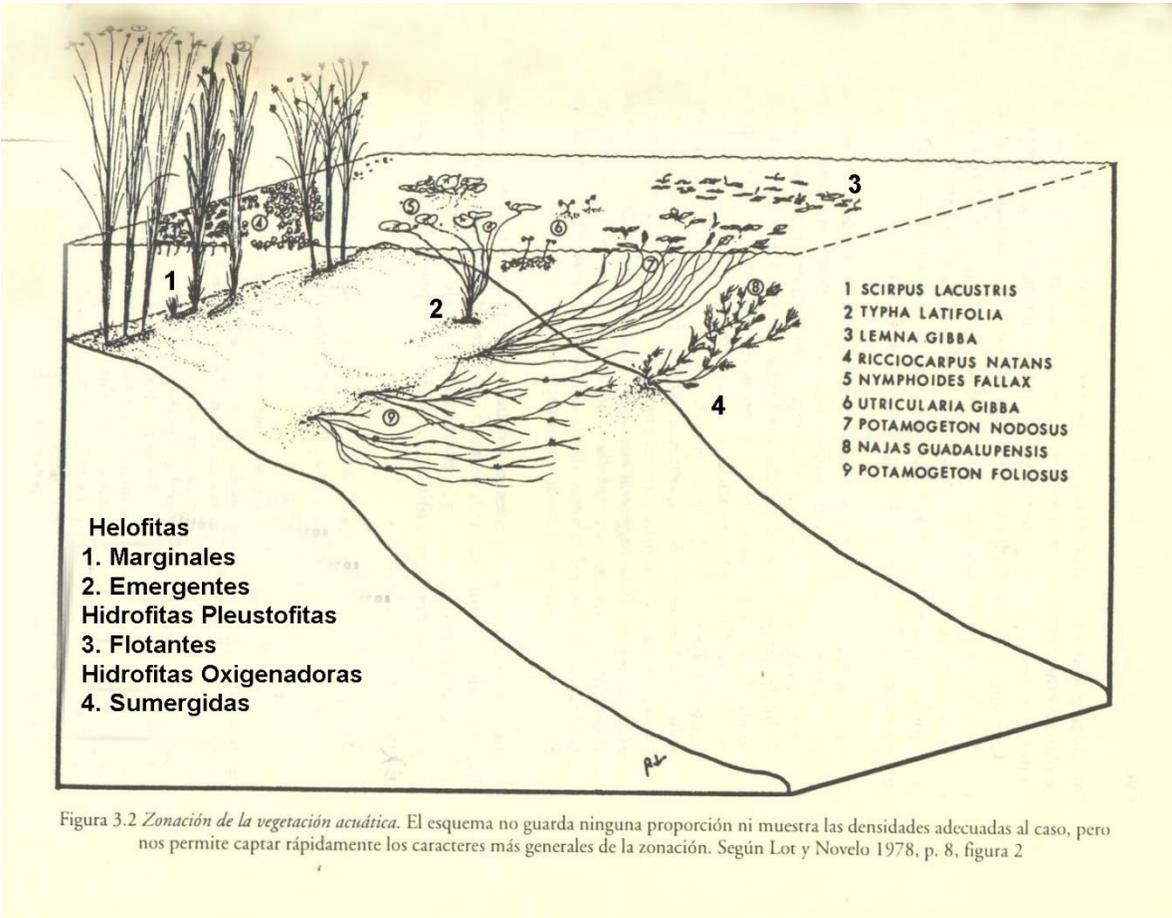
### 3.4.2 Distribución de las Hidrófitas en un cuerpo de agua

Tomando en cuenta las características estratigráficas y de vegetación en un cuerpo de agua, se puede clasificar la vegetación dentro de un cuerpo de agua de la siguiente manera: **(Ver Imagen 22)**. Son las encargadas de proveer el equilibrio al ecosistema, absorbiendo el nitrógeno amoniacal de la fauna acuática. Las plantas acuáticas de acuerdo a su forma de vida y el lugar que ocupan dentro del ecosistema se dividen en:

**Helofitas:** referidas a las plantas que se establecen en las márgenes y que también se conocen como vegetación **marginal**, se encuentran en las orillas de los lagos y están enraizadas al sustrato, el agua se encuentra a un nivel de  $\pm 10$  cm. de la superficie del cuerpo de agua

**Hidrofitas:** El nombre genérico de hidrofita se aplica específicamente a las plantas de hábito emergente, que son aquellas plantas que enraizan en el sustrato y sus hojas y flores emergen la superficie del agua; estas se desarrollan desde 40 hasta 150 cm. (LÓPEZ DE JUAMBELZ R. y., 2009). Otra forma de expresión de estas hidrofitas son las **sumergidas**, referido a las plantas que enraízan en el sustrato pero todas sus partes quedan cubiertas por el agua, en algunos casos solo las flores emergen. (MARGALEF R. , 1974).

**Pleustofitas.** Se refiere a las plantas de hábito flotante cuya raíz no está fija al sustrato y se mueven libremente en la superficie del cuerpo de agua. (LÓPEZ DE JUAMBELZ R. y., 2009)



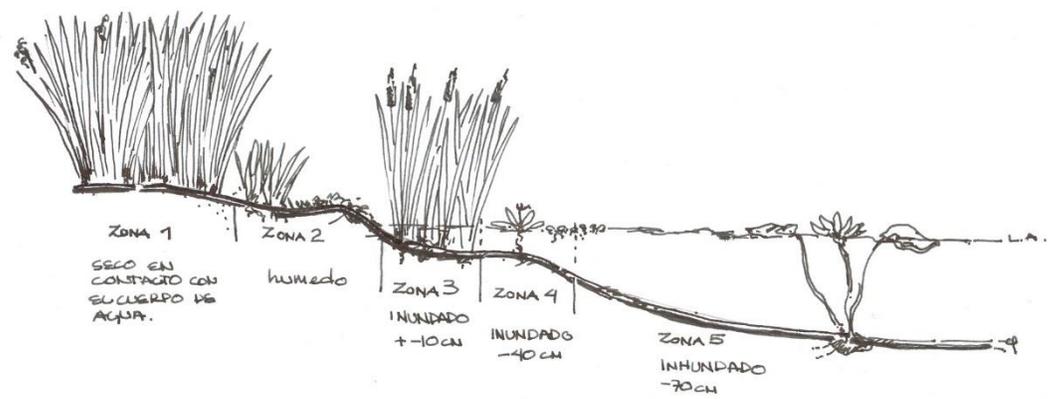
**Imagen 22. Distribución de vegetación acuática en un cuerpo de agua**

Las características que presenta un cuerpo de agua son fundamentales para el desarrollo y la distribución de la vegetación que se presenta. La batimetría como lo mencionamos es la topografía de un cuerpo de agua nos muestra que existen formas y estructuras del suelo, como taludes, terrazas y variantes en el fondo que favorecen el desarrollo de distintos tipos de Hidrófitas.

El establecimiento de la vegetación en los cuerpos de agua marca las zonas que por sus características físicas y químicas permiten la distribución de plantas de acuerdo con su adaptación. Tomando en cuenta dichos factores se pueden establecer cinco zonas: (LÓPEZ DE JUAMBELZ R. y., 2009) **(Ver imagen 23)**

- Zona 1: (Eupralitoral) Referente a la orilla externa del cuerpo, conformada por suelo sin contacto con el agua. En esta zona se presentan árboles cercanos a los cuerpos de agua como el ahuehuete (*Toxodium mucronatum*), y Sacuces, (*Salix babilonica*) principalmente.
- Zona 2: (Eulitoral) Aquí comienza el área del humedal, cuyo suelo está permanentemente húmedo pero no inundado. Se pueden establecer plantas de pradera húmeda donde crecen diversos tipos de gramíneas, como el arroz (*Oryza sativa*).

- Zona 3: (Infralitoral superior) Corresponde al pantano húmedo. El nivel del agua está 10 cm. por arriba de la superficie del suelo. La vegetación la conforman plantas marginales, y los tallos y hojas sobrepasan la superficie de agua, formando praderas flotantes.
- Zona 4: (Infralitoral medio). Es el área de agua somera, cuyo nivel pertenece entre 10 y 40 cm. Aquí empieza la zona de plantas emergentes y flotantes pequeñas, como los nenúfares enanos (*Nymphaea* sp).
- Zona 5: (Infralitoral inferior). Área de agua profunda cuyo nivel rebasa los 70cm. Ahí encontramos plantas flotantes o emergentes. Las primeras, no necesitan suelo por lo que sus raíces son errantes como el lirio acuático (*Echhornia crassipens*) o la lenteja (*Lemna minor*). Las segundas tienen raíces fijas al sustrato, como por ejemplo los nenúfares (*N. odorata*) (LÓPEZ DE JUAMBELZ R. y., 2009)



**Imagen 23. Zonificación de la vegetación en un cuerpo de agua (LÓPEZ DE JUAMBELZ R. y., 2009)**

La zonificación de la vegetación permite establecer el patrón que regirá el proyecto de restauración ecológica del lago de Zumpango tras el nombramiento de “Santuario del Agua”, que adquirió en el año de 2003 por el Gobierno del Estado de México.

El lago de Zumpango actualmente recibe el suministro de agua servida del emisor Poniente, como se mencionó anteriormente, entonces la conservación del habitat natural requiere mejorar las características físicas y químicas del agua, por lo que es indispensable utilizar técnicas de fiterremediación que permitan a si mismo recuperar el nicho de diversas aves y especies vegetales asociadas al agua.

