



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“PLAN DE ACCIONES PARA ATENDER LA  
PROBLEMÁTICA DE CALIDAD DEL AGUA EN EL  
LAGO DE CHAPULTEPEC, PRIMERA SECCIÓN”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A N :**

**PALACIOS ADAME ALMA ANGÉLICA  
VEGA MORALES ALEJANDRO**



**DIRECTOR DE TESIS:  
ING. MARCOS TREJO HERNANDEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA 2015**

Ciudad Universitaria, D. F.



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

Señores

ALMA ANGÉLICA PALACIOS ADAME

ALEJANDRO VEGA MORALES

Presente

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/055/15

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"PLAN DE ACCIONES PARA ATENDER LA PROBLEMÁTICA DE CALIDAD DEL AGUA EN EL LAGO DE CHAPULTEPEC, PRIMERA SECCIÓN"**

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ANTECEDENTES
- III. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS
- IV. DIAGNÓSTICO
- V. PLAN DE ACCIONES
- VI. CONCLUSIONES
- VII. BIBLIOGRAFÍA

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 4 de agosto del 2015.

EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

## Dedicatorias

Hoy me llena el alma poder regalarles un poquito de satisfacción por haber construido en mí, los cimientos que me mantuvieron de pie, que no me dejaron caer, gracias papás porque por ustedes soy lo que soy, tengo la fuerza y el coraje para salir adelante, gracias por enseñarme a forjarme metas y siempre ir tras de ellas para nunca soltarlas y llegar más lejos.

No existen palabras para agradecer tanto amor, gracias mamá por siempre echarme porras, por confiar en mí, por darme ese impulso que siempre me mantuvo con un sueño, por llevarme en este camino de la vida de tu mano, mostrándome los diferentes senderos que podrían tomar mis decisiones y que hoy puedes estar tranquila que tomé un buen camino, el camino del estudio que siempre nos dará mayor capacidad de razonamiento y visión a futuro, simplemente gracias por siempre estar ahí, apoyando y dando lo mejor de ti.

Gracias a ti papá, por el buen humor que inyectabas en mis desvelos, por enseñarme a darle la vuelta a lo que no me gusta y seguir siempre mi instinto, por darme más valor a mí que cualquier otra cosa, por apoyar siempre mis decisiones hoy te agradezco siempre estar a mi lado.

Gracias a mis hermanos que siempre me apoyaron, que estuvieron ahí para todo lo que yo necesité y que siempre estarán ahí, gracias por su amor, porque se que hoy están orgullosos de mí.

Hoy me es grato, dedicarles con todo mi amor, este trabajo que concluye todos los años de estudio en los que ustedes fueron partícipes, los amo.

A mi hijo Paulo le dedico esta tesis porque él fue mi motor, mi fuerza para no dejar este camino a medias, para ser alguien mejor y dejarle un buen ejemplo, a ti mi niño querido te dedico todo mi esfuerzo, porque es por ti y para ti, te amo.

Esta tesis está dedicada con mucho cariño a toda mi familia, los amo....

Alma Angélica Palacios Adame

## Agradecimientos

Este logro se debe a la suma de dos fuerzas que llevan una misma dirección e impulsados por un mismo motor, gracias a ti Alejandro, porque este trabajo inició por ti, gracias por pensar siempre en Paulo y por motivarme pensando en un mejor futuro para nuestra familia, gracias porque este camino a tu lado ha sido más fácil, por tu amor, tu tan particular humor que me ha hecho tan feliz, por tu paciencia, sin miedo a nada, siempre juntos.

Por supuesto, el mayor reconocimiento es para el Ing. Gregorio Martínez, por su dedicación, paciencia, interés y confianza en nosotros, por transmitirnos cada uno de sus conocimientos en el tema sin esperar retribución alguna, gracias por guiarnos en este camino en el que estábamos perdidos, por ese buen humor que nos facilitó el desarrollo de este trabajo, gracias Ingeniero, porque sin usted no habiéramos concluido esta valiosa tesis.

Gracias a nuestro Director, el Ing. Marcos Trejo, por defender siempre nuestro punto de vista ante los demás, por creer en nuestra capacidad, por estar con nosotros desde un principio, gracias por todo su apoyo.

Gracias a la M.H.D Norma Legorreta Linares, al M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, al M.I. Hector Javier Guzmán Olgún y al M.I. Miguel Ángel Zúñiga Bravo por tomarse el tiempo para conocer este tema de tesis y enriquecerla con sus valiosos comentarios.

Gracias a la Facultad de Ingeniería, mi alma mater, porque aquí comenzó un sueño que hoy quedará reflejado en un papel, gracias por todas sus enseñanzas que han creado en mi una profesionista con fuerza, dedicación y mucho amor por su carrera.

Gracias Dios mío, por dejarme llegar a este momento de gloria en donde se ve concluido un largo camino de esfuerzo, desvelos, dedicación y perseverancia.

Gracias a todos los que me apoyaron y por seguir creyendo en mi...

Alma Angélica Palacios Adame

## Dedicatorias

Mi tesis se la dedico con todo mi amor y cariño.

A mi madre Elva Alicia Morales Benítez.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su enorme amor de madre que siempre me dio cobijo y la energía suficiente para siempre alzar la cara y enfrentarme a cualquier situación de la vida, que por más difícil que parezca es posible si así se propone.

A mi padre Jorge Vega de León.

Por los ejemplos de perseverancia y dedicación que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante, porque siempre me enseñó a querer y enfrentar las cosas como un hombre, por nunca dejarme caer y darme fuerzas cuando más lo necesitaba y por su amor.

A mi hermana Georgina Vega Morales.

A mi hermana Gina por todas sus cualidades como persona, porque es la mujer con la que crecí y he compartido todas mis alegrías, a la que yo nunca cambiaría por nadie en el mundo porque sé que puedo contar con ella ante cualquier adversidad, porque nuestro amor es incondicional y porque me doy cuenta que nuestra niñez puede ser eterna mientras te tenga conmigo.

A mi hijo Paulo Alejandro Vega Palacios.

Por convertirse en un pequeño motor que alimenta mis ganas de superarme día a día, ya que él es mi brillo, mi felicidad, mis emociones, mis suspiros, porque su sonrisa puede alegrarme todo mi día, porque es una pequeña extensión de mi de la cual siempre estaré orgulloso.

¡Gracias a ustedes!

Alejandro Vega Morales

## Agradecimientos

Primero y como más importante, me gustaría agradecer sinceramente al Ing. Gregorio Martínez Ramírez, la persona que confió en mí y que ha estado a mi lado desde el comienzo de este proyecto. Su orientación, conocimientos del tema, su manera de trabajar, su persistencia, su motivación y sus amenas charlas han sido fundamentales para mi formación como investigador. Porque sé que fue un trabajo difícil, pero él ha inculcado en mí un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico, sin los cuales no podría tener una información completa como investigador.

A su manera ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración, así como sentirme en deuda con él por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado esta Tesis.

Le agradezco al Ing. Marcos Trejo Hernández, que lleva tantos años apoyándome no solo en el proceso de licenciatura, sino también en el proceso de la vida, ya que él me vio convertirme de estudiante a padre, gracias por sus consejos sinceros, que cuando con solo verme a los ojos nota mi estado de ánimo, por ser un gran ejemplo a seguir, y por todo el apoyo brindado para poder culminar este proceso. Gracias por que siempre ha querido que sea una mejor persona, un mejor ingeniero, gracias por compartir tantas historias.

A la Ing. Norma Legorreta Linares, que es una gran mujer la cual, le agradezco que siempre me ha dedicado parte de su tiempo para resolver todas mis dudas, y jamás me ha dejado caer, sus consejos, gracias por impulsarme en todo momento de la vida, gracias por compartir sus risas, pero sobre todo gracias por su paciencia y su confianza.

A mis maestros.

M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, M.I. Héctor Javier Guzmán Olguín, M.I. Miguel Ángel Zúñiga Bravo, que sin su ayuda durante mi proceso de preparación en la carrera me hubiera sido imposible culminar mi licenciatura, gracias por siempre apoyarme en su momento.

A mi esposa.

Que es un proyecto más concluido juntos, en el cual estoy orgulloso de compartirlo a tu lado, porque con tu compañía todo es mejor, gracias por el amor, por la entrega y por el esfuerzo que has puesto diariamente, para siempre juntos.

A mis amigos.

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos, siempre los tengo presentes.

A todos ustedes les digo gracias por creer en mí!!

Alejandro Vega Morales



## Designación de sinodales de Examen Profesional

A los señores profesores:

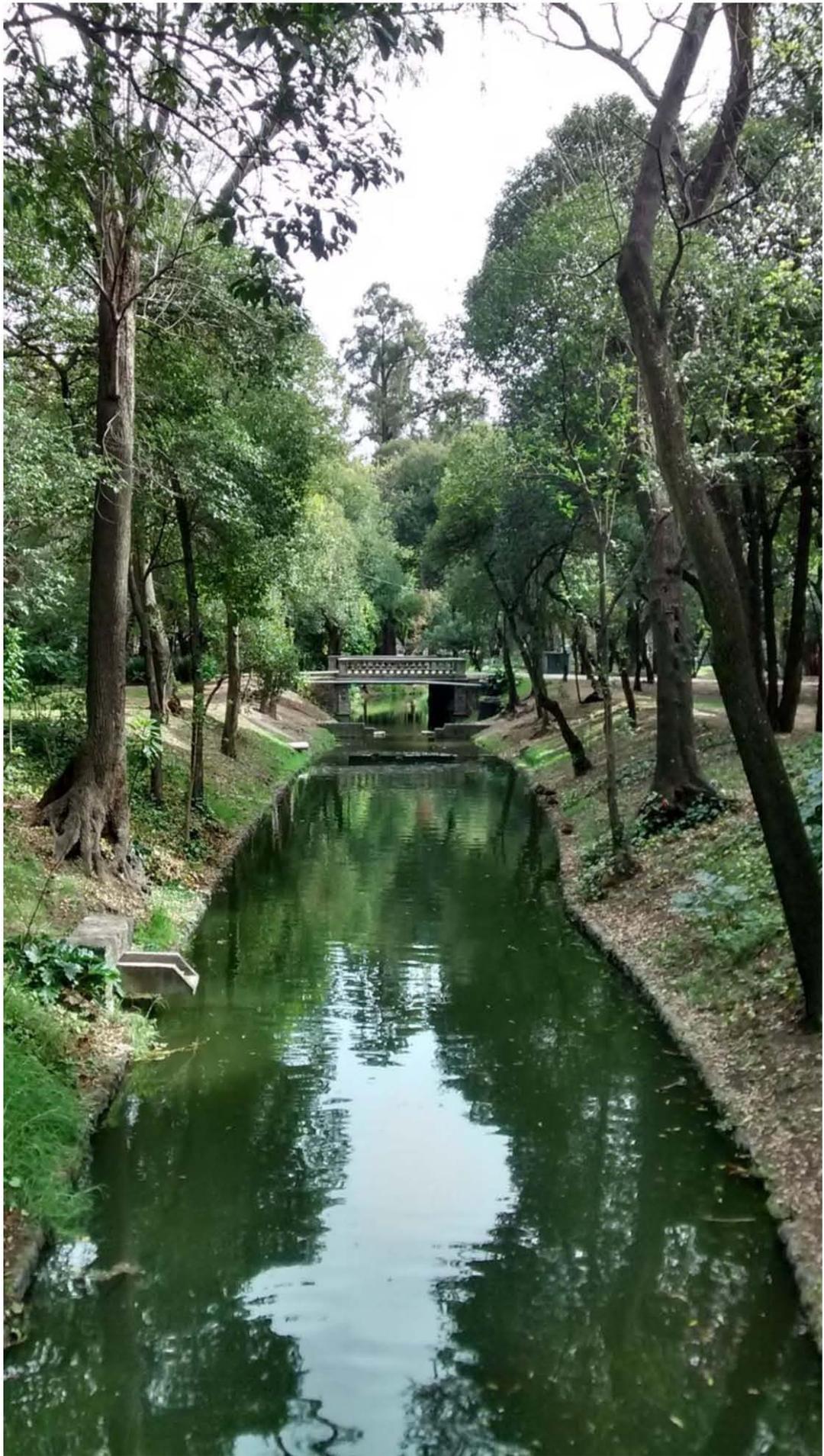
**Presidente:** M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega

**Vocal:** Ing. Marcos Trejo Hernández

**Secretario:** M.I. Héctor Javier Guzmán Olguín

**1er. Suplente:** M.H.D. Norma Legorreta Linares

**2do. Suplente:** M.I. Miguel Ángel Zúñiga Bravo



# Contenido

---

INTRODUCCIÓN .....	11
CAPITULO 1. Antecedentes .....	11
1.1. Asentamientos humanos en el Valle de México .....	11
1.2. Abastecimiento de agua en el Valle de México .....	13
1.3. Reúso de aguas residuales tratadas .....	14
1.4. Los lagos como lugares recreativos.....	16
1.5. Caracterización de las aguas residuales .....	17
1.5.1. Características físicas .....	17
1.5.2. Características químicas .....	19
1.5.3. Características biológicas. ....	20
1.6. Tratamiento del agua residual .....	20
CAPITULO 2. Problemática y objetivos.....	22
2.1. Problemática .....	22
2.2. Objetivo.....	23
2.3. Hipótesis.....	23
CAPITULO 3. Diagnostico.....	24
3.1. El Bosque de Chapultepec.....	24
3.1.1. Clima.....	26
3.1.2. Geología .....	26
3.1.3. Edafología.....	27
3.2. Oferta de agua tratada: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Chapultepec.....	27
3.3. Demanda de agua tratada: Identificación de usuarios y cuantificación del agua residual tratada usada .....	31
3.3.1. Alimentación de agua a los lagos .....	31
3.3.1.1. <i>EL lago de Chapultepec, primera sección</i> .....	33
3.3.2. Usuarios del agua tratada de la PTAR Chapultepec .....	33
3.4. Conclusión del diagnóstico.....	35
CAPITULO 4. Plan de acciones.....	37
4.1. Determinación de los caudales mínimos necesarios para revertir la acumulación de algas en los lagos de Chapultepec primera sección .....	37
4.1.1. Determinación del crecimiento de algas.....	37
4.1.1.1. <i>Volumen de control</i> .....	37
4.1.1.2. <i>Balance de masa</i> .....	37

4.1.1.3. Balance hidráulico .....	39
4.1.1.4. Cinética del crecimiento y acumulación de algas.....	39
4.1.1.5. Procesos y eficiencia de la remoción de las algas. ....	46
4.2. Calibración de la ecuación.....	48
4.2.1. Funcionamiento del lago de Chapultepec.....	48
4.3. Monitoreo de la calidad del agua en los lagos.....	49
4.3.1. Muestreo .....	49
4.3.2. Parámetros .....	50
4.3.3. Equipo de Campo .....	51
4.3.4. Frecuencia .....	51
4.3.5. Registro .....	52
4.4. Resultados .....	52
4.5. Alternativa 1. Control del caudal de vertido .....	66
4.6. Alternativa 2. Construcción de Planta de tratamiento para remoción de microalgas por clarifloculación .....	71
CAPÍTULO 5. Conclusiones .....	73
ANEXOS .....	74
Anexo 1. Solicitud de acceso y respuesta .....	74
Anexo 2. Memoria fotográfica .....	76
Anexo 3. Datos de campo .....	84
Anexo 4. Correlación entre turbiedad y solidos suspendidos totales.....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	94



# INTRODUCCIÓN

---

Esta tesis tiene como principal objetivo, proponer un plan de acciones que permitan mejorar la calidad de agua en los Lagos de Chapultepec.