# CAPITULO 4

## FITORREMEDIACIÓN

### 4.1 Definición

La palabra fitorremediación se compone de dos palabras, *fito*, *ta*, de origen griego que significa planta y remediar, del latín *remediare*, que significa corregir un daño establecido. Por lo que definimos la fitorremediación como la capacidad de corregir un daño, en este caso ambiental, a través de la vegetación. Un daño ambiental, tanto en el agua como en el suelo, puede ser remediado a través de la vegetación mediante los procesos bioquímicos que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización, y estabilización de diversos tipos de contaminantes. (NUÑEZ LÓPEZ, 2004)

### 4.2. Tipos de fitorremediación

La vegetación, a través de su estructura, establece condiciones particulares asociadas entre el contaminante y el elemento a tratar: agua o suelo, generando diferentes tipos de fitorremediación (NUÑEZ LÓPEZ, 2004) que a continuación analizamos:

- Fitodegradación o fitotransformación. Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y a su vez degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos. (MENTABERRY, 2011)
- Fitoestimulación. Consiste en el uso de las sustancias secretadas por las raíces para promover el desarrollo de microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos (NUÑEZ LÓPEZ, 2004)
- Fitovolatilización. Las plantas absorben, metabolizan y transportan desde sus raíces hasta las partes exteriores, liberándolos a la atmosfera en formas volátiles menos tóxicas. (NUÑEZ LÓPEZ, 2004)
- Fitoestabilización. Las plantas tolerantes a metales y con un sistema de denso de raíces, son utilizadas para reducir la movilidad de los mismos mediante mecanismos de secuestro, lignificación o humidificación. Los metales se fijan enérgicamente en las raíces de dichas plantas, evitando su migración vertical hacia mantos freáticos. (NUÑEZ LÓPEZ, 2004)
- Fitoextracción o fitoacumulación. Consiste en aprovechar las capacidades de las plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos, o follaje, las cuales, pueden ser cosechadas fácilmente. (NUÑEZ LÓPEZ, 2004)

- Rizofiltración. Se basa en hacer crecer en cultivos hidropónicos raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber y concentrar metales pesados de aguas residuales. (NUÑEZ LÓPEZ, 2004).

Los diferentes métodos de fitorremediación tienen en común el aprovechamiento de propiedades de las plantas para reducir, acumular, volatilizar, y filtrar contaminantes existentes en las aguas residuales contaminadas. Para mantener la salud ecológica del lago de Zumpango, estas técnicas pueden ser utilizadas, reintroduciendo la vegetación acuática que se encontraba anteriormente dándole el carácter de lago nuevamente. Muchas de las plantas acuáticas que se encontraban en el lago tienen características que les permiten participar en técnicas de fitorremediación.

### **4.3 Humedales de fitorremediación**

La fitorremediación en cuerpos de agua toma como base la estructura de un humedal, que consiste en estanques impermeabilizados que impiden que el agua y los contaminantes disueltos se filtren, provocando un flujo laminar. En los humedales podemos identificar tres zonas: el acceso del agua, la estancia en las plantas y la salida, lo que conduce a la conformación de un flujo de agua, obligando al agua a pasar a través de las plantas, esto genera una reducción de los contaminantes presentes en las aguas residuales por las diferentes formas de actuación de las plantas.

De acuerdo a la forma de vida se establecen diferentes tipos de humedales:

- Humedales de hidrofítas flotantes.
- Humedales de hidrofítas sumergidas.
- Humedales de hidrofítas emergentes.
- Humedales de hidrofítas marginales.

PARTE DE LA PLANTA	FUNCIÓN
Raíces o tallos sumergidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sustrato para el crecimiento bacteriano</li> <li>- Medio para la filtración y adsorción de sólidos.</li> <li>- Bioabsorción y acumulación de contaminantes</li> </ul>
Tallos u hojas emergentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Atenúan la luz del sol y pueden evitar el crecimiento de algas suspendidas.</li> <li>- Reducen los efectos del viento sobre el agua.</li> <li>- Reducen transferencia de gases y calor entre la atmosfera y el agua.</li> <li>- Transfieren oxígeno desde las hojas a la raíz.</li> <li>- Transfieren y acumulan contaminantes.</li> </ul>

**Tabla 2. Función de las plantas acuáticas dentro de un humedal. (REDDY, 1987)**

El establecimiento de las diversas formas de vida de las hidrofitas para la fitorremediación, genera una inmensidad de posibilidades para crear espacios que otorguen carácter al lago.

### HUMEDALES DE HIDROFITAS FLOTANTES

Estos humedales se componen de vegetación flotante por lo que se mueven libremente, lo que obliga a que las áreas con este tratamiento, sean confinadas, ya que son plantas altamente invasivas y si no se manejan adecuadamente, especialmente en los cuerpos de agua naturales se corre el riesgo de la eutroficación en el propio cuerpo. El método de plantación se hace depositando los ejemplares en el cuerpo de agua.

### DETALLE CONSTRUCTIVO

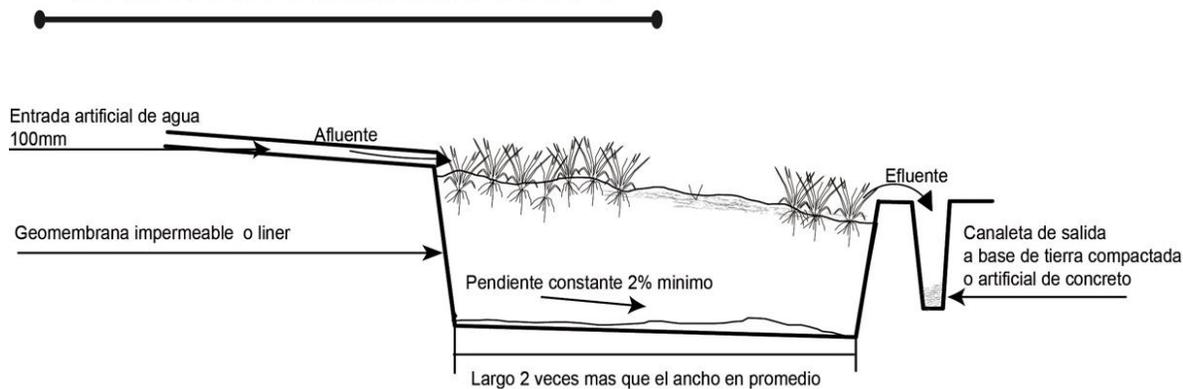




Imagen 24 Vista de un húmedal con hidrofítas flotantes



Imagen 25. Detalle del uso del tipo de vegetación del género *Eichhornia*



Imagen 26. Imagen del uso de humedales de hidrofítas flotantes en un caudal natural



Imagen 27. Acercamiento a la vegetación flotante en un humedal de hidrofítas flotantes

VEGETACIÓN QUE SE UTILIZA EN SISTEMAS DE HUMEDALES DE HIDROFITAS FLOTANTES				
FOTOGRAFÍA	GENERO Y ESPECIE	REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	PLANTACIÓN/PRODUCCIÓN	MÉTODOS DE CONTROL
	<i>Lemna gibba</i>	Reducción de DBO, SST, NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> Extracción: MP, Cd, Cu, Se, Ni, Pb.	Se introducen plantas individuales que se dispersan. Se introducen plantas individuales que se dispersan.	Dos métodos principales: 1 Mecánico, se rastrilla con maquinaria 2 Control biológico usando especies de animales acuáticos.
	<i>Riciocarpus natans</i>	Reducción de PO <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> , DBO, SST,	Ambas comparten hábitat. Su principal condicionante es la temperatura, de 20° a 30°C	Remoción mecánica
	<i>Eichhornia crassipes</i>	Para tratamiento secundario o terciario. Remoción: NO <sub>3</sub> y PO <sub>4</sub>		

## HUMEDALES DE HIDROFITAS EMERGENTES

Los humedales que se componen de vegetación emergente son más vistosos, debido a su floración y cobertura. Naturalmente son las zonas de amortiguamiento entre las marginales y el cuerpo de agua

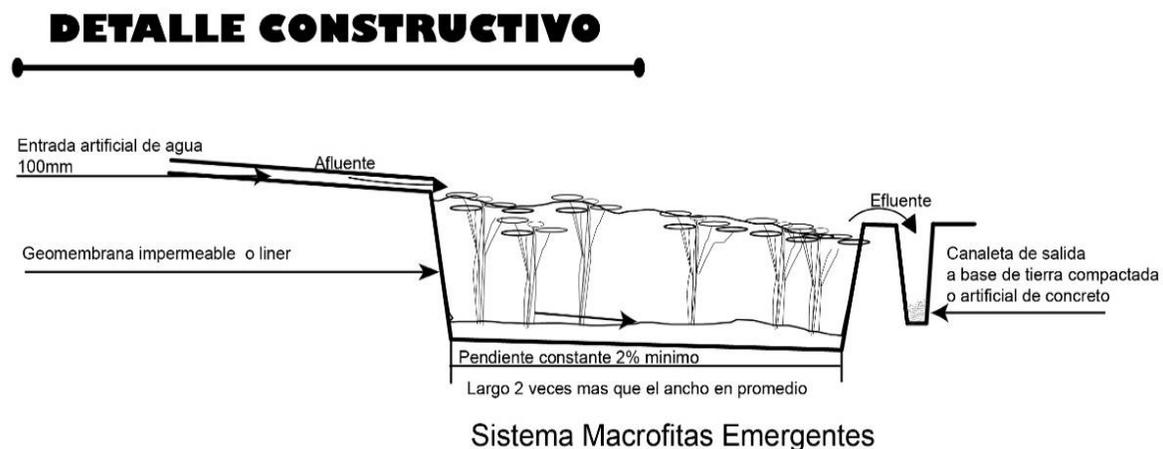


Imagen 28 Vista de un humedal con hidrofítas emergentes



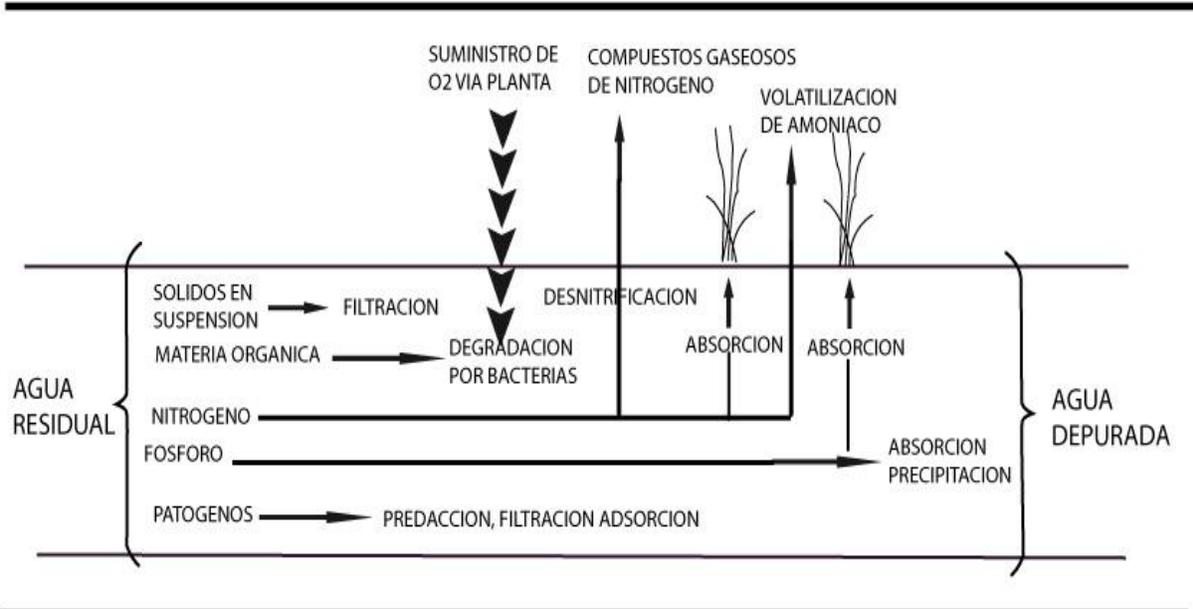
Imagen 29. Detalle del uso del tipo de vegetación del género *Nymphaea*

VEGETACIÓN QUE SE UTILIZA EN SISTEMAS DE HUMEDALES DE HIDROFITAS EMERGENTES				
FOTOGRAFÍA	GENERO Y ESPECIE	REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	PLANTACIÓN/ PRODUCCIÓN	MÉTODOS DE CONTROL
	<i>Nymphaea mexicana</i>	Reducción de Nitrógeno, Estabilización de la materia orgánica	Se hace la plantación en una mezcla de suelo franca, con una cubierta de rocas, para reproducirse, se hace por método vegetativo	Remoción mecánica
	<i>Nymphoides falax</i>	Reducción de Nitrógeno, Estabilización de la materia orgánica		
	<i>Potamogeton nodosus</i>	Desnitrificación y reducción de Fosforo		

### HUMEDALES DE HIDROFITAS MARGINALES

Los humedales marginales son los más efectivos y utilizados en el proceso de fitorremediación. Los humedales de hidrofítas flotantes y emergentes son utilizados como auxiliares de este proceso y se utilizan principalmente por las capacidades de fitodegradación, fitovolatilización y fitoextracción de esas plantas. El sistema constructivo de estos dos últimos humedales son similares y sencillos, el flujo del agua transita libremente entre las plantas, generan un ambiente similar a un humedal natural y visualmente generan un espacio característico de un lago.

Los humedales de hidrofítas marginales han sido mejorados y están especializados conforme al flujo del agua, que induce que esta pase por partes específicas de la planta. Se ha estimado el rendimiento y efectividad de estos humedales en el proceso de remediación. Este tipo de humedal puede tratar satisfactoriamente altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS), nitrógeno, metales pesados y coliformes.



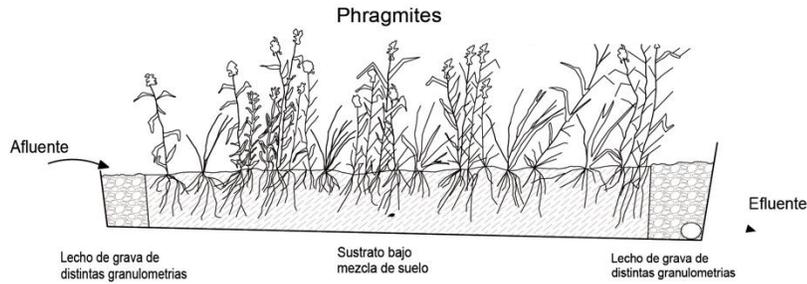
**Imagen 38. Principales procesos de remediación que se llevan a cabo en un humedal. (LARA BORRERO, 1998)**

Los humedales marginales se dividen en dos grupos:

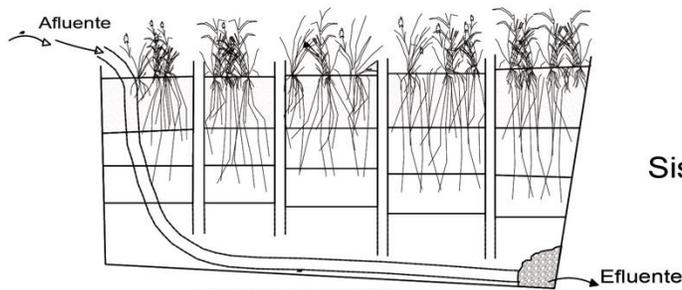
Humedales de flujo libre (FWS) el flujo del agua corre libremente a través de los tallos de las plantas.

Humedales de flujo subsuperficial (SFS) en este sistema el flujo del agua pasa a través del sustrato, diseñado con material pétreo de diversos diámetros fluyendo por raíces y tallos.

## DETALLE CONSTRUCTIVO



Sistemas HFS, RBT O SFS



Sistemas FWS

1. Tubos de aireación del estrato 5
2. Estrato de arena
3. Estrato de grava de diametro 6 mm
4. Estrato de grava de diametro 12 mm
5. Estrato de grava entre 30mm y 60mm
6. Tubo perforado

SFS	FWS
<p>Imagen 30. Vista de un húmedal de flujo subsuperficial</p>	<p>Imagen 31. Vista de un húmedal de flujo libre</p>
<p>Imagen 32. Imagen de un húmedal de flujo subsuperficial. Se observa la arena depositada para crear el flujo</p>	<p>Imagen 33. Acercamiento a la vegetación plantada en un húmedal de flujo libre</p>

<p><b>Imagen 34. Corte longitudinal de un humedal de flujo subsuperficial</b></p>	<p><b>Imagen 35. Imagen de un sistema de humedales de flujo libre con vegetación de género <i>Typha</i></b></p>
<p><b>Imagen 36. Vista de la construcción artificial de un humedal de flujo subsuperficial, con elementos artificiales</b></p>	<p><b>Imagen 37. Vista de un humedal natural, cubierto de vegetación marginal.</b></p>

VEGETACIÓN QUE SE UTILIZA EN SISTEMAS DE HUMEDALES DE HIDROFITAS MARGINALES				
FOTOGRAFÍA	GENERO Y ESPECIE	REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	CANTIDAD	PLANTACIÓN/PRODUCCIÓN
	<i>Scirpus lacustris</i>	Remoción de DBO Remoción de SS Remoción de N Remoción de P Remoción de metales Remoción de coliformes fecales	DBO=112.7mg/l SST=53.3mg/l NH3=23.5mg/l	Camas de flujo superficial, subsuperficial, sembrando a una distancia considerable. Suelen ser invasivas. Sus métodos de control son mecánicos y manuales
	<i>Typha latifolia</i> <i>Typha angustifolia</i> <i>Typha domingensis</i>		DBO=87.6mg/l SST=51.5mg/l NH3=7.3mg/l	
	<i>Phragmites australis</i>		DBO=95.7mg/l SST=49.1mg/l NH3=19.6mg/l	

**Sistema de flujo subsuperficial.**

Este sistema se denomina por sus siglas en inglés SFS *subsurface flow wetland*. Los humedales de flujo subsuperficial, están contruidos a base de una capa de grava y arena, donde se plantan hidrofitas marginales. Su característica principal es que el nivel del agua se mantiene 5 cm por debajo del lecho, protegiéndolo de plagas naturales, crecimiento de algas y malos olores (REED, 1993).

Su construcción se basa en una capa impermeable que contenga al humedal, ya sea un geomembrana o arcilla natural. Para el filtro se utiliza grava redonda que va de 3 a 32 mm de diámetro con una profundidad de 0.5 a 1 m (REED, 1993).