Podremos observar, que en una gran parte de este trabajo, está enfocada a la historia del agua de nuestra ciudad, puesto que conocer el pasado es fundamental para planear el futuro, por eso este trabajo hace especial hincapié en las obras de generaciones pasadas.

Con la recopilación de información, podemos conocer los motivos de la desecación del Valle así como entender las razones por las cuales los lagos de la ciudad de México son artificiales y por lo tanto, preservados con agua residual tratada.

La importancia de mantener estos cuerpos de agua dentro de la gran ciudad, está asociada a beneficios psicológicos, sociales, económicos y ambientales, por tal razón, nos motiva a querer aportar a la sociedad, acciones que mantengan en buenas condiciones a nuestros lagos.

Con los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Civil, podemos plantear situaciones adversas que requieran una planeación estratégica, así como proyectar un futuro deseado, proporcionando alternativas viables, sometidas a evaluaciones técnicas y económicas.

## CAPITULO 1.

---

### Antecedentes

El Planeta Tierra, está conformado en un 75% de su superficie por agua, del cual el 97.5% se encuentra en los mares y océanos, y tan solo el 2.5% se trata de agua dulce. En este pequeño porcentaje se encuentran los ríos y lagos. La existencia de los lagos ha sido de gran importancia para el desarrollo de todas las civilizaciones, una de las causas de este desarrollo fue la cercanía al vital líquido. Los lagos son cuerpos de agua alimentados principalmente por ríos así como de precipitaciones y agua freática, se forman a partir de procesos geológicos, como movimientos tectónicos, sedimentos acumulados o formaciones rocosas que por la baja permeabilidad impiden el paso del agua aislándolo del mar.

Los grandes lagos fueron característicos del Valle de México, siendo cinco los más importantes: Xaltocan y Zumpango al norte, Texcoco al centro y Xochimilco y Chalco al sur, la cuenca sufrió grandes eventos geológicos, los más importantes fueron efusiones del Cinturón volcánico del Chichinautzin lo que causó el cierre de la cuenca convirtiéndola en endorreica [1].

### 1.1. Asentamientos humanos en el Valle de México

Hace más de 20 mil años llegaron los primeros habitantes al continente Americano, teniendo como referencia los restos fosilizados de una mujer, llamada la mujer del peñón dado a que fue encontrada en lo que hoy es la zona del Peñón de los Baños asignándole una antigüedad de 12 mil 700 años [2].

Los grupos nómadas comenzaron a poblar en las cercanías de los lagos, como la cultura cuicuilca que se ubicó a la orilla del lago de Texcoco en la zona sur, entre los ríos Zacatépetl y Cuicuilco, hoy Periférico y San Fernando respectivamente [3].

En la misma época, surgieron los primeros centros ceremoniales, como el Cerro del Tepalcate, Tlapacoya, Ecatepec, Chimalhuacán y Cuicuilco, los asentamientos empezaron a darse alrededor de estos, siendo la base de su economía, la agricultura, la pesca, la caza y la recolección [4].

Cuicuilco, ubicado al sur de la cuenca llegó a ser probablemente el centro más grande del Valle, hasta la erupción del volcán Xitle, entre el año 310 y 380 D. C. [5], forzando y acelerando el abandono de la zona para su refugio, migrando hacia Teotihuacán, lo que contribuyó a la consolidación de la urbe como el centro ceremonial más importante de la época. [6].

Teotihuacán llegó a tener más de 100 mil habitantes, por lo que el crecimiento de la población provocó la sobre explotación de los recursos naturales trayendo como consecuencia una gran sequía, esto aunado a la llegada de nuevos pobladores de Aridoamérica pone fin a la supremacía en el México Central [7]. Constituyendo la primera evidencia de que el desarrollo de los asentamientos humanos en el valle, depende de la disponibilidad de agua.

La Cuenca empezó a recibir nuevos pobladores, en el siglo XIII, los mexicas llegaron al Valle de México estableciéndose en el islote de Tenochtitlan, llegaron a adaptarse y a desarrollarse en este ambiente acuoso, creando las chinampas, fortaleciendo la pesca y la agricultura como estilo de vida. Fue entonces cuando los que habitaban la cuenca, en particular la cultura mexica, ante semejantes contingencias, dieron muestra de sus conocimientos de ingeniería y empezaron a hacer grandes obras. Tenochtitlan estaba a tan solo dos metros por encima del lago de Texcoco, lo que generaba constantes inundaciones, fue así como surge el Albarradón de Nezahualcóyotl, el cual tenía dos funciones: controlar las inundaciones y la capacidad de dividir las aguas dulces de las aguas saladas para abastecer de agua potable a la población.

En 1521, México-Tenochtitlán cayó en poder de los españoles; Cortés mandó destruir parte del acueducto de Chapultepec para cortar el suministro de agua potable y el Albarradón de Nezahualcóyotl para que pudieran transitar los barcos durante la batalla y así conquistar tierra azteca, así se inició una nueva etapa, que se prolongaría hasta 1821.

El pensamiento de Hernán Cortés era buscar un nuevo lugar en donde asentar la nueva capital de la Nueva España, sin embargo se tomó la decisión de continuar en la ciudad azteca a pesar de los problemas que los aquejaba con las constantes inundaciones, por lo que se vieron en la necesidad de buscar alternativas para su solución.

Una de ellas fue reconstruir el Albarradón, ya que en 1555 se presentó la primera gran inundación, que a pesar de su ayuda, no fue suficiente para solventar dicho problema.

Fue hasta el año de 1607, bajo el Gobierno de Don Luis de Velasco, cuando se decide construir el primer desagüe artificial que drenaría al Valle de México conocido como el Tajo de Nochistongo, que en la primera condición era un socavón, este proyecto estuvo a cargo del cosmógrafo Enrico Martínez y consistía en la construcción de obras para desviar, en la temporada de lluvias, las crecientes del río Cuautitlán hacia la cuenca vecina del río Tula; pensándose que de esta manera se podría controlar el nivel del gran lago que rodeaba la Ciudad de México.

Ante el riesgo que representaba el mantener el funcionamiento del túnel sin revestimiento, el cosmógrafo decidió tapar la entrada del canal en el año de 1629, ya que se venía la avenida del Río Cuautitlán y él pensaba que no la soportaría y que todo el avance de obra quedaría destruido, debido a esta decisión las consecuencias fueron fatales, ya que el nivel del agua de la Ciudad de México alcanzó tirantes enormes, innumerables personas desaparecidas y otras más fallecidas.

Fue hasta 1789 cuando el socavón es convertido en un dren a cielo abierto y se concluye en el Tajo de Nochistongo con una longitud de 2,241 m, más de 182 años se requirieron para su construcción.

En el año de 1856 el Ingeniero Francisco Garay encontró una propuesta viable para ponerle fin a estos problemas de inundación, esta sería la segunda salida artificial en la historia del Valle de México, en esta ocasión consistía en la construcción de un gran canal, sin embargo no era por el rumbo de Nochistongo sino que este desembocaría en Tequisquiac, esta obra estaría compuesta de un tajo, un túnel y un canal, además contaría con tres canales secundarios, el del Sur, el de Oriente y el de Occidente.

En 1865, en el imperio de Maximiliano de Habsburgo, el Ingeniero Garay fue nombrado Director General del Desagüe del Valle de México y fue autorizado el inicio de la construcción del Proyecto. La obra fue realizada en un periodo de 43 años y fue inaugurada esta magna obra oficialmente el 17 de marzo del año 1900 en el Gobierno de Porfirio Díaz, reconociendo un trabajo que se complementaba de conocimientos científicos y técnicos que jugaban un papel fundamental en conjunto de la inversión de muchos recursos y esfuerzos. Es aquí donde se comienza a desecar el gran lago del valle de México.

En los gobiernos post-revolucionarios, la Ciudad de México tenía aproximadamente medio millón de habitantes, en esta época empieza la migración del campo a la ciudad e inicia el crecimiento explosivo de la población, agregándose al problema del desagüe, el del abastecimiento de agua potable para la ciudad [8].

## 1.2. Abastecimiento de agua en el Valle de México

A principios del siglo XX las principales fuentes de abastecimiento era de los manantiales de Chapultepec, de Tacubaya, de los Morales y posteriormente el de Xochimilco, se traía el agua desde Tulyehualco, por la Sierra del Tehutli, por medio de un acueducto inaugurado por el presidente Lázaro Cárdenas.

Con el crecimiento desmedido y acelerado de la población y la continua sobreexplotación de los acuíferos se implementó la construcción de pozos, primero en el centro de la ciudad y posteriormente se empieza a hacer el sistema Chiconautla que consistía en explotar una batería de pozos en una región al norte de la ciudad dentro del territorio del Estado de México.

Toda el agua extraída de los mantos acuíferos, generó una nueva problemática; El subsuelo del Valle de México estaba saturado de agua hasta en la parte superior del mismo y la composición de la superficie tiene un estrato de arcilla aproximadamente de 20 a 30 metros de altura, las arcillas al ser un material compresible, provoca lo que es conocido como el irreversible hundimiento de la Ciudad de México.

Estos hundimientos diferenciales afectaron la infraestructura superficial construida para el desalojo, reanudando los problemas de inundación, en condiciones de mayor gravedad ya que la población había aumentado a aproximadamente 8 millones de habitantes.

Es cuando en el Gobierno del presidente Díaz Ordaz, inicia la construcción del sistema de drenaje profundo cuyo principal elemento es un túnel de 6.50 m de diámetro a profundidades de 20 a 30 m, que inicia al norte de la ciudad en la lumbrera cero ubicada cerca del cerro del Chiquihuite y con una trayectoria paralela a la carretera México-Querétaro, hasta Tepeji del Río, a un costado del Tajo de Nochistongo, siendo esta la tercera salida artificial, poniéndole fin al problema en el año de 1970.

En la actualidad rebasamos los 20 millones de habitantes en el Valle de México, el Túnel Emisor Central tiene más de 15 años sin mantenimiento, ya no se da abasto, porque principalmente se diseñó para sacar agua de lluvia y se dispuso a retirar aguas residuales con el riesgo de que el agua en estas condiciones desprende grandes cantidades de ácido sulfúrico y existe un alto riesgo de que colapse. En temporadas de lluvia el Túnel tiene una capacidad de sacar 200 m<sup>3</sup>/s, el Tajo de Nochistongo 7 m<sup>3</sup>/s y los bombeos del gran canal 30 m<sup>3</sup>/s, es por eso que en la actualidad ya se están realizando las obras para la cuarta salida artificial, el Túnel Emisor Oriente, ya que si no se toman las medidas adecuadas tenemos el riesgo de regresar a lo que fue el lago en la Gran Tenochtitlan [9].

Con este breve recuento de la historia, razonamos cómo se fue desecando el Valle y con él, los lagos que en su momentos fueron naturales, obligando a su conservación, por medios artificiales

### 1.3. Reúso de aguas residuales tratadas

El crecimiento acelerado de la población ha traído como consecuencia la disminución de disponibilidad de agua de primer uso, convirtiendo a las aguas tratadas como un recurso cada vez más preciado [10].

Para preservar algunos de los cuerpos de agua originales en el Valle de México, la única manera es a través del uso de agua residual tratada, convirtiendo a los lagos naturales en lagos artificiales. En la actualidad los cuerpos de agua que existen gracias a este método tienen cierta vocación de uso, desde actividades agrícolas hasta el recreativo, en la **Tabla 1** se enlistan algunos de los lagos artificiales en el Valle de México y el uso que han tenido.

**Tabla 1.** Lagos artificiales en el Valle de México y su uso [11].

Lago artificial	Uso	Fuentes de alimentación	Caudal tratado (l/s)
Xochimilco	Agrícola	PTAR Cerro de la Estrella	2188
		PTAR San Lorenzo	85
		PTAR San Luis Tlaxialtemalco	73
Chapultepec	Recreación	PTAR Chapultepec	74
Aragón	Recreación	PTAR San Juan de Aragón	269

En el año 1956, por la sobreexplotación de los acuíferos, se agotaron los manantiales que mantenían el lago del bosque de Chapultepec y para mantener este importante espacio recreativo de la ciudad se decidió la implementación del primer esquema de tratamiento y reúso de agua residual con la construcción de la planta de tratamiento de Chapultepec, la cual hasta la fecha provee agua para los lagos y las áreas verdes del bosque.

Actualmente, el área metropolitana genera 40 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, de los cuales sólo se logra tratar 5.2 m<sup>3</sup>/s, y una parte de las aguas son regresadas a la tubería y canales de desagüe. Los usos del agua tratada actualmente en las plantas de operación, se presentan en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Usos del agua tratada de las PTAR en el Valle de México [11].

USO	PLANTAS DE TRATAMIENTO
Riego agrícola	San Pedro Actopan,
	San Andrés Mixquic,
	La Lupita
	San Nicolás Tetelco
	Cerro de la estrella
Riego de áreas verdes	Coyoacán
	Reclusorio Sur
	Pemex-Picacho
	Tlatelolco
	Iztacalco
	Campo Militar
	Cd. Deportiva
	Parres
Reúso Industrial	Acueducto de Guadalupe
	Santa Bárbara
Llenado de canales y lagos	Chapultepec
	Xochimilco
	Tláhuac
	Bosques de Aragón
	Cerro de la Estrella
	San Luis Tlaxialtemalco
	San Lorenzo

## 1.4. Los lagos como lugares recreativos

La zona metropolitana ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en número de pobladores con 20 millones 843 mil habitantes, el ritmo de vida es demasiado acelerado, provocando niveles excesivos de estrés entre sus pobladores.

Las actividades de recreación es una opción de distracción, hacer deporte, relajarse o disfrutar de actividades al aire libre, para este fin existen lugares específicos como los lagos [12].

Los beneficios de la recreación conducen a otros indirectos que tienen impacto social entre los que se le atribuyen beneficios psicológicos, psicofisiológicos, sociales, económicos y ambientales.

Algunos de los beneficios personales son [13]:

### a) Psicológicos

- Mejoramiento de la salud mental y mantenimiento de la misma
- Prevención, mediación y restauración del estrés
- Prevención y reducción de la depresión, ansiedad y enojo
- Autoconfianza
- Competencia
- Tolerancia
- Desarrollo y crecimiento personal

### b) Psicofisiológicos

- Beneficios cardiovasculares
- Prevención de ataques cardíacos
- Decremento de problemas dorsales
- Reducción de grasa corporal y obesidad
- Beneficios respiratorios
- Incremento de la expectativa de vida

### c) Sociales

- Comprensión y tolerancia de otros
- Socialización y culturización
- Identidad cultural
- Beneficios para el desarrollo de los niños
- Vinculación social, cohesión y cooperación
- Soporte social
- Vinculación familiar
- Resolución de conflictos y armonía
- Reciprocidad y compartir

d) Económicos

- Reducción de los costos de salud
- Incremento de la productividad
- Menos ausentismo en el trabajo

e) Ambientales

- Mejoramiento de las relaciones con el entorno natural
- Ética medioambiental
- Compromiso público con los temas del medioambiente
- Protección ambiental

Por lo tanto, los lagos urbanos son lugares importantes de recreación, que requiere se conservación en condiciones apropiadas para las actividades que en ellos se practican. La falta de disponibilidad de agua de primer uso en el valle, deja como única fuente viable el reúso de agua tratada.