La capacidad de eliminación de contaminantes del humedal depende de la superficie y profundidad, lo que determina la cantidad de flujo a tratar. La grava utilizada actúa como medio filtrante, así como base para la vegetación, las plantas mediante procesos de rizofiltración y fitoestabilización permiten mantener la permeabilidad del filtro. (POH-ENG, 1998)

Sistema de flujo subsuperficial (SFS) este sistema se divide de acuerdo a la localización del flujo:

- Sistema de flujo superficial horizontal (FWS)
- Sistema de flujo superficial vertical

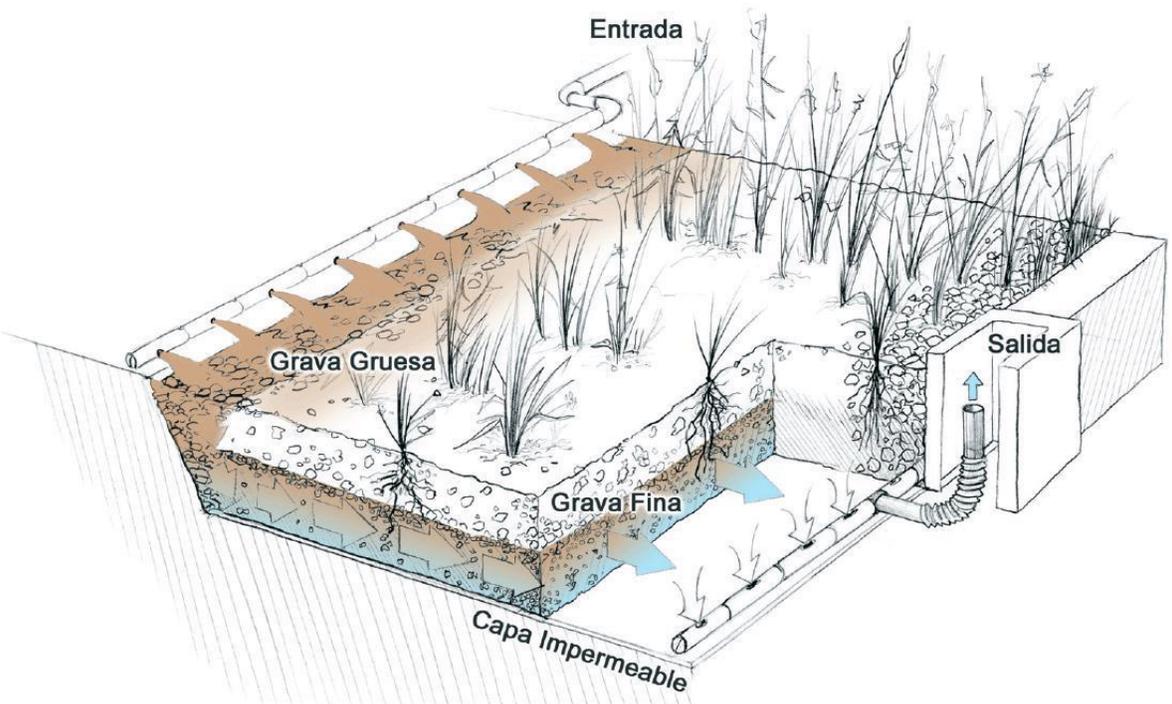


Imagen 39. Esquema general de un humedal de flujo horizontal subsuperficial SFW (FUENTES BELTRAN, s.f.)

### Sistema de flujo superficial horizontal

También llamados sistemas de flujo libre por sus siglas en inglés FWS *free water surface* se le conoce como los humedales de flujo libre, similares a los que utilizan hidrofitas emergentes o flotantes, imitan los procesos naturales de un humedal natural. Al fluir el agua libremente, expuesta al sol y al aire las partículas se sedimentan, eliminando los nutrientes sujetos a ellas, para que las plantas los utilicen.

De igual manera que los humedales de flujo subsuperficial son construidos con una capa impermeabilizante que lo contiene, las plantas se fijan al sustrato sin ningún filtro o capa y el agua tiene un nivel superior a la base plantación. Utilizando procesos como la fitoacumulación permiten que la planta acumule contaminantes en sus raíces y tallos para que posteriormente puedan ser removidas y sustituirlas por otras plantas.

Por sus características naturales y sin un modelo de construcción muy específico pueden integrarse fácilmente a contextos naturales, generando visuales características de un ecosistema lacustre (QLD, 2000)

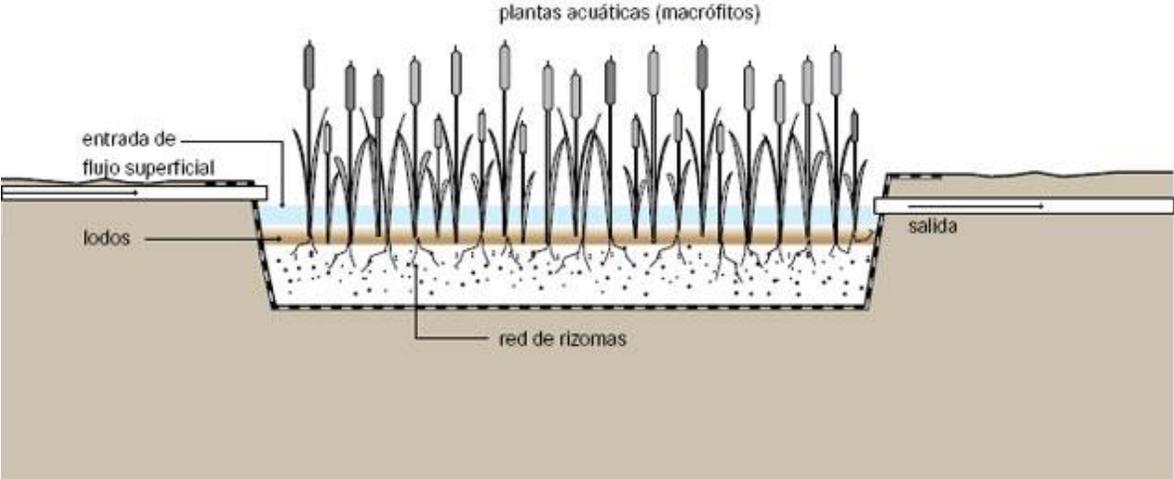


Imagen 40. Humedales de flujo libre, esquema general (FUENTES BELTRAN, s.f.)

### Sistema de flujo superficial vertical

En este tipo de humedales el agua se vierte a través de una red afluyente en toda su superficie y circula verticalmente atravesando el filtro poroso que contiene la vegetación. Similar al humedal de flujo subsuperficial, está construido con un sustrato granulométrico, adicionalmente, cuenta con una red de drenaje que colecta el agua ya filtrada que se oxigena con una serie de chimeneas.

Su construcción es más elaborada, puede construirse sobre el nivel del suelo o en excavaciones poco profundas, cada humedal debe tener una capa impermeable y contar con un sistema efluente.

Estructuralmente el sustrato se establece en capas de gravas de distintos diámetros seguidas de arenas más finas para su adecuada filtración. La capa superior contiene la vegetación marginal con capacidad de producir raíces profundas y gruesas. (REED, 1993)

Por medio de procesos de fitoestimulación y rizofiltración las raíces alojadas en este filtro crean organismos capaces de reducir y absorber contaminantes, el agua fluye a través de las capas granulométricas que componen el sistema.

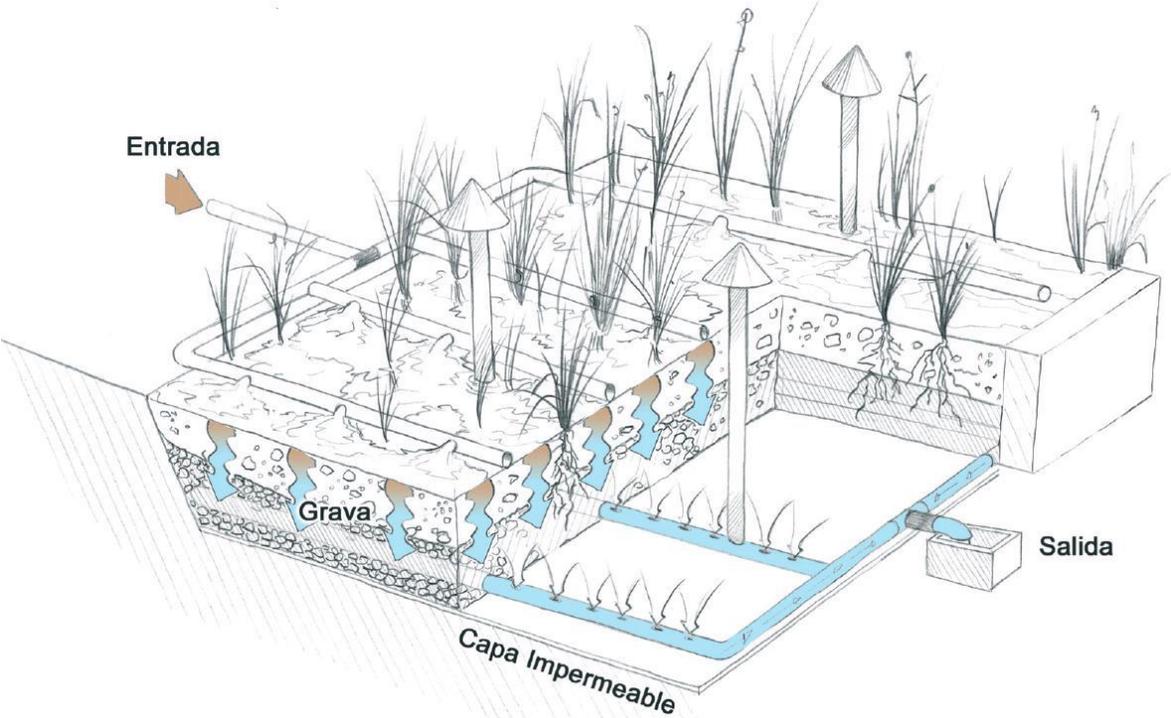


Imagen 41. Sistema de humedales de flujo vertical. (FUENTES BELTRAN, s.f.)

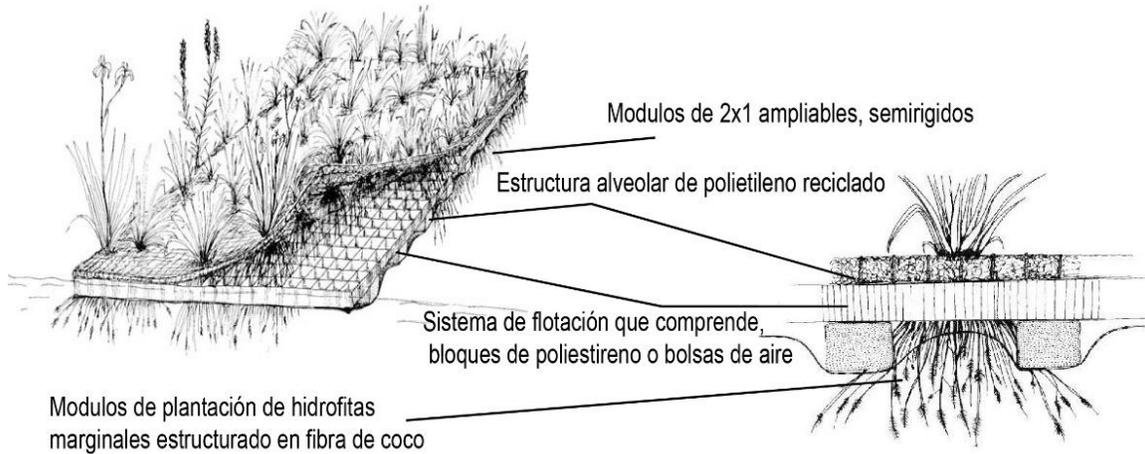
#### 4.4 Islas flotantes

Las islas flotantes son estructuras armables y transportables basadas en sistemas reticulares y con sistemas de flotación que permiten el establecimiento y zonificación de los lugares para el tratamiento.