## 1.5. Caracterización de las aguas residuales

El agua residual tiene contaminantes de interés que los ingenieros encargados del manejo de esta agua deben considerar, así como apearse a las normas que regulan los tratamientos, por tanto el agua residual tiene características Físicas, Químicas y Biológicas que son necesarias describirlas.

### 1.5.1. Características físicas

Las características Físicas se basa en el contenido total de solidos (son englobados con la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta), el olor, el color la temperatura y la turbiedad.

#### Solidos Totales

Se puede describir de una forma analítica como la materia que es obtenida como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación con una temperatura entre 103° y 105°C, la materia que se pierde en la evaporación no se define como solida; los sólidos sedimentables son aquellos que se sedimentan en el fondo, en un periodo de 60 minutos, se utiliza un recipiente cónico (cono de Imhoff); la unidad de medida de los Solidos Totales es mg/L.

#### Olor

El olor que puede tener el agua residuales es debido a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica; normalmente el olor es desagradable, esto debido a la presencia de sulfuro de hidrogeno que es producido cuando se reducen los sulfatos a sulfitos por la acción de microorganismos anaerobios.

## Color

Normalmente es color grisáceo pero con el tiempo que pueda pasar en la alcantarilla o si tienen alguna descarga industrial puede cambiar gradualmente a gris oscuro hasta hacerse negro.

## Temperatura.

La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dado que el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas registradas de las aguas residuales son más altas que la temperatura del aire durante la mayor parte del año, y sólo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano. En función de la situación geográfica, la temperatura media anual del agua residual varía entre 10 y 21 °C, pudiéndose tomar 15.6 °C como valor representativo del Valle de México

La temperatura es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto para el desarrollo de la vida acuática como para las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como la utilidad del agua para ciertos usos.

La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y los 35 °C. Los procesos de digestión aerobia y de nitrificación se detienen cuando se alcanzan los 50 °C. A temperaturas de alrededor de 15 °C, las bacterias productoras de metano cesan su actividad, mientras que las bacterias nitrificantes autótrofas dejan de actuar cuando la temperatura alcanza valores cercanos a los 5 °C. Si se alcanzan temperaturas del orden de 2 °C, incluso las bacterias quimioheterótrofas que actúan sobre la materia carbonosa dejan de actuar.

## Turbiedad.

La turbiedad es el término que nos indica el grado de falta de transparencia de un líquido, debido a que en este se encuentran partículas en suspensión; podemos decir que en cuanto sea mayor la cantidad sólidos suspendidos en un líquido, mayor será la turbiedad, siendo este parámetro una buena medida para predecir la calidad de las aguas.

Algunas causas que provocan turbiedad en el agua son:

- Presencia de algas
- Acumulación de sedimentos por erosión
- Mezcla de distintas aguas procedentes

La turbidez elevada presenta siempre causas y consecuencias las cuales se enlistaran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Causas y consecuencias.

Causas	Consecuencia
Absorben la luz del sol	Temperaturas más elevadas
Dispersa la luz	Disminuya la actividad de la fotosíntesis
Temperaturas elevadas	Disminución del oxígeno disuelto
Disminución del oxígeno disuelto	Pone en riesgo la vida acuática

La turbiedad se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT), con un aparato que lleva por nombre turbidímetro, siendo este capaz de medir la intensidad de un rayo de luz que ha sido dispersada 90 grados, cuando pasa por la muestra de agua.

### 1.5.2. Características químicas

Las características químicas de las aguas residuales son; materia orgánica e inorgánica y los gases presentes en el agua residual.

#### Materia Orgánica.

La materia orgánica puede encontrarse de manera disuelta o suspendida, aproximadamente el 75% de los sólidos en suspensión son de naturaleza orgánica así como el 40% de los sólidos filtrables, ya sea de origen animal o vegetal.

Para la determinación de la concentración de materia orgánica existen tres métodos convencionales; para determinar concentraciones mayores a 1 mg/L se utiliza la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbono Orgánico Total (COT), y para concentraciones de 0.001 a 1 mg/L se utiliza la cromatografía de gases y la espectroscopia.

#### Materia Inorgánica

Son pocos los compuestos inorgánicos que pueden representar una amenaza seria de contaminación, los compuestos inorgánicos más importantes para la calidad de las aguas residuales el nitrógeno y el fosforo.

Estos son provenientes de diferentes fuentes como los desechos ganaderos, fertilizantes artificiales, los efluentes industriales y en particular los efluentes de tratamiento de las aguas residuales.

El nitrógeno proviene principalmente de las descomposiciones de excrementos (urea y proteínas) y el fosforo procede de los detergentes sintéticos.

Estos dos compuestos son esenciales para el crecimiento biológico; el fosforo se asimila en forma de fosfatos y por su parte el nitrógeno se puede asimilar tanto en forma de amoníaco como de nitrato.

La consecuencia más evidente de la contaminación por parte de estos dos compuestos es la capacidad de promover el crecimiento algal, ya que estos propician la eutrofización del agua y una proliferación de algas indeseable.

#### Gases

Con frecuencia en aguas residuales pueden encontrarse el nitrógeno ( $N_2$ ), el oxígeno ( $O_2$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ), el amoníaco ( $NH_3$ ) el metano ( $CH_4$ ), estos últimos tres de la descomposición de la materia orgánica.

### 1.5.3. Características biológicas.

Tanto en aguas superficiales como en residuales; existen organismos patógenos, organismos indicadores y diferentes grupos de microorganismos presentes.

Organismos patógenos.

Estos provienen de desechos humanos que estén infectados o sean portadores de una determinada enfermedad, además también causan enfermedades del aparato intestinal como fiebre tifoidea y paratifoidea, la disentería, diarreas y cólera.

Organismos indicadores

Un ejemplo de organismo indicador es el organismo coliforme que sirve para comprobar la presencia de organismos patógenos y la ausencia de ellos es un indicador de que las aguas están libres de organismos que puedan causar enfermedades.

Microorganismos

En las aguas residuales los microorganismos se clasifican en organismos eucariotas, bacterias y arqueobacterias. Es de suma importancia conocer las características, funciones y metabolismos de estos organismos, como son:

Los hongos que sin la colaboración de estos en los procesos de degradación de la materia orgánica el ciclo del carbono sería interrumpido en poco tiempo y se acumularía la materia orgánica.

Los protozoarios, que estos se alimentan de bacterias y de microorganismos microscópicos, teniendo la capacidad de mantener un equilibrio en el agua usándose en tratamientos de purificación de esta.

De tamaños muy variados existen plantas y animales, desde gusanos y rotíferos microscópicos hasta crustáceos macroscópicos, siendo usados para la determinación de la toxicidad de las aguas residuales, además en los tratamientos secundarios destruyen los residuos orgánicos.

Los virus excretados de los seres humanos pueden ser un importante peligro para la salud ya que se sabe de algunos virus que han sobrevivido hasta 41 días en una temperatura promedio de 20° C en aguas residuales. [14]

## 1.6. Tratamiento del agua residual

EL tratamiento de las aguas residuales tiene como objetivo remover, eliminar, procesar, estabilizar o convertir todas esas sustancias o reacciones, antes de que las aguas sean vertidas a las masas de aguas receptoras.

Existe una serie de procesos y operaciones unitarias del tratamiento de aguas residuales, físicos, químicos y biológicos que pueden determinar características del agua residual cruda, una vez terminado dichos procesos, se verán disminuidos ciertos indicadores como son la materia orgánica, nutrientes y organismos patógenos.

## Operaciones físicas unitarias

En estas operaciones predomina la fuerza física para la eliminación de los contaminantes como el desbaste, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, transferencia de gases y filtración.

Con estas operaciones físicas se elimina la materia orgánica como los sólidos de origen animal, vegetal, o sintéticos, normalmente no están disueltos totalmente en el agua residual y son compuestos a base de carbono, hidrogeno y oxígeno, que son degradables (grasas, jabones, madera, combustibles, proteínas, plásticos, carbohidratos).

## Procesos químicos unitarios

Son los procesos por los cuales se eliminan o convierten los contaminantes, el proceso más utilizado en el tratamiento de las aguas residuales es la oxidación. Con este proceso se remueven la materia orgánica y nutrientes que son compuestos de fosforo y nitrógeno siendo esenciales para el crecimiento de organismos; su presencia es derivada de desechos fecales, algunos solidos solubles derivados de vegetales y animales, fertilizantes y detergentes.

## Normas Oficiales Mexicanas para el uso y disposición de agua residual tratada

En México, la ley establece tres normas para regular la descarga de aguas residuales tratadas en temas de la protección de la salud humana, al medio ambiente y al reúso, las cuales son:

NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-002-SEMARNAT-1996, la cual es la que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en los sistemas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

NOM-003-SEMARNAT-1997, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

NOM-004-SEMARNAT-2002, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales para su aprovechamiento y disposición final.

Estas últimas normas, son aplicables en proyectos de reúso, los parámetros de calidad que deben manejar estos proyectos, incluye: vertido en lagos o embalses, oxígeno disuelto (OD), Solidos Disueltos Totales (TDS), bacterias, pH, compuestos orgánicos volátiles, neutralizadores ácidos/básicos, metales, pesticidas, bifenilos policlorados y nutrientes [15].

## CAPITULO 2.

---

### Problemática y objetivos

#### 2.1. Problemática

En el Valle de México, atender los servicios públicos relacionados con el uso del agua para el consumo humano, la recolección después de su uso y finalmente su disposición representa un grave problema para las instancias prestadoras del servicio. Las fuentes locales de abastecimiento se encuentran sobreexplotadas, por lo que se importan caudales de cuencas lejanas para mantener los niveles de disponibilidad y atender las necesidades primarias, esta situación ha puesto en evidencia la importancia del reúso del agua para atender las actividades donde no se requiera la calidad potable, dentro de estas se identifica el mantener los escasos cuerpos de agua remanentes en la cuenca, integrados a la ciudad, los cuales prestan un servicio de gran importancia, sobre todo aquellos cuya vocación de uso es el atender los requerimientos de esparcimiento de los habitantes, contribuyendo a mantener un adecuado nivel de salud mental.

Los cuerpos de agua existentes en el Valle de México, para atender este servicio, presentan una problemática común, la generación y acumulación de microalgas provocando condiciones indeseables para las actividades de recreo. Los conocimientos técnicos adquiridos durante la formación como ingenieros civiles nos ayudan a establecer una metodología de planeación de las acciones que permitan contribuir a la solución de este tipo de problemas, por lo que establecimos la hipótesis de que es posible desarrollar la metodología que permita identificar y cuantificar las acciones para el control de la problemática que representa la generación y acumulación de microalgas en los lagos artificiales en el valle.

Para poder preservar estos cuerpos de agua, la única fuente disponible es la reutilización del agua residual, el origen de esta, les confiere ciertas características químicas en cuanto al contenido de nutrientes, es decir de fosfatos y de nitratos los cuales son causantes de la generación de algas en estos cuerpos, provocándoles características no deseables para fines recreativos, un ejemplo característico es el color verde que adoptan.

Los lagos que actualmente se tienen en los lugares de esparcimiento del Valle de México, presentan altos contenidos de nutrientes dado su origen, provocando la formación de microalgas, confiriéndole al agua un mal aspecto, restringiendo las actividades de recreo, poniendo en riesgo la vida acuática y al propio cuerpo de agua.

## 2.2. Objetivo.

Actualmente en el Valle de México los lagos utilizados con vocación de recreo presentan altos contenidos de nutrientes, debido al origen del agua con la que son llenados, provocando la formación de microalgas, confiriéndole al agua un mal aspecto, restringiendo las actividades de recreo, poniendo en riesgo la vida acuática y al propio cuerpo de agua, por tal motivo el objetivo de esta tesis es desarrollar y evaluar un plan de acciones que contenga las medidas de control del crecimiento y acumulación de algas en un lago artificial de uso recreativo mediante el análisis de su funcionamiento hidrodinámico.

Obtener datos en campo para evaluar la calidad del agua del lago que permita plantear alternativas de solución, analizando la problemática desde su origen y así poder crear un cuadro comparativo de costo-beneficio que permita identificar la alternativa más óptima para atender las necesidades de saneamiento de nuestro cuerpo de agua

## 2.3. Hipótesis.

Es posible desarrollar la metodología que permita identificar y cuantificar las acciones para el control de la problemática que representa la generación y acumulación de microalgas en los lagos artificiales en el Valle de México.

Plantear soluciones eficientes que permitan mejorar las condiciones del lago, analizar y evaluar costo-beneficio de nuestras alternativas para poder brindar la solución más económica.

## CAPITULO 3.

### Diagnostico

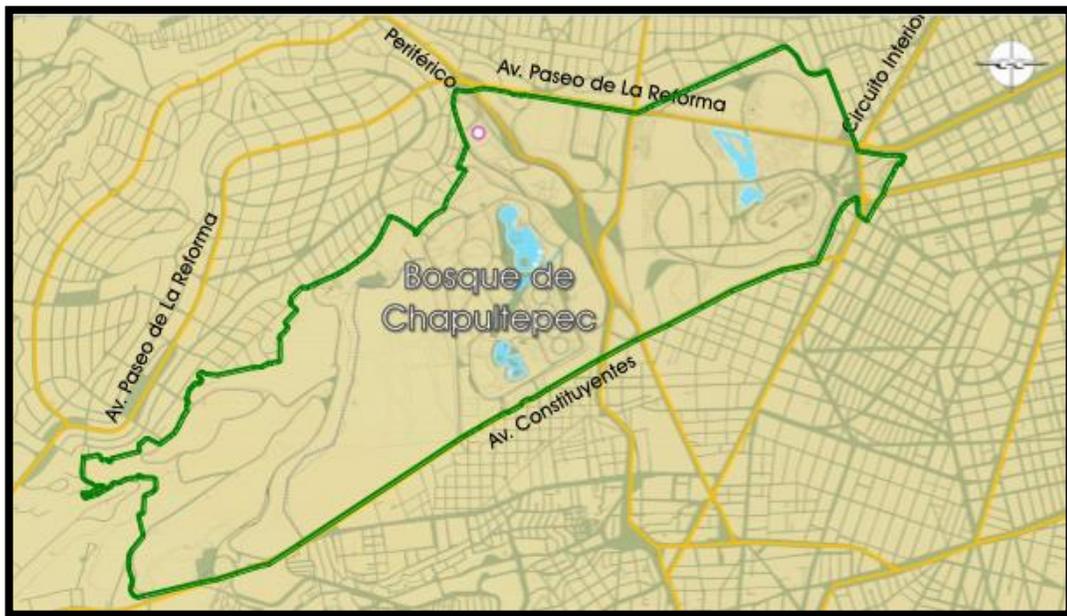
#### 3.1. El Bosque de Chapultepec

El Bosque de Chapultepec cuyo nombre significa “Cerro del Chapulín”, es un parque urbano localizado en la delegación Miguel Hidalgo, al poniente del Distrito Federal. Las coordenadas geográficas extremas están entre los 99°10'40” y 99°14'15” de longitud oeste, 19°23'40” y 19°25'45” de latitud norte. Se encuentra delimitado al norte por la vialidad Rubén Darío y Paseo de la Reforma, al oriente por Calzada General Mariano Escobedo y Circuito Interior, al sur por la Avenida Constituyentes y al poniente por las calles Cumbres de Acultzingo, Paseo de la Reforma, Sierra Mijes, Montes Cárpatos, Miguel Ángel de Quevedo y Avenida de los Virreyes. En la siguiente imagen se muestra el plano de ubicación general del Bosque de Chapultepec.

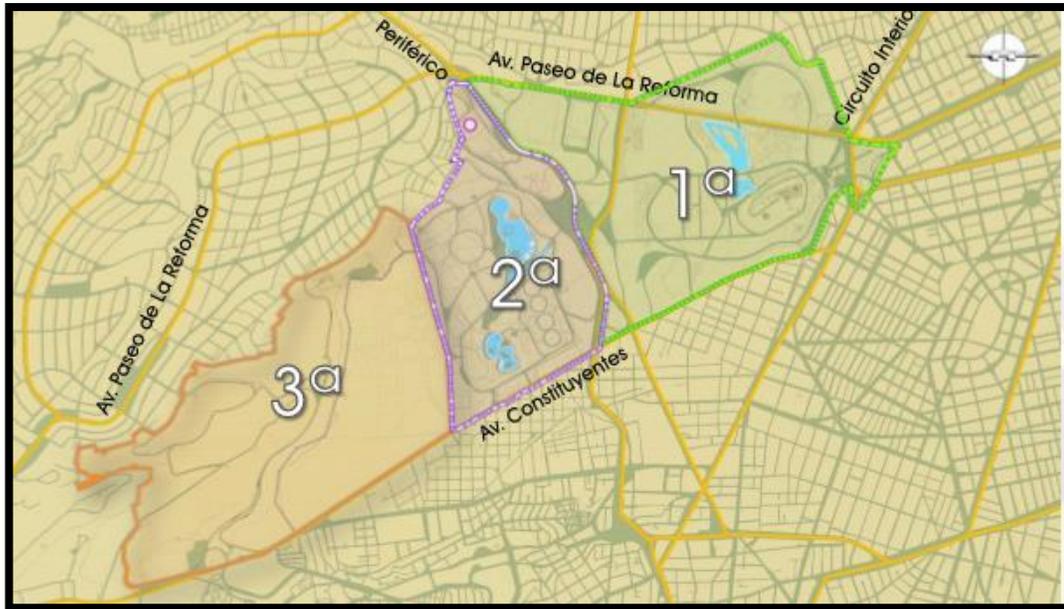
Actualmente es el parque público más grande e importante de la Ciudad de México, así como el más antiguo de América, cuenta con una superficie aproximada de 686 hectáreas, dividido en tres secciones, cuenta con tres lagos, áreas verdes, espacios deportivos y fuentes, constituye uno de los lugares más visitados de la ciudad, alrededor de 15 millones de visitantes al año.

Éste bosque es reconocido por su patrimonio invaluable de orden ambiental, cultural, monumental y arquitectónico, acoge 222 especies de aves y mamíferos, y 105 especies de árboles.

En la **Figura 1** se muestra el área que conforma el Bosque de Chapultepec y las avenidas principales.

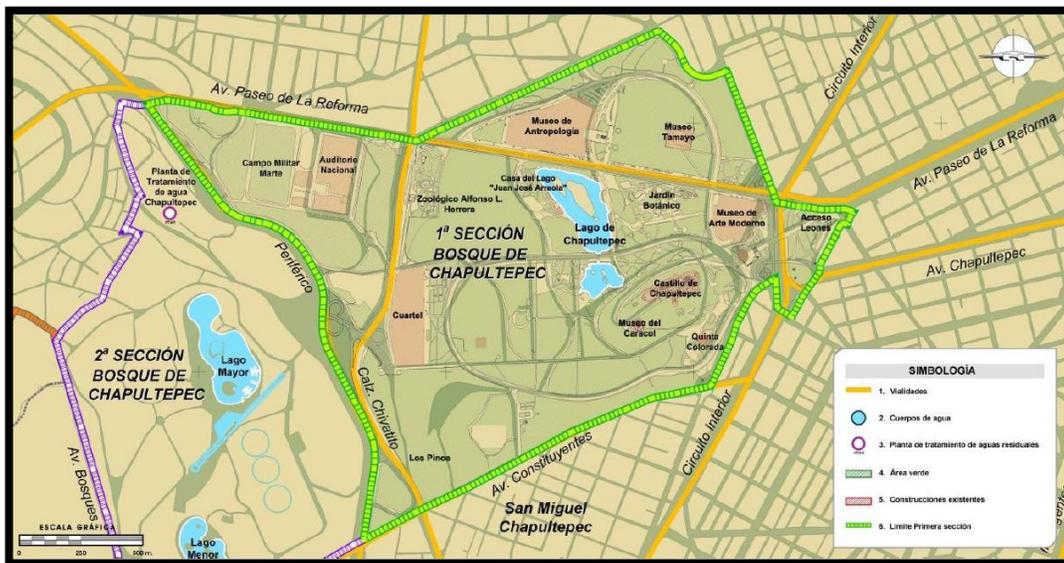


**Figura 1.** Área del Bosque de Chapultepec



**Figura 2.** Ubicación de las secciones del Bosque de Chapultepec

En la **Figura 2** se muestra la división de las áreas del bosque, en este trabajo nos enfocaremos en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec, inaugurada a finales del siglo XV, con una superficie de 274 hectáreas (**Figura 3**). En ésta sección se ubica una de las principales edificaciones de alto valor para la ciudad de México como lo es el Castillo de Chapultepec que aloja al Museo Nacional de Historia, construido a finales del siglo XVIII. También se alojan la Residencia Oficial de los Pinos, Auditorio Nacional, Campo Marte, Museo Nacional de Antropología, Museo de Arte Moderno, Museo Rufino Tamayo, Zoológico de Chapultepec, Casa del Lago, Jardín Botánico, Lago de Chapultepec, Escuela Nacional de Danza Folklórica, entre otros.



**Figura 3.** Primera sección del Bosque.

### 3.1.1. Clima

El clima del Bosque de Chapultepec se representa con la clave Cw1(w)b(i'), lo que significa que es de tipo templado con lluvias en verano, con temperatura media en el mes más frío entre -3°C y 18°C, y la del mes más caliente mayor de 6.5°C. Por su humedad es del tipo intermedio; su índice de humedad (P/T) está entre 43.2 y 55.0, y la cantidad de lluvia es escasa en invierno, menor del 5 por ciento. Los veranos en Chapultepec son frescos y largos. La diferencia entre las temperaturas medias del mes más frío y del mes más caliente está entre los 5° y 7°C.

El régimen térmico general se encuentra definido por unos 15 ó 16°C de temperatura media anual en la planicie de la cuenca y el piedemonte, y de fresco a frío (12 a 14°C) en las montañas cerca del parteaguas.

A nivel local y en términos de valores promedio mensuales de temperatura media y para las cuatro estaciones cercanas al BCH, durante los meses más fríos los cuales son de Noviembre a Febrero, los valores de temperatura media oscilan entre 12 a 15°C. Para los meses más cálidos (Abril a Junio) se tiene valores entre 17 a más de 19°C. Los meses con temperaturas medias moderadas son Marzo y de Julio a Octubre, en ellos los valores están entre 15 a 18°C.

Temperaturas mínimas. Para las cuatro estaciones meteorológicas cercanas al BCH, los valores obtenidos para los meses con menor temperatura (Noviembre a Febrero) oscilan entre los 3 a 4.5°C; para los meses con valores mayores (Mayo a Septiembre) fluctúan entre los 9 y 10°C.

Temperaturas máximas. A nivel local y en términos de valores promedio mensuales de temperatura máxima para las cuatro estaciones cercanas al BCH los valores obtenidos para los meses con menor temperatura máxima (Julio a Enero) oscilan entre poco menos de 25° a poco más de 26°C; para los meses con valores mayores de temperatura máxima extrema (Marzo a Junio) oscilan entre poco menos de 29° hasta los 30.5°C.

### 3.1.2. Geología

De acuerdo a la zonificación, desde el punto de vista estratigráfico, el Distrito Federal presenta tres tipos de zonas: Zona I de Lomas, conformada por grava, arenas, bloques, basaltos y piroclásticas; Zona II de Transición, conformada por arcilla, arena y grava, Zona III. Lacustre conformada por tobas, limos, arcillas y arenas finas.

La Delegación Miguel Hidalgo se ubica en la Zona I de Lomas: formadas por rocas o por suelos, generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, como es el caso de las Lomas de Chapultepec y la cordillera del poniente; pero en los que existen depósitos arenosos en estado suelto o cohesivo relativamente blando, con la presencia de cavernas y de oquedades en rocas, como el caso de las colonias América y Daniel Garza, específicamente, y la Zona II de transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m y su constitución es con base en estratos arenosos y limo-arenosos, intercalados con capas de arcilla lacustre, como es el caso de las colonias Polanco, Anzures, Verónica Anzures, Tlaxpana, Anáhuac y Casco de Santo Tomás, predomina el suelo de rocas ígnea extrusiva, aluvial, lacustre y andesita.

### 3.1.3. Edafología

En cuanto a edafología se refiere, la Delegación Miguel Hidalgo se encuentra totalmente urbanizada sin embargo la porción del Bosque de Chapultepec cuenta con la unidad edafológica Hh perteneciente a los suelos Feosem, que se presentan como suelos con una capa superficial muy oscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes. Sustentan casi todo tipo de vegetación y ocupan la mayor parte de la planicie del Valle de México, en donde fueron utilizados para el cultivo agrícola.

La mayor parte de estos suelos presentan un perfil AC o AB, caracterizado por un horizonte que varía de color oscuro a pardo oscuro. Su contenido de materia orgánica es menor a 5% y en la parte norte suele presentar condiciones ricas en calcio. Las texturas van de francas a limosas y por ello retienen cantidades moderadas de agua y presentan drenajes lentos. Debido a la constante labor de barbecho han perdido en gran medida su estructura.

## 3.2. Oferta de agua tratada: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Chapultepec

La Planta de Tratamiento Chapultepec se ubica al norte de la segunda sección del Bosque de Chapultepec, por el camino de acceso por calle Pedregal esquina F.F.C.C. de Cuernavaca, colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, **Figura 4**. En la **Tabla 4** se presentan las características generales de la PTAR.



**Figura 4.** Ubicación de la Planta de Tratamiento Chapultepec

**Tabla 4.** Características generales de la Planta de Chapultepec

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Chapultepec	
Capacidad Total Instalada	160 l/s, la PTAR cuenta con dos unidades de proceso con capacidad de 80 l/s cada una.
Caudal de operación promedio al año	74 l/s
Proceso de tratamiento	Convencional de lodos activados con desinfección
Año de construcción	1956
Inicio de operaciones	1958
influyente	Colectores Montes Urales (Palmas), Vosgos y Cien Casitas.

La PTAR Chapultepec se compone de distintos elementos como son la caseta de vigilancia, oficinas, edificio central, (laboratorio, cloración y compresores), subestación eléctrica, bodegas, Ermita, medidor de gasto, rejillas y canal desarenador, cárcamo y bombas de agua cruda, además de dos unidades de tratamiento (**Tabla 5**).

**Tabla 5.** Unidades de tratamiento

Unidad de tratamiento 1	Unidad de tratamiento 2
Desgrasador	Sedimentador primario
Sedimentador primario	Aireadores
Aireadores	Sedimentador secundario
Digestor	Tanque de contacto de cloro
Sedimentador secundario	Recirculación de lodos
Tanque de contacto de cloro	Calentador de lodos, control de digestión
Sistema de bombeo	Digestores
-	Cárcamo de almacenamiento de aguas tratadas

Las condiciones actuales de las principales estructuras de la PTAR Chapultepec son muy deplorables tanto en la unidad de tratamiento 1 y 2, debido al poco mantenimiento en los más de cincuenta años que tiene esta Planta de Tratamiento, se puede observar detalles de grietas en los aireadores o en la losa del digestor que no funciona por la misma situación, altos índices de corrosión en las estructuras de los puentes. Esta situación ha provocado que la cantidad de agua tratada haya disminuido con el tiempo, a un nivel tal que se están provocando condiciones indeseables en los lagos.

En las **Fotografías 1-15** se observan las condiciones actuales de las Unidades de Tratamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Chapultepec.

## Unidad de tratamiento 1



**Fotografía 1.** Sedimentador primario



**Fotografía 2.** Vertedor sedimentador primario



**Fotografía 3.** Aireadores



**Fotografía 4.** Tubería conducción de aire



**Fotografía 5.** Puente peatonal



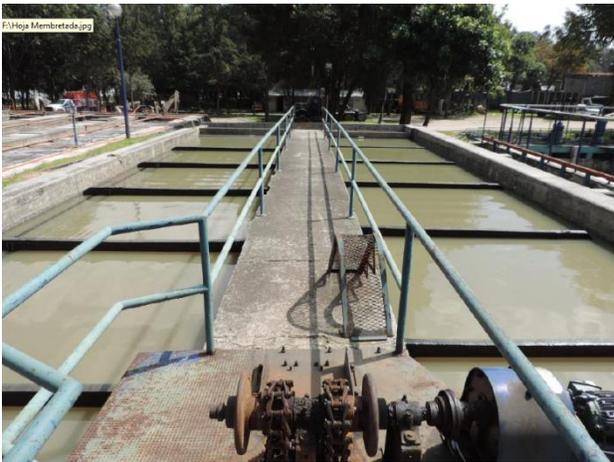
**Fotografía 6.** Grietas en digestor



**Fotografía 7.** Equipo mecánico sedimentador  
Unidad de tratamiento 2



**Fotografía 8.** Tanque de contacto con cloro



**Fotografía 9.** Tanque sedimentador primario



**Fotografía 10.** Muros de aireación



**Fotografía 11.** Sedimentador secundario



**Fotografía 12.** Tanques de contacto de cloro



**Fotografía 13.** Digestores fuera de operación



**Fotografía 14.** Cárcamo de almacenamiento



**Fotografía 15.** Edificio central

### 3.3. Demanda de agua tratada: Identificación de usuarios y cuantificación del agua residual tratada usada

El agua residual tratada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Chapultepec, se utiliza principalmente para llenar los tres lagos del Bosque de Chapultepec, con capacidad conjunta de almacenamiento de 225,000 m<sup>3</sup>; además, se utilizan para el riego 7,000 m<sup>3</sup> diarios de agua, que representa la tercera parte de la demanda actual para reúso.

#### 3.3.1. Alimentación de agua a los lagos

En la primera sección, de acuerdo con información del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), la distribución de agua residual tratada se realiza de la siguiente forma.