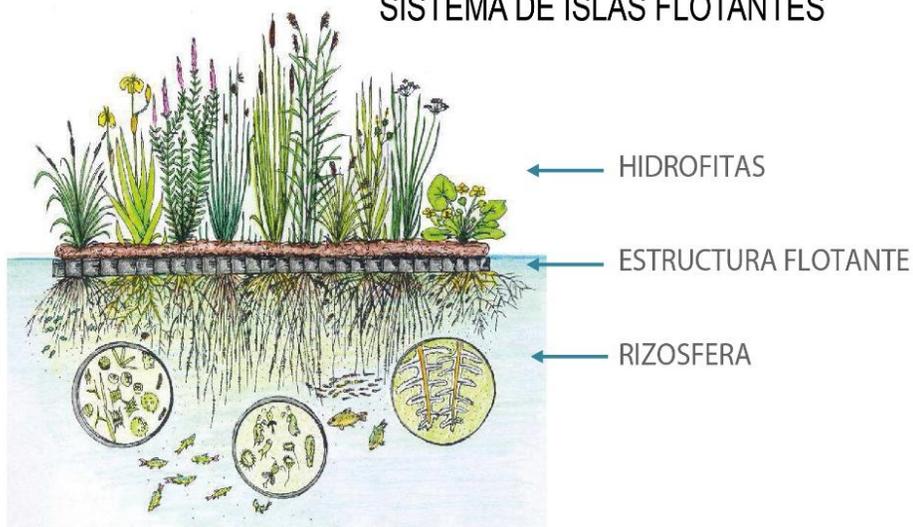
Estos sistemas también llamados balsas flotantes como su nombre lo indica, tienen la característica principal de que son fácilmente movibles y se pueden establecer directamente en el afluente que esta detectado como una fuente de contaminación. El sistema puede desplazarse con la dirección del caudal o por el contrario se puede anclar por medio de un gavión tubular estructurado con una red rellena de piedras.

Las islas flotantes utilizan el principio de la hidroponía. Plantas hidrofítas instaladas en una estructura flotante para desarrollar su raíz en el agua. Las islas flotantes proporcionan una reducción de la temperatura del agua y su producción de sombra no permite el desarrollo de algas

## DETALLE CONSTRUCTIVO



## SISTEMA DE ISLAS FLOTANTES



## VEGETACIÓN QUE SE UTILIZA EN SISTEMAS DE ISLAS FLOTANTES

FOTOGRAFÍA	GENERO Y ESPECIE	REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	PLANTACIÓN/ PRODUCCIÓN	MÉTODOS DE CONTROL
	<i>Juncus effusus</i>	Remoción de DBO Remoción de SS Remoción de N Remoción de P Remoción de Zinc Remoción de metales Remoción de coliformes fecales	Se realizan plantaciones en módulos de plantación de 10 pzas por alveolo	Remoción mecánica
	<i>Iris pseudacorus</i>			
	<i>Scirpus lacustris</i>			

Las islas flotantes generan un paisaje interesante por ser versátil, dinámico, generando visuales que se transforman en relación a la ubicación de las mismas. Su ventaja principal es que puede colocarse en cualquier parte del embalse, y desplazarse hacia zonas con mayor concentración de contaminantes.



Imagen 41. Visual de islas flotantes en época de otoño



Imagen 42. Visual de islas flotantes en época de primavera



Imagen 45 y 46. Visual de la instalación de Islas flotantes



Imagen 47 y 48. Visual de islas flotantes en un cuerpo de agua natural



Imagen 49 y 50. Vista de la instalación de islas flotantes en aguas profundas



Imagen 53 y 54. Vista del proceso de establecimiento de las islas flotantes



**Imagen 55 y 56. Vista del proceso de instalacion de las islas flotantes**



**Imagen 57 y 58. Vista de las islas flotante establecidas**

Las islas flotantes al igual que las técnicas de fitorremediación establecen criterios además de técnicos que nos ayudan a la remediación del agua; de diseño, de paisaje que rescatan características de los lagos que nos ayudan a generar el carácter.

En el caso del lago de Zumpango, las técnicas de fitorremediación generan espacios que reestablecen el lago perdido al haberse convertido en un vaso regulador. Los humedales de hidrofitas y las islas flotantes generan espacios que permiten la recuperación del paisaje y su carácter como lago.

Como métodos prácticos, pueden establecerse humedales de prueba para medir los resultados que se generan en cada caso.

Los sistemas seleccionados para el tratamiento del lago de Zumpango son los humedales de plantas emergentes y marginales en sus dos expresiones, así como las islas flotantes. Las técnicas de fitorremediación seleccionadas son las que tienen mayor tecnificación.

# CAPITULO 5

## DISEÑO ECOLÓGICO PARA LA REMEDIACIÓN DEL LAGO DE ZUMPANGO

### 5.1 Construcción de un humedal

Durante años, se ha dispuesto el agua dulce para nuestro consumo. Después de este consumo, el agua es contaminada, lo que hace difícil su retorno a la naturaleza. Hasta la actualidad son pocos los intentos por la recuperación y rehabilitación de este preciado líquido, utilizando técnicas caras y difíciles de sostener.

En la cuenca de México, la problemática actual es el acceso al agua limpia, y en lugar de trabajar la rehabilitación de ésta, se ha construido una infraestructura para sacarla de la cuenca, tanto el agua residual como el agua pluvial y es muy poco el líquido que puede ser inyectado al acuífero. El agua potable se obtiene a partir de los mantos acuíferos y la pérdida de ésta crea problemas de hundimientos y escases.

El agua superficial se encontraba en los lagos que fueron desecados, por lo que es indispensable abastecer a la cuenca con el agua traída de otros sistemas hidrológicos o de los pozos que extraen el contenido del acuífero. El lago de Zumpango es utilizado como vaso regulador que contiene los remanentes del sistema de drenaje y es un paso intermedio para deshacerse del líquido hacia el río Tula, convirtiendo así, la cuenca de Texcoco, originalmente endorreica, en un afluente más de la cuenca exorreica del Pánuco.

Los problemas que atrae la expulsión del agua de la cuenca de México no tienen políticas tendientes a la solución, que principalmente exige la retención de éste líquido dentro de la región; esto solo es posible a través de remediar, reutilizar y restituir el paisaje que dio identidad dentro del imaginario creado por la historia a México. El hermoso paisaje lacustre que conocieron los conquistadores ha sido reemplazado por una mancha urbana impermeable. Estas razones son las que sustentan la propuesta de utilizar a los humedales en el proceso de remediación, donde la acción de limpieza vuelve a quedar en responsabilidad de la naturaleza, mediante el proceso de fitorremediación, lo que permite generar agua limpia, que conlleva a la recuperación de ese histórico paisaje lacustre.

El hoy vaso regulador de Zumpango, pequeño remanente de lo que fue el lago de Zumpango, presenta condiciones que permite aplicar técnicas de fitorremediación para crear humedales. La entrada del agua se establece en el canal de Santo Tomás; que es el afluente conectado al drenaje que dispersa en Zumpango los contaminantes.

La corriente de ingreso al vaso regulador permite el establecimiento del humedal, como mecanismo para la fitorremediación, ya que la profundidad se incrementa del ingreso hacia el cuerpo de agua y esto permite la creación de un sistema de humedales con tres subsistemas.

La distribución de los subsistemas en el lago de Zumpango responde precisamente a la profundidad batimétrica del cuerpo de agua.

La zona de entrada del agua con una profundidad de 1.5m permite establecer un sistema de humedales de flujo vertical y con hydrofitas marginales. Corresponden a 4 humedales con una medida de 50m de ancho por 100m de largo, y una profundidad media de 1.5 a 2.m, construidos a través de un sistema de diques que contienen estos humedales que son alimentados por una red de acueductos que distribuyen el agua por todo el humedal y la cual fluye a través de los filtros y desborda en un dique seco que va a captando el agua primeramente tratada y distribuyéndola al siguiente sistema.

La vegetación que se contempla en estos 4 húmedales es: 2 humedales con *Typha latifolia* y 2 con *Scirpus o Schoenoplectus lacustris*, cubriendo estos sistemas con las especies principales que generan buen rendimiento. La estructura construida a través de filtros granulométricos que van de diámetros de 4” máximo a 1/2” de espesor. Donde a través de una pendiente del 2% conduce las aguas hasta el afluyente que va a llenar el canal entre diques que va a distribuir el agua hacia 3 humedales de flujo subsuperficial con hydrofitas marginales, a través de estos, más pequeños (70 x 35m) y con una vegetación a base de *Typha latifolia* el agua pasa por un segundo tratamiento para verter sus aguas a través de un tercer dique hacia la última área de tratamiento, considerada también como un área de amortiguamiento. Con cerca de 200000m<sup>2</sup> esta área es reservada como un gran humedal de hydrofitas marginales con u flujo libre. Es decir, el área con una pendiente general también del 2% se planta con especies como *Scirpus lacustris* y *Typha latifolia* entre las que el agua pasaría para dar paso al tratamiento final.