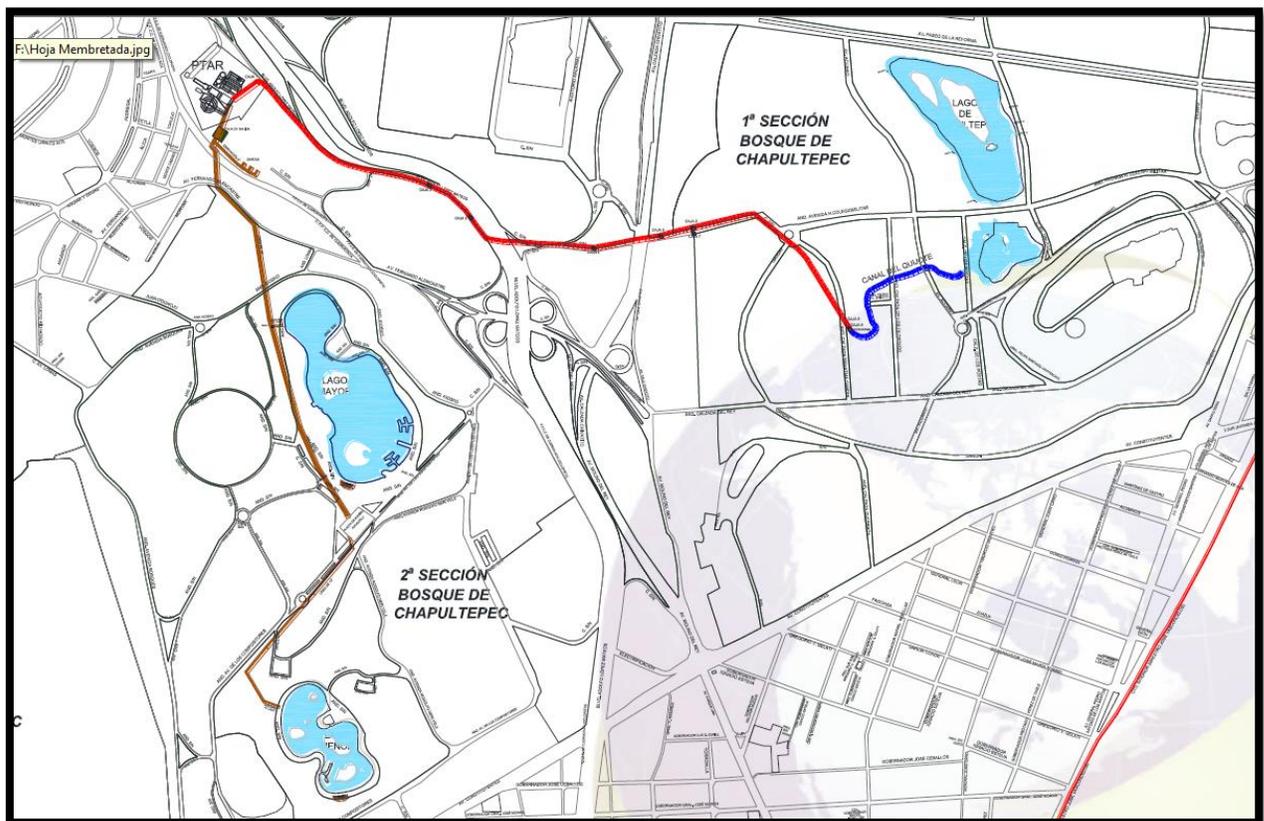
El suministro promedio del agua residual tratada a los lagos de la primera sección del BCH, es de 27 l/s, canalizados por medio de una tubería de 12” de diámetro de polietileno de alta densidad,

ésta línea de conducción opera por gravedad, su punto de partida tiene lugar en el tanque de almacenamiento de la PTAR Chapultepec (con capacidad de 4,000 m<sup>3</sup>), la línea cruza el anillo periférico hacia el oriente, entra al Bosque de Chapultepec por el acceso ubicado sobre la calzada Chivatito, a un costado de la fuente de Nezahualcóyotl, cruza el bosque hasta descargar en el canal del Quijote localizado en la zona de los Filósofos, el agua fluye a través de éste canal en hacia el Lago de Chapultepec en la zona sur, el agua pasa al lago de la zona sur hacia la norte a través de la conexión que existe entre los lagos, por debajo de la avenida Colegio Militar.

Existe un sistema de circulación de agua en el perímetro del Lago de Chapultepec con diferentes puntos de descarga, a través del cual es posible derivar parte del caudal a la zona norte del Lago de Chapultepec, dicho sistema está compuesto por tubería de 6" de diámetro de PVC, se encuentra conectado a un arreglo de filtros a presión localizados en la parte norte del Lago. El caudal filtrado es enviado a la fuente localizada en la zona poniente, cabe mencionar que el sistema de recirculación se encuentra actualmente fuera de servicio por falta de mantenimiento.

El control de nivel en los lagos se realiza por medio de una compuerta en el canal de la Acequia, ubicado en la zona poniente del Lago, el cual descarga a la red de drenaje, parte del caudal es captado en una cisterna para bombeo hacia la red de riego del parque Gandhi ubicado en el lado norte de avenida Paseo de la Reforma.

En la **Figura 5** se observa las líneas de conducción de agua residual tratada al Bosque de Chapultepec.



**Figura 5.** Plano de las líneas de conducción al Bosque.

### 3.3.1.1. EL lago de Chapultepec, primera sección

El Lago de Chapultepec se divide en dos secciones, lago mayor y menor, con superficies de 52,796 m<sup>2</sup> y 15,255 m<sup>2</sup>, respectivamente, con un volumen total de almacenamiento de agua de 74,650m<sup>3</sup>. El agua procedente de la planta de tratamiento descarga en el canal del Quijote. Dicho canal conduce el agua que abastece al Lago de Chapultepec.

El Lago de Chapultepec tiene agua de color verde característico de la presencia de microalgas, en la **Figura 6** se muestra una vista satelital.



**Figura 6.** Lago de Chapultepec (fuentes: Google Earth).

### 3.3.2. Usuarios del agua tratada de la PTAR Chapultepec

Además de los lagos, también se tienen los siguientes usuarios del agua residual tratada, para riego de áreas verdes principalmente:

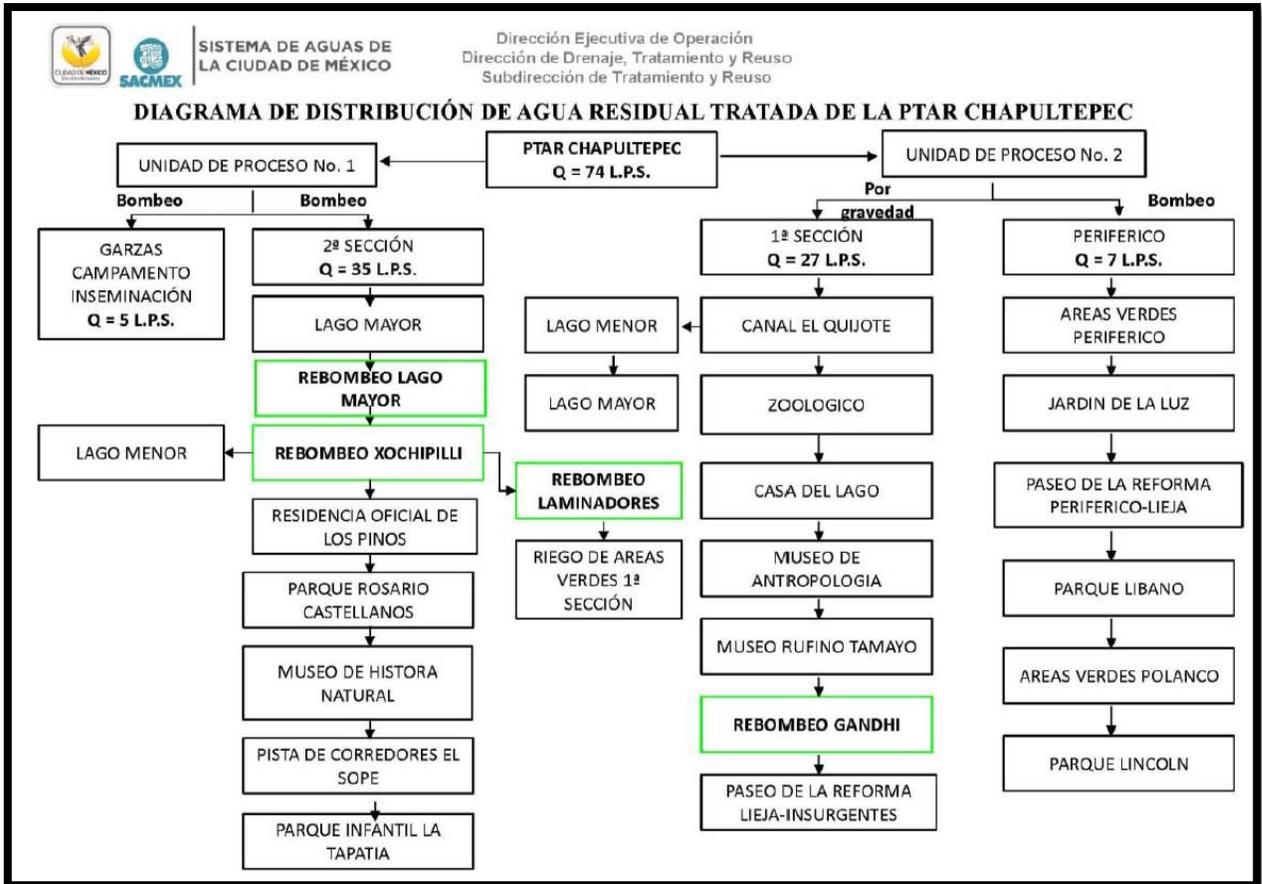
- Zoológico.
- Casa del Lago
- Museo de Antropología.
- Museo Rufino Tamayo.
- Camellones de Paseo de la Reforma entre calle Lieja y Av. Insurgentes.
- Áreas verdes en Periférico.

- Jardín de la Luz.
- Camellones de Paseo de la Reforma entre Periférico y calle Lieja.
- Parque Líbano.
- Áreas verdes en Polanco.

Actualmente no se cuenta con una medición del caudal de agua residual tratada que es distribuida a cada usuario, sin embargo se tiene un diagrama, elaborado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), ver **Figura 7**, donde se representa la distribución del agua residual tratada de la PTAR Chapultepec.

El diagrama muestra un caudal de agua residual tratada promedio de 74 l/s (año 2013), la cual se obtiene de las dos unidades de tratamiento o proceso que cuenta la PTAR. La unidad 1 distribuye un caudal de 35 l/s a la segunda sección del BCH y 5 l/s a las garzas del Campamento de Inseminación, las dos conducciones se realizan por bombeo. El agua que llega al Lago Mayor, se rebomba para la repartición en toda la superficie, la conducción continua hasta la planta de rebombeo Xochipilli, que envía agua al Lago Mayor, Residencia Oficial de los Pinos, parque Rosario Castellanos, Museo de Historia Natural, pista de corredores El Sope, parque infantil La Tapatía y también al riego de las áreas verdes de la primera sección del BCH.

La unidad 2 distribuye un caudal de 27 l/s a la primera sección del BCH, con conducción por gravedad, también un caudal de 7 l/s al Periférico, con conducción por bombeo. En la primera sección se descarga el agua en el canal El Quijote el caudal conduce por gravedad el agua a la zona sur del Lago de Chapultepec (lago menor), existe una Interconexión con la zona norte del Lago (lago mayor), también se envía agua al zoológico, Casa del Lago, Museo de Antropología, Museo Rufino Tamayo y al Paseo de la Reforma entre la calle Lieja y avenida Insurgentes. A partir de la zona del Periférico, se envía agua a las áreas verdes del mismo Periférico, al Jardín de la Luz, al Paseo de la Reforma entre Periférico y la calle Lieja, al Parque Líbano, áreas verdes de Polanco y al Parque Lincoln.



**Figura 7.** Diagrama de distribución de agua tratada en la PTAR Chapultepec (fuente SACMEX).

Atraves del diagnóstico, las características hoy en día de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Chapultepec, del funcionamiento de los lagos y del caudal con el que se llenan estos cuerpos de agua, es posible ver que el problema no es tanto de generación sino de acumulación gracias a que no se tiene un caudal suficiente para que todo lo que se genere en un día pueda verter al desagüe. [16]

### 3.4. Conclusión del diagnóstico.

La planta de tratamiento de aguas residuales “Chapultepec” desde su construcción en 1956, ha sido la única fuente de abastecimiento de agua del Bosque, manteniéndose a la fecha como su principal consumidor, adicionalmente el caudal de agua tratada que produce la planta, se utiliza para el riego de parques, jardines y camellones de zonas aledañas. La capacidad de diseño de 160 l/seg ha venido disminuyendo gradualmente hasta un valor actual de producción de 70 l/s en promedio. Una de las causas de esta disminución es el envejecimiento de las estructuras de la planta, a un grado tal que se ha rebasado su vida útil. En conclusión la oferta máxima actual de agua residual tratada para el bosque de Chapultepec, en sus dos secciones de 70 l/s.

En cuanto a la demanda que se atiende actualmente con la producción de la planta es de 62 l/s para el bosque y 12 l/s para los usuarios externos.

Esta situación ha provocado que los principales requerimientos de agua del bosque no sean atendidos satisfactoriamente, situación que se aprecia en las malas condiciones que guarda una parte importante de la vegetación del Bosque. Donde se hace más evidente y crítico la falta de agua es en los lagos, ya que la limitada alimentación provoca elevados tiempos de residencia, situación que favorece la acumulación de microalgas y en consecuencia el deterioro de las condiciones de los lagos.

La problemática principal a resolver en los lagos es detener la acumulación de microalgas, las medidas que se identifican para resolver la problemática son:

1. Desalojar la producción diaria de microalgas mediante su arrastre hacia el vertedor del efluente del lago, para lo que se requiere identificar cual es caudal mínimo necesario para conseguir el flujo másico equivalente a la tasa diaria de producción de microalgas.
2. Identificar un proceso físico y/o químico que permita la remoción de las microalgas en una cantidad tal que sea equivalente a la tasa de producción diaria. De tal forma que los requerimientos de alimentación de agua tratada se limiten solo a la recuperación de las pérdidas por evaporación e infiltración.

# CAPITULO 4.

---

## Plan de acciones

Un plan de acción prioriza las iniciativas más importantes para cumplir con ciertos objetivos y metas.

El objetivo del plan está enfocado a evitar la acumulación de algas, aportando alternativas eficientes para alcanzar un nivel adecuado de la calidad del agua de los lagos de la primera sección del Bosque de Chapultepec.

### 4.1. Determinación de los caudales mínimos necesarios para revertir la acumulación de algas en los lagos de Chapultepec primera sección

#### 4.1.1. Determinación del crecimiento de algas.

La floración de algas en un cuerpo de agua es función de dos condiciones básicas:

- a) La presencia de nutrientes en el agua, principalmente nitratos y fosfatos;
- b) La incidencia de radiación solar sobre el cuerpo de agua para propiciar el proceso de fotosíntesis.

La condición de ser agua de reúso la utilizada para el llenado de lagos, le confiere la primera característica, concentraciones elevadas de nutrientes, adicionalmente la exposición de los cuerpos de agua a la radiación solar da las condiciones favorables para la floración, situación que es evidente por la coloración verdosa del agua, esta característica es una condición aparente del agua ya que lo que se observa son las microalgas suspendidas en el agua.

Para la determinación de la tasa de crecimiento de microalgas se requiere efectuar un balance de masa, relativo a las microalgas para establecer el modelo matemático que permita calcular los flujos másicos de entrada, salida y la acumulación en el lago. Para este fin se requiere definir los conceptos necesarios para el análisis.

##### *4.1.1.1. Volumen de control*

Un volumen de control ( $V_c$ ) es una región elegida apropiadamente en el espacio. Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control. En general, cualquier región arbitraria en el espacio se puede seleccionar como volumen de control; no hay reglas concretas para esta selección, pero una que sea apropiada hace más fácil el análisis. [17]

##### *4.1.1.2. Balance de masa*

Cuando en el entorno existe un proceso, es de suma importancia que los ingenieros estudien el balance de materia, siendo este el computo exacto de las materias que entran, salen, se acumulan, aparecen y desaparecen en una zona en un determinado período transformativo.

Es aplicable el balance de materia en los procesos y operaciones de tipo continuo o discontinuo, se aplica a cualquier sistema al que se hayan definido sus fronteras, no importa si su naturaleza es física, química o abstracta, para fines de esta tesis, al mencionar balance de masa o materia nos referimos al balance de algas.

Proceso discontinuo.- En este caso, la materia entra en la zona considerada y sale después del periodo de funcionamiento, refiriéndose el balance a este periodo y expresándose matemáticamente de la siguiente manera:

$$E = S + A + D$$

Donde:

- E = materia que entra.
- S = materia que sale.
- A = materia que se acumula.
- D = materia que es desaparecida.

Este balance se aplica a todo, sin distinción en la naturaleza; teniendo el termino D nulo al aplicar el principio de conservación de la materia.

Balance total.- Este se aplica a todo sin distinción de naturaleza; convirtiéndose el termino D nulo como principio de conservación.

Balance parcial.- Aplica para cualquiera de las fases que intervienen en el proceso; pudiéndose tantos balances parciales se consideren.

Proceso continuo.- En este proceso, las partículas entran continuamente al aparato y salen del mismo modo; modificándose paulatinamente al comienzo del funcionamiento, hasta llegar a un estado estacionario caracterizado por la constancia de presión, temperatura, concentraciones, etc.

La diferencia esencial con el proceso discontinuo es que a pesar de que estas condiciones son constantes en el tiempo, pueden variar de un punto a otro en el sistema.

Este balance ocurre una vez alcanzado el estado estacionario, siendo válido en cualquier intervalo de tiempo; es cuando no puede haber una acumulación de materia y la ecuación intervendrán los flujos de masa y peso, siendo independientes del intervalo, teniendo como ecuación:

$$E = S + D$$

Donde:

- E = materia que entra.
- S = materia que sale.
- D = materia que es desaparecida. (Velocidad de transformación).

Puede ser también integral teniendo a  $E = S$  siendo E la suma de los flujos de entrada y S, la suma de los flujos de salida. Puede ser parcial como D la velocidad de desaparición del componente o fase. [18]

#### 4.1.1.3. Balance hidráulico

Estas técnicas son un medio para solucionar importantes problemas hidrológicos teóricos y prácticos; a partir del estudio de estas técnicas es ‘posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones a través de la influencia humana.

Con el conocimiento del balance hidráulico, se puede obtener un uso más racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo y mejora del control y redistribución de los mismos.

El balance hidráulico se basa en el principio de conservación de las masas, también conocida como la ecuación de la continuidad.

Estableciendo que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre los gastos de entrada y de salida será determinada por la variación del volumen de agua almacenada.

Para la obtención del balance hidráulico, implica mediciones de almacenamientos y flujos de agua, aunque algunas pueden eliminarse en función del volumen y periodo de tiempo utilizados para el cálculo.

La ecuación general del balance hidráulico para cualquier zona, cauce natural o masa de agua indica los valores relativos de entrada, salida del flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona.

En general, las entradas del balance hidráulico comprenden:

- La precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo;
- Las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera ( $Q_i$ );

En general, las salidas del balance hidráulico comprenden:

- Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua (E);
- La salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada ( $Q_e$ );
- El volumen de agua almacenada ( $\Delta S$ ), cuando las entradas superan a las salidas aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye.

Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación [19]:

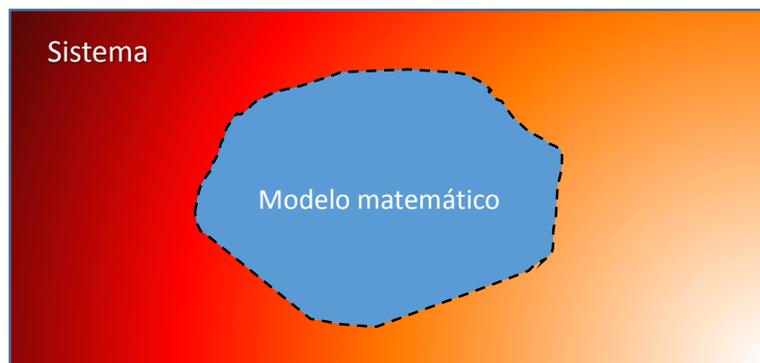
$$P + Q_i - Q_e - E - \Delta S = 0$$

#### 4.1.1.4. Cinética del crecimiento y acumulación de algas

Se puede entender en una forma muy general por modelo una descripción de un cierto fenómeno (físico, biológico, social, psicológico, etc.) mediante una interpretación particular; dicha interpretación puede involucrar el uso de símbolos que satisfagan una determinada relación de correspondencia. Esto comúnmente lleva a modelos matemáticos de los cuales Rutherford Aris proporcionó la siguiente definición, un modelo matemático es una representación en términos

matemáticos de ciertos aspectos (atributos) de un sistema no-matemático. Para aclarar esta definición, se considera un fenómeno particular que tiene lugar en un sistema (no matemático) que se desea modelar. Si se acepta que dicho fenómeno puede describirse mediante atributos que lo caracterizan, entonces se puede formar un conjunto universal a partir de los atributos. De esta manera, un modelo matemático es un subconjunto del universo de atributos que representa al fenómeno estudiado.

Debe ser claro, entonces, que un modelo se enfoca frecuentemente a describir solo ciertos aspectos (atributos) de un fenómeno que se lleva a cabo en un sistema, esto involucra aceptar ciertas suposiciones y restricciones. Debe enfatizarse que son dichas suposiciones y restricciones las que definen las fronteras de aplicación de un modelo y que no se puede esperar que el modelo ofrezca resultados satisfactorios fuera de dichas fronteras. De esta forma, los modelos matemáticos no sólo constan de un conjunto de ecuaciones sino también de suposiciones y restricciones que acotan sus fronteras y definen su campo de aplicación (**Figura 11**).



**Figura 11.-** Elementos de un modelo matemático.  
(- - -) Suposiciones y restricciones

Procedimiento del modelado

1. Planteamiento del modelo.  
(*teoría de reactores*)
2. Solución del modelo.  
(*Algebra*)
3. Análisis de los resultados.  
(*Estadística*)

El planteamiento de un modelo no está, por lo general, completo con el planteamiento de ecuaciones de balance, esto debido a que es deseable contar con ecuaciones que involucren una variable dependiente y una (o más) variables independientes, aunque esto no siempre es posible. Para cumplir con este objetivo se utilizan relaciones constitutivas auxiliares tales como las leyes de Newton, Fick, Fourier, Ohm, velocidades de reacción, datos de propiedades termodinámicas, relaciones para estimar coeficientes de transporte, entre muchas otras, las cuales en ocasiones involucran imponer ciertas suposiciones al modelo. En la práctica, algunas de estas relaciones auxiliares son empíricas y contienen coeficientes ajustables cuyos valores se determinan experimentalmente y esto suele involucrar ajustes estadísticos de datos que se obtienen a partir de los diseños experimentales [20].

Para los fines que persigue esta tesis, se desarrolla el modelo matemático para establecer las medidas de control del crecimiento y acumulación de algas en un cuerpo de agua, para lo cual se tienen variables relacionadas entre sí, esto sugiere conocer con precisión cada uno de los datos que intervendrán y pondrán a prueba nuestro éxito o fracaso.

Dentro del modelo matemático, se utilizan los siguientes conceptos:

Masa.- Magnitud de carácter físico que permite indicar la cantidad de materia contenida en un cuerpo. Dentro del Sistema Internacional, su unidad es el kilogramo ( $kg$ ).

Volumen.- Magnitud física que informa sobre la extensión de un cuerpo en relación a tres dimensiones (alto, largo y ancho), su unidad es el metro cúbico ( $m^3$ ).

Concentración.- Cantidad de sustancia o materia que se encuentra en cada unidad de volumen. Sus unidades son ( $kg/l$ ).

Caudal.- Cantidad de volumen que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo, sus unidades son ( $l/s$ ).

Gasto.- Volumen de una sustancia que fluye a través de una superficie de área definida durante un periodo de tiempo determinado, su unidad es ( $m^3/s$ ).

Flujo másico.- Cantidad de masa que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo se conoce como flujo másico; sus unidades son ( $kg/s$ ).

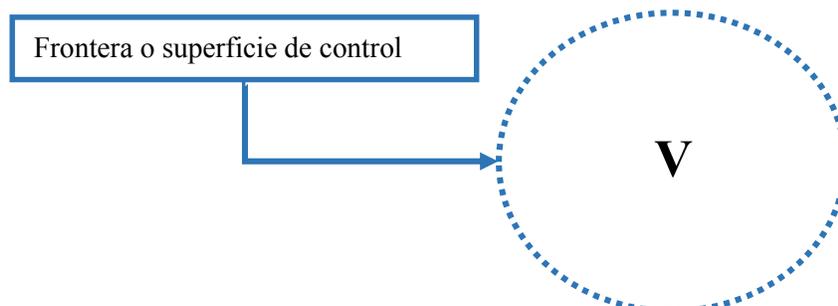
$$\dot{m} = Q \cdot c$$

Donde:

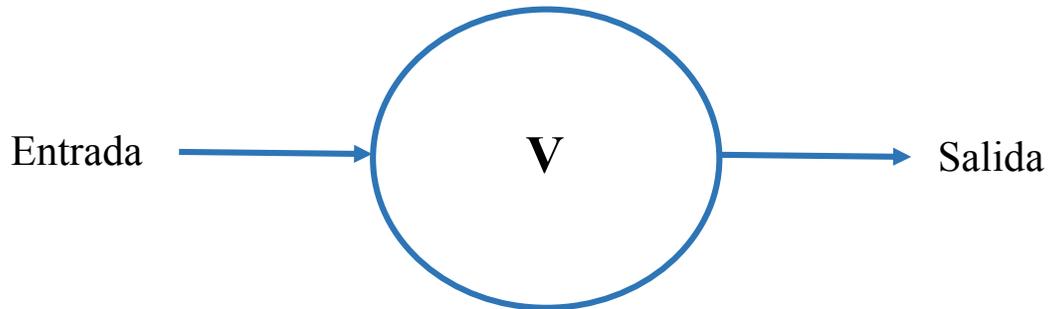
- $\dot{m}$  = flujo másico
- $Q$  = Caudal del flujo de trabajo ( $l/s$ )
- $c$  = Concentración de materia en el volumen de control ( $kg/l$ )

### **Balance de masa**

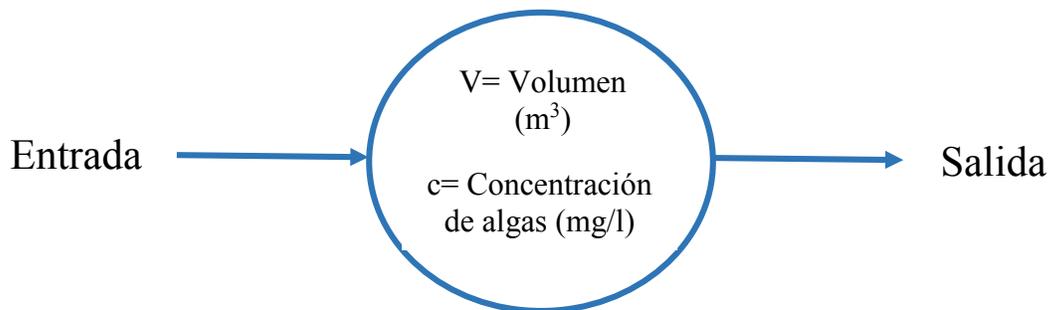
Para fines de esta tesis, al mencionar balance de masa, nos referimos al balance de algas y para poder realizarlo es necesario proponer un volumen de control ( $V$ ), del cual conozcamos las entradas y salidas de flujos para poder establecer el balance de materia y energía al interior del mismo, en este caso en particular nuestro Volumen de control será nuestro lago.



El volumen de control como se menciona anteriormente se caracteriza por tener entradas y salidas y que además funcionen como frontera, para lo cual podemos expresar gráficamente de la siguiente manera:



El elemento principal para poder realizar el balance de masas, es la concentración ( $c$ ) de cualquier materia en particular, en este caso representará la concentración de algas, de tal manera que su representación dentro de nuestro esquema queda de la siguiente manera:



En la ecuación de Balance de Masas, tenemos que:

$$E = S - G + A + C$$

Donde:

- $E$  = materia que entra
- $S$  = materia que sale
- $G$  = materia que se genera
- $A$  = materia que se acumula
- $C$  = materia que se consume

Al despejar la acumulación, que para fines de este trabajo es el factor de interés, la ecuación la definimos como:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

La acumulación es la variación de la concentración con respecto del tiempo, como ocurre en todo el sistema multiplicamos por su volumen, de esta forma se define como:

$$\text{Acumulación} = V \cdot \frac{dc}{dt}$$

La generación, está dada por una velocidad de generación ( $k$ ), multiplicada por la concentración ( $c$ ) y por el volumen ( $V$ ).

$$\text{Generación} = k \cdot c \cdot V$$

De la misma forma, la materia también puede consumirse, con una velocidad de generación negativa ( $-k$ ), multiplicada por la concentración ( $c$ ) y por el volumen ( $V$ ) [21].

$$\text{Consumo} = -k \cdot c \cdot V$$

Nuestras variables de frontera son las siguientes:

Las entradas estarán definidas por un gasto de entrada ( $Q_i$ ) multiplicada por la concentración ( $c$ ).

El gasto de entrada representa la sumatoria de diferentes corrientes o flujos que entran al lago como:

- Alimentación proveniente de la PTAR.
- Escurrimientos superficiales.
- Precipitación.
- Descargas de los puestos cercanos al lago.

Para fines prácticos, en el balance de masas, tomaremos el flujo másico de entrada de escurrimientos superficiales, precipitación, descargas de los puestos cercanos al lago igual a cero debido a que no existe concentración de algas en ninguno de estos supuestos.

La siguiente expresión que representa las entradas en nuestro volumen de control es:

$$\text{Entrada} = Q_i \cdot c$$

El gasto de salida representa la sumatoria de diferentes corrientes o flujos que salen de nuestro lago como:

- El vertido del agua hacia el drenaje ( $Q_v$ )
- Evaporación ( $Q_{ev}$ )
- Usos para riego ( $Q_u$ )
- Infiltración ( $Q_{inf}$ )

En el balance de masas se considera el flujo másico de salida de la evaporación y la infiltración igual a cero debido a que no existe una concentración de algas; tenemos entonces la siguiente expresión que representa el flujo másico de salida en nuestro volumen de control:

$$\text{Salida} = \sum Q_e \cdot c$$

En la **Tabla 6** se presenta el análisis de la presencia de concentración de algas en las entradas y salidas de nuestro cuerpo de agua.

**Tabla 6.** Presencia de algas en las corrientes de entrada y de salida.

<b>Gasto</b>	<b>Flujo o corriente</b>	<b>Concentración de algas</b>
<b>Entrada</b>	Alimentación de PTAR	No
<b>Entrada</b>	Escurrimientos Superficiales	No
<b>Entrada</b>	Lluvia	No
<b>Entrada</b>	Puestos cercanos al lago	No
<b>Entrada</b>	Aportación visitantes	No
<b>Salida</b>	Vertido	Si
<b>Salida</b>	Evaporación	No
<b>Salida</b>	Usos	Si
<b>Salida</b>	Infiltración	No
<b>Salida</b>	Corriente sometida a proceso de remoción de algas	Si

La concentración de algas en la entrada al lago es igual a cero, debido a que el agua residual tratada que proviene de la PTAR no contiene esta materia, sin embargo existe una concentración en las corrientes de salida como en el caso particular del vertido, usos y de remoción, a los cuales les daremos las siguientes expresiones.