En las orillas de dicha zona, se coloca un humedal de hydrofitas emergentes en ambos lados, con el objetivo de enmarcar dicha zona

En las zonas más profundas del vaso regulador, se tienen identificadas las corrientes que llevan el agua a través de todo el tirante de agua.

- Identificando las corrientes principales, se establecen ahí el sistema de Islas flotantes, anclándolas de manera provisional en plazos de 6 meses a lo largo de dichas corrientes, van cambiando de lugar en relación al tipo de vegetación y a los meses de mayores vientos. Concentrando las islas con vegetación de especies *Juncus efusus* en la corriente principal durante

los meses de sequía (noviembre-abril), rodeados por un cinturón de amortiguamiento de islas flotantes con especies *Scirpus lacustris*, rotándose durante los meses de lluvias.

En los límites nororiente y suroriente, donde existe un rebosadero y la zona donde existe una mayor concentración y uso turístico se concentra una menor cantidad de contaminantes, in embargo por actividades antrópicas puede llegar a incrementarse.

- En estas zonas donde se mezclan diversas actividades, tanto turísticas como de pesca y aprovechamiento, se establecen humedales de hidrofitas emergentes en las zonas de mayor afluencia turística lo que permitirá a través de una cadena de diques adyacentes a la orilla del embalse con el propósito de tratar las aguas que lleguen al vaso regulador por actividades antrópicas, así como funcionar de demostración de los métodos que resuelven la contaminación. La floración y atención de las especies en este tipo de humedales genera un mayor interés.
- Siguiendo el mismo criterio de establecer áreas de humedales en las orillas del afluyente, se concentran en la orilla del talud, sistemas de islas flotantes con especies *Iris pseudacorus*, que servirán de amortiguamiento para las corrientes menores que lleven a las orillas contaminantes.
- En las zonas donde la actividad antrópica es menor y cerca del rebosadero nororiente se establecen humedales de hydrofitas flotantes en un sistema de diques que contengan dichos humedales y permitan el correcto saneamiento de las corrientes que llevan el agua al rebosadero queden remediadas y devueltas al vaso regulador

Esta zona ha sido declarada “Santuario del agua” (Gobierno del Estado de México, 2003), por el gobierno del Estado de México, lo cual permite que tenga una regulación jurídica para transformar el vaso regulador en nuevamente el lago, además de con el apoyo de estos sistemas de remediación, se puede transformar dicho lago con todas sus propiedades ambientales, visuales y carácter paisajístico.

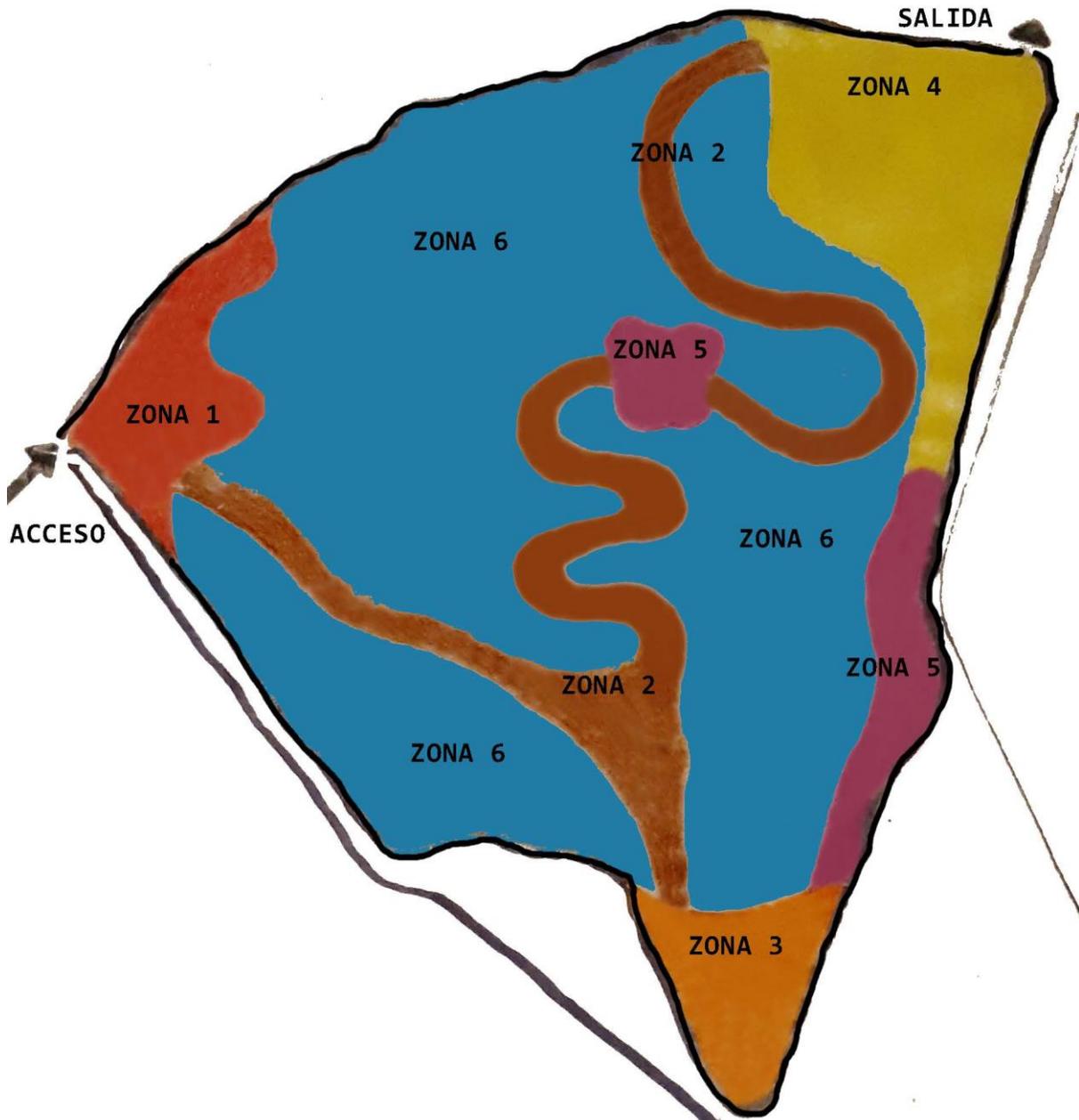


Imagen 59. Zonificación dentro del Vaso regulador

## 5.2 Consideraciones previas al diseño de un humedal.

Para el establecimiento de un humedal artificial, es necesario tomar en cuenta algunos principios básicos de construcción como son:

- **La impermeabilización.**
- **El sustrato**
- **La vegetación**
- **Las estructuras de entrada y salida.** (LÓPEZ DE JUAMBELZ R. , 2008)

### 5.2.1 Impermeabilización

El terreno debe ser nivelado y compactado para evitar cualquier elemento que puedan rasgar o perforar los materiales impermeabilizantes.

Se debe establecer la pendiente que garantice el flujo del agua. (LARA BORRERO, 1998)

Se impermeabilizará el humedal para evitarse la pérdida de agua por infiltración y la mezcla de los contaminantes con las aguas subsuperficiales que dañen el acuífero.

Los impermeabilizantes del suelo pueden ser arcillas naturales o geomembranas de diferente calidad que cumplan con este requisito.

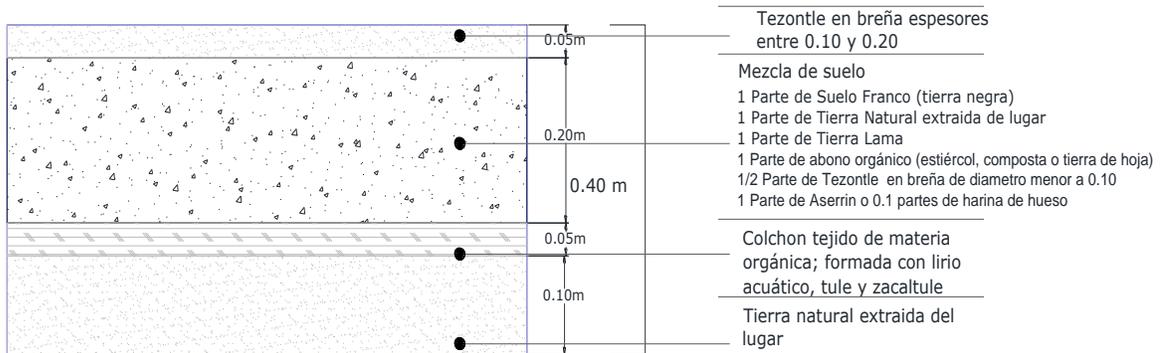
### 5.2.2 Sustrato

El sustrato utiliza el medio granular que van desde gravas hasta arenas directamente sobre la membrana, tomando en cuenta sus características con el fin de no dañarla.

En los otros casos, debe llevar una mezcla de suelo equilibrada; es decir, lo suficientemente consistente para evitar pérdida de suelo por corrientes muy fuertes, pero también con un buen drenaje que permita el desarrollo de la vegetación.