- $Q_v = \text{Gasto de vertido}$
- $Q_u = \text{Gasto de usos (riego)}$
- $Q_r = \text{Gasto de recirculación}$

El flujo másico de recirculación se multiplica por una tasa de eficiencia (E), que corresponde a un proceso de remoción de algas como el de coagulación-floculación-sedimentación, por lo tanto nuestra expresión es:

$$\text{Salida de microalgas por remoción} = E \cdot Q_r \cdot c$$

Esta tasa de eficiencia está definida por:

$$E = \frac{(c - c_r)}{c}$$

Donde:

- $c = \text{Concentración general del lago}$
- $c_r = \text{Concentración de recirculación}$

La ecuación de acumulación es:

$$\text{Acumulación} = \text{Entra} - \text{Sale} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

Al expresar esta misma ecuación en términos de cada factor, se obtiene de la siguiente manera:

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = (Q_i \cdot c) - (Q_v + Q_u + EQ_r)c + (k \cdot c \cdot V) - (-k \cdot c \cdot V)$$

Al tomar en cuenta que la concentración de algas en las entradas es igual a cero, este término se elimina, asumimos que el consumen algas en el lago es despreciable, por tal motivo también se elimina este término quedando de la siguiente manera:

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = \overset{0}{(Q_i \cdot c)} - (Q_v + Q_u + EQ_r) \cdot c + (k \cdot c \cdot V) - \overset{0}{(-k \cdot c \cdot V)}$$

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = -(Q_v + Q_u + EQ_r) \cdot c + (k \cdot c \cdot V)$$

Al dividir ambos lados de la ecuación entre el Volumen ( $V$ ), tenemos que:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{(Q_v + Q_u + EQ_r)}{V} \cdot c + (k \cdot c)$$

Con el fin de simplificar la ecuación, suponemos que la concentración de algas en el lago es homogénea, por lo que la concentración en cualquier punto del lago es la misma, por tal motivo podemos factorizar dicho parámetro en nuestra ecuación:

$$\frac{dc}{dt} = \left[ k - \frac{(Q_v + Q_u + EQ_r)}{V} \right] \cdot c$$

Los términos que no son función de la concentración y se mantienen constantes en el análisis se agrupan en un factor que se definen como:  $\alpha = \left[ k - \frac{(Q_v + Q_u + EQ_r)}{V} \right]$ , de tal manera que nuestra ecuación se define por:

$$\frac{dc}{dt} = \alpha \cdot c$$

Al agrupar términos tenemos que:

$$\frac{dc}{c} = \alpha dt$$

Para resolver, integramos en ambos lados:

$$\int \frac{dc}{c} = \alpha \int dt$$

Como resultado, obtenemos que:

$$\ln c - \ln c_0 = \alpha \cdot t$$

De esta manera, llegamos a la ecuación que correlaciona la concentración de algas en función del tiempo:

$$\ln c = \alpha \cdot t + \ln c_0$$

La ecuación nos permite evaluar la concentración de algas con respecto al tiempo y determinando la pendiente, en la representación gráfica, obtenemos el valor de ( $\alpha$ ).

Así mismo para obtener los caudales necesarios para eliminar la acumulación de algas, se realiza el siguiente análisis:

De la ecuación:

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = -(Q_v c + Q_u c + EQ_r c) + (k \cdot c \cdot V)$$

Considerando que el término de acumulación se iguala a cero, que es el objetivo que se persigue:

$$0 = -(Q_v c + Q_u c + EQ_r c) + (k \cdot c \cdot V)$$

Agrupando los caudales de salida en  $Q_s = Q_v + Q_u$ , entonces:

$$(Q_s c + EQ_r c) = (k \cdot c \cdot V)$$

Factorizando c:

$$(Q_s + EQ_r) = (k \cdot V)$$

El significado físico de esta expresión es que para eliminar la acumulación de algas la suma de los caudales de salida es igual a la tasa de producción de algas en el volumen de control, de esta expresión resultan las dos alternativas que se aplican en el plan de acciones:

1. No se utiliza un método físico y/o químico para el retiro de algas, de tal forma que la expresión  $(EQ_r) = 0$  por lo tanto  $(Q_s) = (k \cdot V)$  Se requiere alimentar al lago una caudal tal que después de restar las pérdidas, vierta en el efluente del lago una cantidad igual a  $k \cdot V$ .
2. Se emplea un método físico y/o químico para propiciar la remoción de algas de una corriente que una vez libre de algas regrese al lago, de tal forma que al lago solo se alimente un caudal igual a las pérdidas por evaporación e infiltración para mantener los niveles constantes

#### *4.1.1.5. Procesos y eficiencia de la remoción de las algas.*

Los procesos utilizados para remover eficientemente algas son la flotación y la coagulación-floculación y filtración. Estos métodos sólo permiten eliminar las algas, pero no sus endotoxinas.

Estos compuestos extracelulares, causantes del olor y sabor del agua, se suprimen solamente mediante la aplicación de procesos fisicoquímicos: ozonación y adsorción con carbón activado, la presencia de estos elementos es relevante en embalses cuyo fin es el abastecimiento de agua potable, para el caso en estudio su presencia no es relevante.

Para fines del trabajo se seleccionó como método para la remoción de algas el proceso fisicoquímico de coagulación-floculación-sedimentación, el cual funciona de la siguiente forma:

### **Coagulación**

La coagulación, es la primera etapa del proceso que desestabiliza las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, en consecuencia elimina las materias en suspensión, la turbiedad, la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos.

Este proceso desestabiliza las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

La coagulación es un tratamiento eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado.

El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas. Por lo tanto que se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada.

### **Floculación**

En la segunda etapa que corresponde a una mezcla lenta tiene por objetivo permitir el contacto entre los flóculos, la turbiedad y el color, la mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad pero no muy grande, ya que los flóculos corren el riesgo de romperse; aún si el tiempo es no más del tiempo óptimo de floculación.

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar.

### **Sedimentación**

Se trata de una operación de separación sólido-fluido en la que las partículas sólidas de una suspensión, más densas que el fluido, se separan de éste por la acción de la gravedad. Es una operación controlada por la transferencia de cantidad de movimiento, esta es la tercera etapa.

La sedimentación se utiliza para separar las partículas sólidas dispersas en un líquido. La diferencia de densidades entre las partículas sólidas y el líquido hace que, aunque éste último tenga un movimiento ascendente y las partículas sólidas sedimenten, depositándose en el fondo de donde

son eliminadas en forma de lodos. La viscosidad del líquido frena las partículas sólidas, que deben vencer el rozamiento con el líquido en el movimiento de caída.

En este proceso las partículas sólidas ceden parte de su cantidad de movimiento a las moléculas del líquido de su alrededor. Cuanto mayor sea la viscosidad del líquido, tanto más se frena el movimiento de las partículas. Las moléculas del líquido, aceleradas por contacto con el sólido transmiten su movimiento a capas de líquido más alejadas debido a las interacciones intermoleculares, de las que la viscosidad es una medida. La operación de sedimentación está, pues, controlada por el transporte de cantidad de movimiento [22].

## 4.2. Calibración de la ecuación

La ecuación  $\ln c = \alpha \cdot t + \ln c_0$  obtenida a partir del balance de masas, fue sometida a una calibración en un caso real y particular.

En este caso hicimos la calibración del modelo matemático en el Lago ubicado en la primera sección del Bosque de Chapultepec.

### 4.2.1. Funcionamiento del lago de Chapultepec

Hoy en día la PTAR “Chapultepec” tiene una descarga de  $Q_i = 27$  l/s para el abastecimiento de la primera sección y sus respectivos lagos. En los lagos de esta primera sección se encuentra un sistema de tratamiento de agua y un sistema de recirculación.

En este sistema se aplica un proceso de floculación-sedimentación para la remoción de algas.

En el caso de estos cuerpos de agua para mantenerlos en buen estado se utiliza el sistema de coagulación-floculación-sedimentación anteriormente descrito, el coagulante aplicado para este sistema es el Policloruro de Aluminio ( $Al_2(OH)_3Cl$ ), “PAC”.

El policloruro de aluminio es un coagulante inorgánico a base de sales de aluminio polimerizadas, utilizado en un sinnúmero de procesos industriales.

El policloruro de aluminio desestabiliza los microorganismos y las partículas coloidales, permitiendo que estas se junten entre sí, formando coágulos que posteriormente se aglomeran conformando flóculos de mayor tamaño enviándolos hacia el fondo del tanque por efecto de la gravedad. Su formación depende de una gran variedad de condiciones como el pH, tipo de mezcla, el periodo de sedimentación y la circulación del lodo entre otras.

El proceso de clarifloculación se realiza en un edificio a un costado del lago mayor y antes de la calle Av. Reforma, donde tienen equipos de bombeo y de filtros, ahí se lleva a cabo la aplicación del PAC y se da la coagulación y la floculación, mientras la sedimentación se lleva a cabo en el “Canal del Quijote” retornando el agua clarificada al lago con un Caudal  $Q_r = 40$  l/s, como se muestra en la **Figura 12**.



**Figura 12.** Sistema de recirculación existente y en operación.

Por medio de un estudio realizado por la CONAGUA se obtuvo la batimetría de los lagos de Chapultepec de la 1ª Sección, como resultado de este estudio se determinó que los volúmenes aproximados de los lagos son de 42,000 m<sup>3</sup> del lago mayor y 12,000 m<sup>3</sup> del lago menor, con un total del volumen  $V = 54,000 \text{ m}^3$ .

### 4.3. Monitoreo de la calidad del agua en los lagos

Para poder entrar a las instalaciones del Lago de Chapultepec, 1ª sección a realizar el monitoreo, se solicitó autorización a la Dirección General del Bosque a través de una carta expedida por la Facultad de Ingeniería. Ver **Anexo 1**. Solicitud de acceso y respuesta.

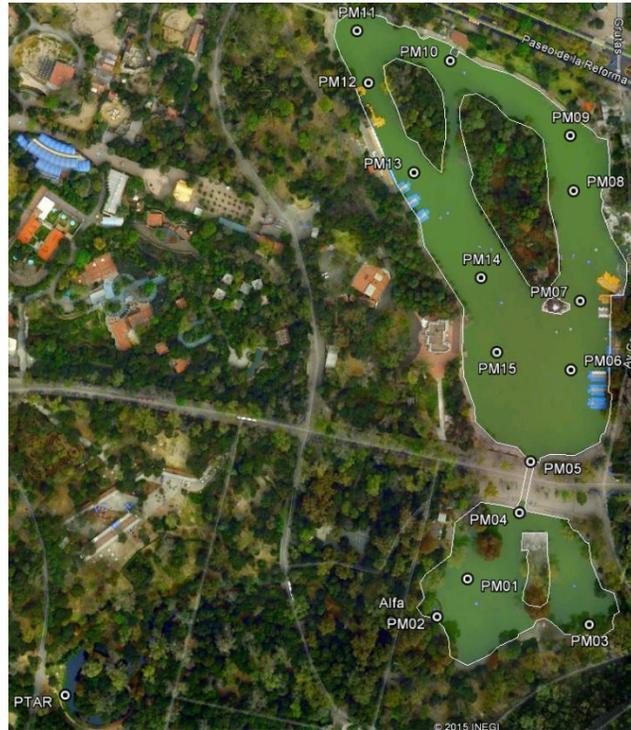
Se ejecutó un monitoreo de la calidad del agua en el lago de acuerdo a los lineamientos establecidos a continuación:

#### 4.3.1. Muestreo

Para elegir los puntos de muestreo, se trazaron líneas equidistantes sobre un plano y se tomaron puntos que consideramos, alcanzan a englobar la calidad general del lago, resultando 17 puntos de muestreo (PM) en los cuales se requirió tomar una muestra diaria de la calidad del agua, los cuales fueron:

- 1 punto en la descarga de agua residual, llamado PTAR.
- 1 punto en la terminación del Canal del Quijote, llamado Alfa.
- 4 puntos en el Lago Menor.
- 11 puntos en el Lago Mayor.

En la **Figura 13**. Se muestran los puntos de monitoreo en los lagos de Chapultepec, 1ª sección.



**Figura 13.** Vista en planta de los puntos de monitoreo

#### 4.3.2. Parámetros

Debido a las limitaciones de equipo para medición, acceso a laboratorios y la falta de recursos, sólo se pudieron muestrear los siguientes parámetros:

- Transparencia
- pH
- Sólidos disueltos totales (SDT)
- Conductividad
- Oxígeno disuelto (OD)
- Turbiedad
- Temperatura del agua

### 4.3.3. Equipo de Campo

Para la obtención de los parámetros se utilizaron los siguientes equipos:

- Disco SECHHI
- Multiparamétrico
- Equipo para medición de oxígeno disuelto
- Turbidímetro

#### Disco SECHHI

El “Disco SECHHI” es utilizado para medir la transparencia, es un círculo de 20 cm de diámetro, dividido en cuadrantes pintados alternadamente de negro y blanco, atado a una cuerda graduada. El disco se sumerge del lado sombreado de la embarcación hasta que deja de verse, se registra la profundidad.

#### Multiparamétrico

Este es un equipo de la marca Hanna con el cual se midió el pH del agua, los Sólidos disueltos totales y Conductividad eléctrica del agua. Está equipado con sensor que se introduce directamente al cuerpo de agua.

#### Oxímetro

Este equipo permite medir la concentración de oxígeno disuelto en el agua. La medición se efectúa mediante un sensor que se introduce directamente al cuerpo de agua.

#### Turbidímetro

Para medir la turbiedad del agua se usó un equipo de la marca Hanna, los valores de turbiedad obtenidos se expresan en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez. Este equipo tiene un rango de 0 a 1000 NTU y dos escalas de medición, de 0 a 50 y de 50 a 1000. El equipo selecciona automáticamente el rango apropiado, de acuerdo con la turbidez de la muestra.

Se adjunta **Anexo 2** con memoria fotográfica, del funcionamiento de los lagos.

### 4.3.4. Frecuencia

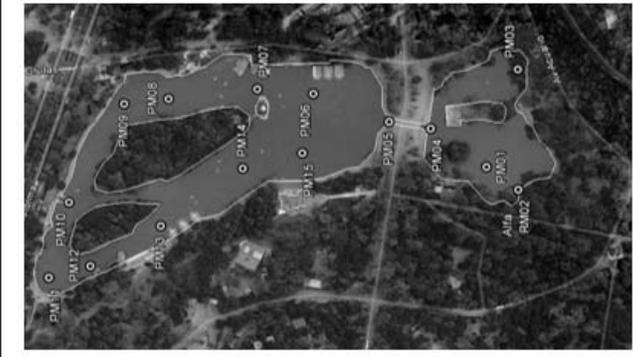
La frecuencia del monitoreo fue durante un periodo de 10 días continuos, en un horario de 11:00 am a 13:00 pm, muestreando los puntos señalados. El recorrido en cuerpo de agua se realizó en lancha movida por remos.

### 4.3.5. Registro

Los resultados fueron registrados en un formato diseñado para este fin, que se muestra en la **Figura 14**.

		FORMATO DE DATOS DE CAMPO MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.																
FECHA:		HORA:					CLIMA:					MUESTREO POR:						
Muestra																		
PARAM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta	
SECCHI																		
pH																		
SDT																		
OD																		
Temp.																		
Turb.																		
Cond.																		

**Croquis de ubicación**



**Observaciones:**

**Figura 14.** Formato datos de campo

En el **Anexo 3**, se integran los formatos con los resultados obtenidos.

## 4.4. Resultados

Con los datos registrados del monitoreo, se obtuvo el valor promedio de cada lago, así como el promedio general. El comportamiento presentado de los parámetros evaluados es el siguiente.