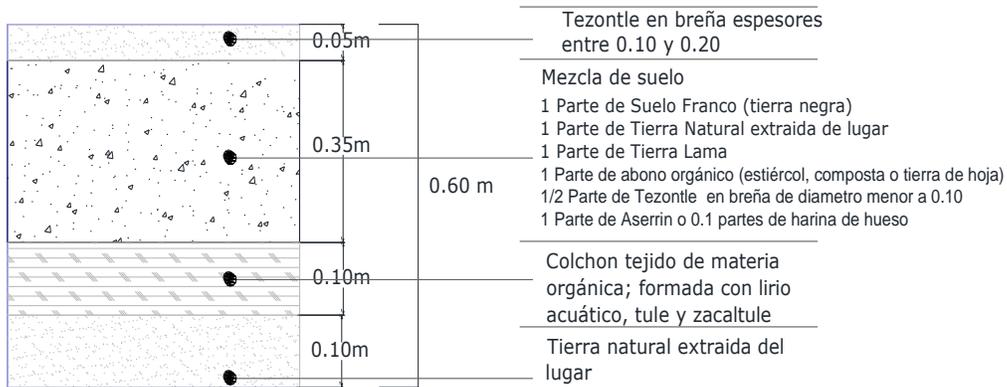
Los Humedales de hidrofítas flotantes, así como las islas flotantes no se necesita sustrato

## Mezcla de suelo base 0.40cm



La mezcla de suelo a base de 0.40cm se utiliza para enraizar hidrofítas emergentes y sumergidas, debido a que su bajo espesor es suficiente para enraizar este tipo de hidrofítas

## Mezcla de suelo base 0.60cm



La mezcla de suelo a base de 0.60cm se utiliza para enraizar las hidrofítas marginales, tanto en flujos subsuperficiales, flujos libres y flujos verticales, para fijar la mayoría de este tipo de plantas que debido a la altura que alcanzan, es necesario un espesor mayor

### 5.2.3 La vegetación

Se recomienda la plantación a marco real en los humedales de hidrofítas que estén sujetas a sustrato, lo cual permite que el flujo del agua sea uniforme a través del humedal. En cuanto a la separación entre cada

planta se recomienda en general 20 cm a partir de donde termina la planta para que fluya el agua, y dar un mantenimiento que consiste en retirar los excesos de la planta para dejar el canal de 20 cm

#### **5.2.4 Estructuras de entrada y salida**

El flujo que se crea dentro del humedal depende de la entrada, la pendiente y la salida.

Los criterios de entrada y salida de agua para un humedal son considerados para generar una circulación constante de agua, no importa el tiempo que tarde en dejar el humedal, tiene que haber una circulación del líquido a través del humedal.

Por lo tanto la entrada de agua se construye, preferentemente a través de una tubería, el diámetro es variable, dependiendo del caudal, lo cual permite su fácil control por parte del operario, aunque también pueden ser adecuados a compuertas o esclusas que generen un ingreso del agua al humedal. La salida o efluente, también está construida a partir de una tubería al final de la celda o también, en humedales más grandes un rebosadero a una zanja que conduce el agua hacia otra celda o su depósito final.

### 5.3 Ejemplo práctico.



Imagen 60. Propuesta plan maestro de intervención en la laguna de Zumpango

El plan maestro considerado para la laguna de Zumpango tiene como objetivo principal devolver el carácter de lago a lo que ahora se tiene como vaso regulador. Existen estructuras artificiales, taludes y delimitaciones que se construyeron para delimitar y embalsar la mayor cantidad de agua.

Sin embargo a través del flujo de los contaminantes a través del mismo nos generan espacios aprovechables para aplicar varias técnicas de fitorremediación, las cuales generan un estado óptimo del agua que se encuentra ahí, así como también establecerán visuales paisajísticas que coadyuven a la regeneración natural de un lago y además aprovechando las zonas que ya se han establecido dentro del embalse se pueden desarrollar distintas actividades de producción, turismo, reproducción y generación de recursos que se pueden obtener tanto de los humedales como de la vegetación en sí.

#### 5.4 Paleta vegetal

La vegetación de los humedales de fitorremediación, retoma la vegetación que existió en los antiguos lagos de la cuenca, sus características también pueden ser aplicadas a la fitorremediación.

En el caso de los humedales de hydrofitas flotantes, el sembrado más sencillo es a través de una planta madura o varias en el caso de la *Lemna*, debido a su sistema de reproducción van cubriendo la parte del humedal dependiendo de la cantidad de materia orgánica que se encuentre en él.

En cuanto a los demás humedales donde la vegetación está asociada a un sustrato la siembra a partir de semillas es un proceso difícil, puesto que el control de semillas que germinarían no será uniforme, además de que el proceso puede ser más largo, por lo que se recomienda trasplantar un rizoma o una planta madura a fin de que se vaya reproduciendo.

La densidad depende generalmente de cantidad de materia orgánica que se encuentre en el agua, ya que la capacidad de reproducción en las hydrofitas es alta y pueden llegar a ser invasivas. Esto es importante ya que dentro de las consideraciones que se deben tener al construir un humedal está el mantenimiento, y que está relacionado con esta característica.

En las hydrofitas emergentes se presenta con mayor lentitud, ya que la planta debe alcanzar una estado de madurez y que las condiciones de temperatura sean las adecuadas para que puedan reproducirse, sin embargo ya alcanzando una edad madura su capacidad de cobertura es muy alta. Se recomienda sembrarla con una cobertura del 30% en caso de una planta madura y al 50% en caso de que la planta sea más joven. En el caso de las hydrofitas marginales su capacidad de reproducción es mucho más rápida haciéndolas más invasivas, por lo que el sembrado se recomienda a una cobertura del 50% sin importar el tamaño de la planta, tomando en cuenta que se debe programar un mantenimiento continuo para eliminar los excesos.

# CONCLUSIONES

México es la segunda ciudad más poblada del mundo, solo detrás de Tokio, y con ese mismo ritmo de crecimiento podría llegar a ser la más poblada del mundo con una población aproximada de 26 millones de habitantes. (Números)

La historia de la cuenca nos ha mostrado la falta de adaptación de los pobladores desde la conquista a un sistema lacustre, de donde los prehispánicos habían obtenido sus recursos de vida y desarrollo bajo una relación respetuosa con el agua. Aún en la actualidad el agua en la cuenca de México es el enemigo a vencer. Paradójicamente el recurso agua en la superficie es insuficiente y existe la necesidad de extraerla del subsuelo para cubrir la necesidad de la población en constante crecimiento, lo que ha provocado una serie de problemas aleatorios que ponen en riesgo a la ciudad de México.

Ahora es el momento de ver el agua como un elemento a conservar, por lo que es indispensable contar con una tecnología acorde a la naturaleza que permita limpiar el agua y regenerar los espacios de carácter lacustre, alcanzando una mejor calidad de vida para la población de esta metrópoli.

El paisaje lacustre que existía en esta cuenca endorreica nos da posibilidades infinitas de recarga y mantenimiento de este vital líquido. El darle la espalda y no convivir con estas características nos han llevado a la crisis en la que nos encontramos hoy. Es necesario reflexionar sobre los sistemas y tecnologías apropiadas para reestablecer la vida de los relictos del paisaje lacustre; y aquellos espacios dentro de la cuenca que por sus características son capaces de albergar agua, convertirlos en lugares para el tratamiento, almacenaje, distribución y aprovechamiento de este líquido. Este tratamiento debe establecerse bajo criterios de paisaje para mantener una relación respetuosa con el agua y evitar seguir sacándola del acuífero.

En las obras que se construyeron para combatir las inundaciones y deshacernos de este vital líquido encontramos la respuesta a la escases, ya que la disposición de agua limpia es cada vez menor y el agua residual sigue creciendo, debemos ver cómo aprovecharlo para no desecharlo de la cuenca, sino al contrario generar espacios libres de contaminantes que establezcan nuevos criterios de convivencia con el agua que nos ayuden a evitar inundaciones, que eviten el agotamiento de los acuíferos y generen nuevos espacios que recuperen el paisaje con carácter lacustre.

Se han generado una red de represas y vasos reguladores alrededor del sistema montañoso de la cuenca, el cual también mediante una solución a la contaminación del agua por métodos naturales que nos

devuelvan el carácter de espacios lacustres nos da las herramientas para crear sistemas de parques lacustres aprovechables para evitar inundaciones, tratar el agua residual y reintroducirla al acuífero.

Los elementos naturales que generan un paisaje lacustre siguen presentes en remanentes de este paisaje antiguo, es nuestra responsabilidad recuperarlos y reestablecerlos en conjunto con nuevas tecnologías que nos permitan enfrentar la grave crisis que está cerca si seguimos explotando el acuífero.

Las lagunas, lagos, humedales nos dan características inigualables tanto visuales como aprovechables para crear elementos de diseño que nos permita unificar el paisaje a través de espacios lacustres con características que reunifiquen el área como una unidad.

Las tecnologías alternativas amigables con el ambiente son una herramienta a considerar para recuperar el agua que todos los días estamos desechando fuera de la cuenca e irónicamente nos estamos quedando sin disponibilidad de este vital recurso.

El desarrollo adecuado de una población no es posible, sí sólo se explota un recurso sin reincorporar los desechos al ciclo natural, siguiendo el patrón de manejo de desechos de la propia naturaleza. Así vemos que la producción de oxígeno en las eras pasadas fue un desecho que se une a una nueva forma de vida, la que utilizan el oxígeno como sustrato para tener energía mediante la respiración, y aún más la sobreproducción de oxígeno en la naturaleza toma un estado químico diferente y sube a la atmósfera y forma la capa de ozono para proteger la propia vida de las amenazas del cosmos. Tal como estos ejemplos el desarrollo del hombre debe buscar que la utilización y desecho de recursos se conviertan en ciclos, en donde tal desecho sea sustrato de otro proceso.

La utilización del agua debe responder a un ciclo, con la ayuda de las técnicas de fitorremediación tenemos una maravillosa posibilidad de aprovechar el agua que desechamos todos los días para recrear el paisaje de esta cuenca y un ejemplo lo constituye la presente propuesta, encaminada a la recuperación del hoy vaso regulador, otrora lago de Zumpango. Esta recuperación beneficia aspectos ambientales, pero también sociales y porque no económicos, ya que un paisaje sano conlleva a una revalorización del territorio.

Los arquitectos paisajistas tenemos la responsabilidad de entender los elementos del pasado, aprender de la historia y continuar con propuestas actuales que unan el ambiente natural, la tradición milenaria y otorguen raíces a las poblaciones actuales. Aprender de los errores es madurar, por lo que las propuestas actuales deben apegarse a lo que es posible en la naturaleza. Ya el hombre demostró su capacidad de cambiar el curso de lo natural, pero bien caro está pagando esa osadía y es nuestro deber heredar a las

futuras generaciones los bienes que hemos recibido del pasado. Esta visión nos permite evitar cometer los mismos errores.

El paisaje actual no resiste un error más, atentamos contra nuestra sobrevivencia, por lo que debemos voltear a ver el aprovechamiento de los sistemas lacustres y el agua que todos los días se deposita en la cuenca y sale por las coladeras a través de los sistemas profundos, actitud que evita el poder disfrutar y aprovechar este extraordinario líquido que dio lugar a la vida en el planeta.

El agua considerada residual no debe salir de la cuenca, aquí en este sitio, debe ser remediada y aprovechada hasta restaurar los ecosistemas del medio lacustre. Es importante recalcar que la naturaleza se mueve a través de ciclos y que la fitorremediación es la herramienta técnica que nos permite devolver al agua su pureza y su aplicabilidad a nuestra forma de vida y a la de las demás especies. La fitorremediación es la posibilidad de restaurar ecosistemas y con esto ofrecerles a las especies que nos acompañan durante nuestra estancia en la tierra una forma de vida y sobrevivencia ante el cambio climático que se avecina. También la fitorremediación constituye una técnica para ofrecer a las futuras generaciones una mejor calidad de vida.

**“Aquel que no conoce su historia está condenado a repetirla”  
Napoleón Bonaparte**

# BIBLIOGRAFÍA

- AGUA, C. N. (1990). *Diagnóstico ambiental del proyecto de infraestructura hidrológica de la Laguna de Zumpango, Edo. de México*. México: Ingenieros Químicos en Proceso S.A. de C.V.
- ALCARAZ, L.J. 1942. Biocenología en el Valle de México. Vol. III In: Sociedad Mexicana de Historia Natural, A: C: IMERNAR y Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, 1998. Revista de la Soc. Mex. de Hist. Nat. 1938-1997 (textos completos). CD-ROM. México, D.F
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, AWWA, 1990. Water Quality and Treatment, a handbook of community water supplies, Ed. Mc Graw-Hill Inc. 4ª edición, 1194 pp, E.U.
- BELTRÁN, E. 1959. El Hombre y su ambiente. Ed. Fondo de Cultura Económica. México, D.F.
- BORSODORF, A. y. (15 de Febrero de 2012). *Espacios naturales de Latinoamérica: desde la tierra de fuego hasta el caribe*. Obtenido de [lateinamerika-studien.at: http://www.lateinamerika-studien.at/content/natur/naturesp/natur-1256.html](http://www.lateinamerika-studien.at/content/natur/naturesp/natur-1256.html)
- CLESCERI, L.S., A.E. GREENBERG y R. RHODES. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 18ª de APHA, AWWA, WPCF, Washington, D.C.
- COHEN, M. P. (1999). *EL PARADIGMA PORFIRIANO, HISTORIA DEL DESAGUE DEL VALLE DE MÉXICO*. MÉXICO: PORRÚA.
- COLE, G.E. 1979. Textbook of Limnology. Second Edition. Mosby Company. 426 pp.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA/DHTA, 1990. Estudios experimentales de tratabilidad de las aguas del Canal Santo Tomás-Zumpango, contrato No. SGAA-90-64, México, D. F.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA/DHTA, 1991. Diseño de un sistema de tratamiento a base de procesos naturales de depuración de agua para el Influyente al vaso de Zumpango, contrato No. SGAA-90-117, México, D. F.
- CONABIO. 1998. La diversidad biológica de México estudio de país, 1998. Conabio. México.
- D.D.F., 1975. Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal. Tomos I y II. Ed. Talleres Gráficos de la Nación. México, D.F.
- DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK. Manual de tratamiento de aguas negras. Limusa, México, 2004
- DURÁN, F. D. (2005). *Historia de las Indias de Nueva España e islas de la tierra firme, Tomo I y II*. México: Porrúa.
- ESPINOZA, G. (1992). *Presencia del lago en la cosmovisión mexicana (principios del s. XVI: un primer acercamiento)*. México: Escuela Nacional de Antropología.
- ESPINOZA, G. (1996). El Embrujo del Lago. El sistema lacustre de la cuenca de México en la cosmovisión mexicana. En G. Espinoza, *El embrujo del lago. El sistema lacustre de la cuenca de México en la cosmovisión mexicana* (pág. 400). México: Instituto de Investigaciones Históricas. UNAM.

- EZCURRA, E. (2008). *De las Chinampas a la Megalópolis. El medio Ambiente en la Cuenca de México*. México: Fondo de Cultura Económica.
- FUENTES BELTRAN, R. (s.f.). *Sistemas de depuración natural*. Obtenido de <http://depuranatura.blogspot.com/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial.html>
- Gobierno del Estado de México. (Junio de 2003). Declaratoria del ejecutivo del estado por el que se establece el área natural protegida con la categoría de parque estatal denominada "Parque estatal para la protección y fomento del Santuario del Agua Laguna de Zumpango". . *Gaceta Oficial del Gobierno del Estado*, 7.
- GUERRERO, G. M. (1982). *El Sistema Hidráulico del Distrito Federal*. México: DGCOH.
- HENRY J., G. y HEINKE, Gary W. (1999). *Ingeniería Ambiental*. México: Prentice Hall.
- HILLEBOE E., H. (2004). *Manual de tratamiento de aguas negras*. Departamento del Estado de Nueva York. Nueva York EUA: Limusa.
- H. AYUNTAMIENTO DE TEOLOYUCAN.2006. Plan de Desarrollo Municipal 2006 – 2009. <http://www.edomexico.gob.mx/se/diagedo.htmEstatal>
- H. AYUNTAMIENTO DE ZUMPANGO. 2006. Cédula Municipal de Información Ambiental. <http://www.edomexico.gob.mx/se/diagedo.htmEstatal>
- LARA BORRERO, J. A. (1998). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Cataluña: Instituto Catalán de Tecnología.
- LÓPEZ, A. 2003. La Recuperación de la Laguna de Zumpango Agua y Desarrollo Sustentable, Vol.1 (1): 3-9. Metepec, Edo. de México. México.
- LÓPEZ DE JUAMBELZ, R. (2008). *Diseño Ecológico. Aspectos estéticos, formales y técnicos*. México.
- LÓPEZ DE JUAMBELZ, R. y. (Abril de 2009). Las plantas acuáticas en el diseño. *Bitácora*(19), 50.
- MARGALEF, R. (1974). *Ecología*. Barcelona: Omega.
- MARGALEF, L. (1983). *Limnología*. Barcelona: Omega.
- MARGALEF, R. 1957. Los Organismos Indicadores de Limnología. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid. 300 pp
- MENTABERRY, A. (2011). *Agrobiotecnología*. Buenos Aires: Departamento de fisiología, biología molecular y celular .
- MIRANDA, F. 1963. La Ecología y los Recursos Naturales de la Cuenca del Valle de México. In. Problemas del Valle de México. Ed. IMERNAR. México, D.F.
- MOOSER, F. 1963. La Cuenca Lacustre del Valle de México. In. Problemas del Valle de México. Ed. IMERNAR. México, D.F.
- NIEDERBERGER BETTON, C. (1987). De la prehistoria a los primeros asentamientos humanos en la Cuenca de México. En G. y. GARZA, *Atlas de la Ciudad de México*. México: DDF y Colegio de México.

- NUÑEZ LÓPEZ, R. A. (julio-septiembre de 2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicación. *Ciencia*, 75(75), 69.
- OROZCO Y BERRA, M. (1864). *Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México*. México: Sociedad mexicana de Geografía y Estadística.
- POH-ENG, L. y. (1998). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Resource Recovery*. Bangkok: Environmental Sanitation Information Center.
- QLD, D. (2000). *Guidelines for using free water surface constructed wetlands to treat municipal sewage*. Brisbane, Australia : Gobierno de Queensland, Secretaría de Recursos Naturales.
- RAMÍREZ, A. 1999. Monografía Municipal de Zumpango (versión preliminar). Cronista Municipal de Zumpango.
- REDDY, K. R. (1987). *Aquatic plants for water treatment and resource recovery* . Orlando: Magnolia Publishing.
- REED, S. (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment, A Technology Assessment*. EEUU: United States Environmental Protection Agency.
- RUÍZ, A., y ORDÓÑEZ, A., 2000. Programa de control de malezas acuáticas. Resultados de las visitas a la Presa Valle de Bravo. Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, Subcoordinación de Hidrología e Impacto Ambiental. IMTA.
- RZEDOWSKI, J., 1975. Flora y Vegetación. Tomo I: 81-130. In. Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal. Ed. Talleres Gráficos de la Nación. México, D.F.
- RZEDOWSKI, J.1978. Vegetación de México. Ed. Limusa, México, D.F.
- SANTOYO VILLA, E., OVANDO SHELLEY, E., MOOSER, F., & LEÓN PLATA, E. (2005). *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. MÉXICO, MÉXICO, MÉXICO: TGC.
- TAPIA VARELA, G. y. (2002). Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México. (U. N. México, Ed.) *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19(1), 50-65.
- TORTOLERO, Alejandro (2000). *El agua y su historia: México y sus desafíos hacia el s. XXI*. Siglo XXI, México, pág. 13
- VELA, E. (julio-agosto de 2007). La cuenca de México Posclásico tardío (1350-1519 D.C.). (E. Vela, Ed.) *Arqueología Mexicana*(86), 60.
- VOLLENWEIDER, R.A and J.J. Kerekes, 1981. Background and summary results of the OECD cooperative program on eutrophication, restoration of lakes and inland waters, EPA 440/5-81-010, Washington, D.C.
- WARD, Loftis, Mc Bride, 1990. Design of water quality monitoring Systems Van Nostrand Renhold New York Cap 7 pp 112-117.
- WETZEL, R.G. 1975. Limnology. W.B. Sauders Company. London.743 pp.
- ZUMPANGO. 2001. In. Enciclopedia de los Municipios de México. Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de México.