### Transparencia

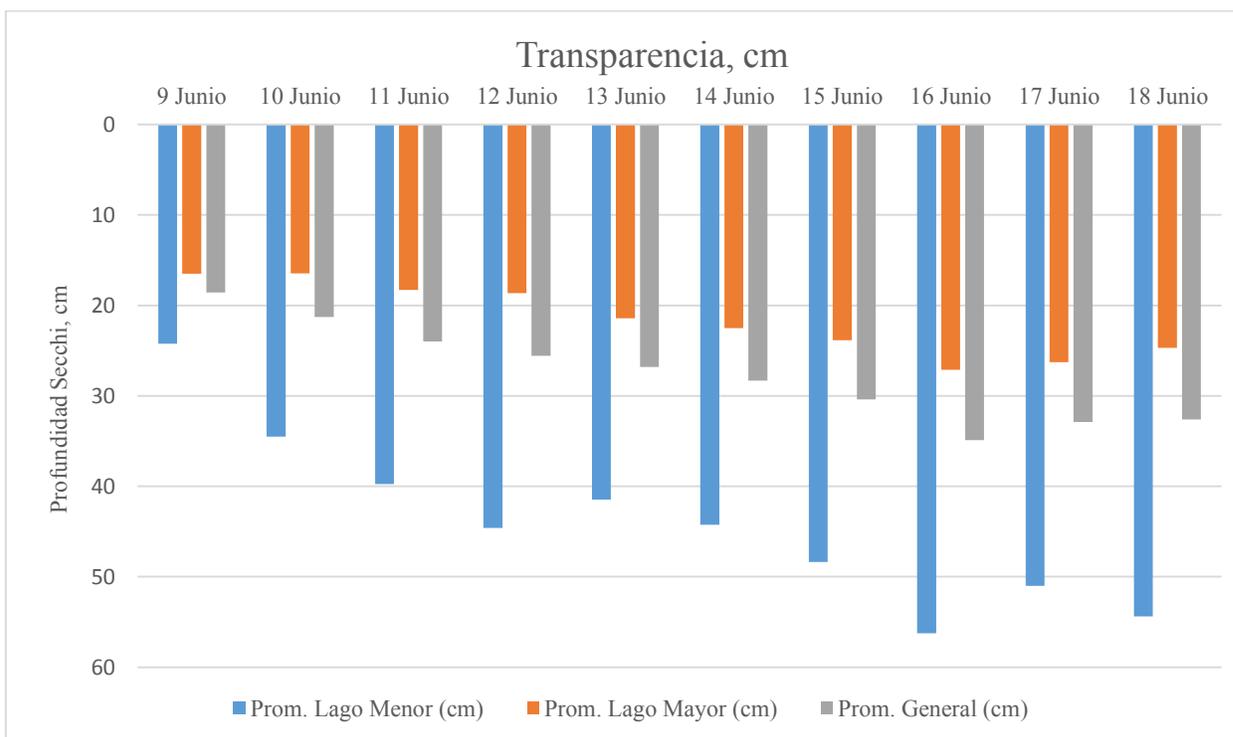
Los valores registrados nos indican un cambio en la transparencia a través del tiempo, ya que se observa que en el día uno se tiene un valor en el promedio general de 18.57 llegando a un valor de 32.67 en el día diez, esto nos indica una mejora en las condiciones de transparencia así como la eficiencia del tratamiento. En la **Tabla 7**, se indican los valores promedios obtenidos por día.

**Tabla 7.** Promedio de los lagos, Transparencia.

Día	Prom. Lago Menor (cm)	Prom. Lago Mayor (cm)	Prom. General (cm)
9 Junio	24.25	16.50	18.57
10 Junio	34.50	16.45	21.27
11 Junio	39.75	18.27	24.00
12 Junio	44.60	18.64	25.56
13 Junio	41.48	21.41	26.80
14 Junio	44.25	22.50	28.30
15 Junio	48.38	23.86	30.40
16 Junio	56.25	27.14	34.90
17 Junio	51.00	26.27	32.90
18 Junio	54.38	24.68	32.60

En la **Gráfica 1** se muestra la representación de los datos, y puede apreciarse el aumento de la transparencia con respecto al tiempo.

**Gráfica 1.** Transparencia.



## Potencial de Hidrógeno (pH)

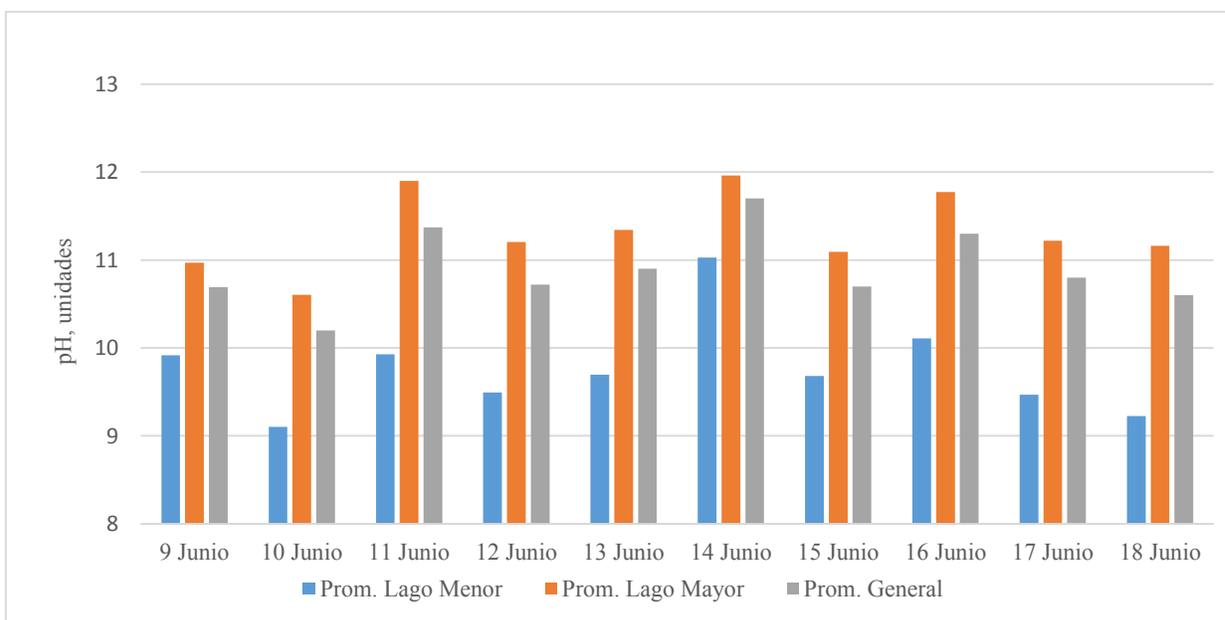
Los valores del promedio general de este parámetro fueron desde 10.69 en el día uno hasta 10.6 en el día diez, no existe gran variación en estos datos, por lo que indica que el pH se mantuvo prácticamente constante y que el producto “PAC” no afecta considerablemente este parámetro y no representa un riesgo para la vida acuática. En la **Tabla 8** se indican los valores promedio obtenidos por día.

**Tabla 8.** Promedio de los lagos, pH.

Día	Prom. Lago Menor	Prom. Lago Mayor	Prom. General
9 Junio	9.92	10.97	10.69
10 Junio	9.10	10.60	10.20
11 Junio	9.93	11.90	11.37
12 Junio	9.49	11.21	10.72
13 Junio	9.70	11.34	10.90
14 Junio	11.03	11.96	11.70
15 Junio	9.68	11.09	10.70
16 Junio	10.11	11.77	11.30
17 Junio	9.47	11.22	10.80
18 Junio	9.23	11.16	10.60

En la **Gráfica 2** se muestran los datos obtenidos de pH, se puede observar que prácticamente se mantiene constante, debido a lo anterior mencionado.

**Gráfica 2.** Potencial de Hidrógeno (pH).



### Sólidos disueltos totales

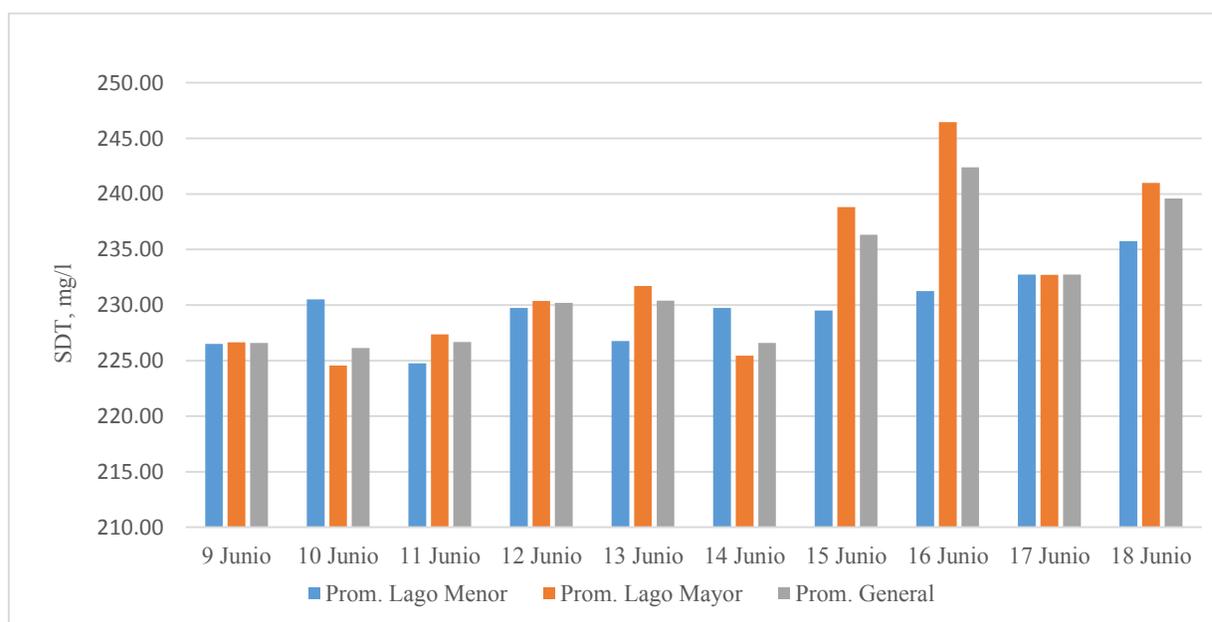
En el registro de este parámetro podemos observar que no existieron cambios significativos y que de igual manera los sólidos disueltos totales se mantuvieron prácticamente constantes, esto es porque el “PAC” trabaja sobre lo particulado, como las microalgas y no tanto en lo disuelto como las sales. En la **Tabla 9** se muestra el promedio de los lagos de este valor.

**Tabla 9.** Promedio de los lagos, Sólidos disueltos totales.

Día	Prom. Lago Menor (mg/l)	Prom. Lago Mayor (mg/l)	Prom. General (mg/l)
9 Junio	226.50	226.64	226.60
10 Junio	230.50	224.55	226.13
11 Junio	224.75	227.36	226.67
12 Junio	229.75	230.36	230.20
13 Junio	226.75	231.73	230.40
14 Junio	229.75	225.45	226.60
15 Junio	229.50	238.82	236.33
16 Junio	231.25	246.45	242.40
17 Junio	232.75	232.73	232.73
18 Junio	235.75	241.00	239.60

En la **Gráfica 3** se muestran los datos obtenidos de los SDT, se puede observar que prácticamente se mantiene constante, debido a lo anterior mencionado.

**Gráfica 3.** Sólidos disueltos totales (SDT).



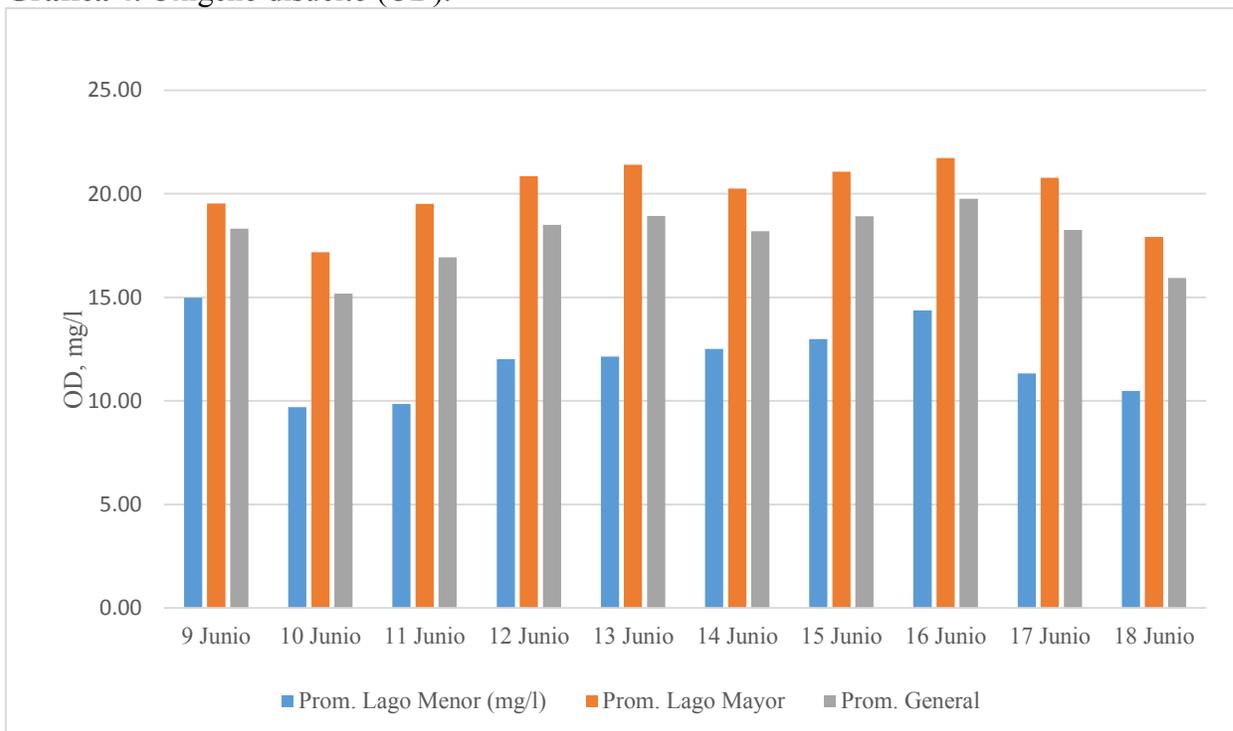
## Oxígeno disuelto

Al igual que los sólidos disueltos, el registro del promedio de este valor se mantiene constante, es probable que exista un cambio relativo de estos tres últimos parámetros pero se notaría en un registro más prolongado. En la **Tabla 10** se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 10.** Promedio de los lagos, Oxígeno disuelto.

Día	Prom. Lago Menor (mg/l)	Prom. Lago Mayor (mg/l)	Prom. General (mg/l)
9 Junio	14.99	19.54	18.32
10 Junio	9.70	17.19	15.19
11 Junio	9.85	19.51	16.93
12 Junio	12.03	20.85	18.50
13 Junio	12.15	21.40	18.93
14 Junio	12.51	20.26	18.19
15 Junio	12.99	21.07	18.91
16 Junio	14.37	21.72	19.76
17 Junio	11.32	20.78	18.26
18 Junio	10.48	17.92	15.94

**Gráfica 4.** Oxígeno disuelto (OD).



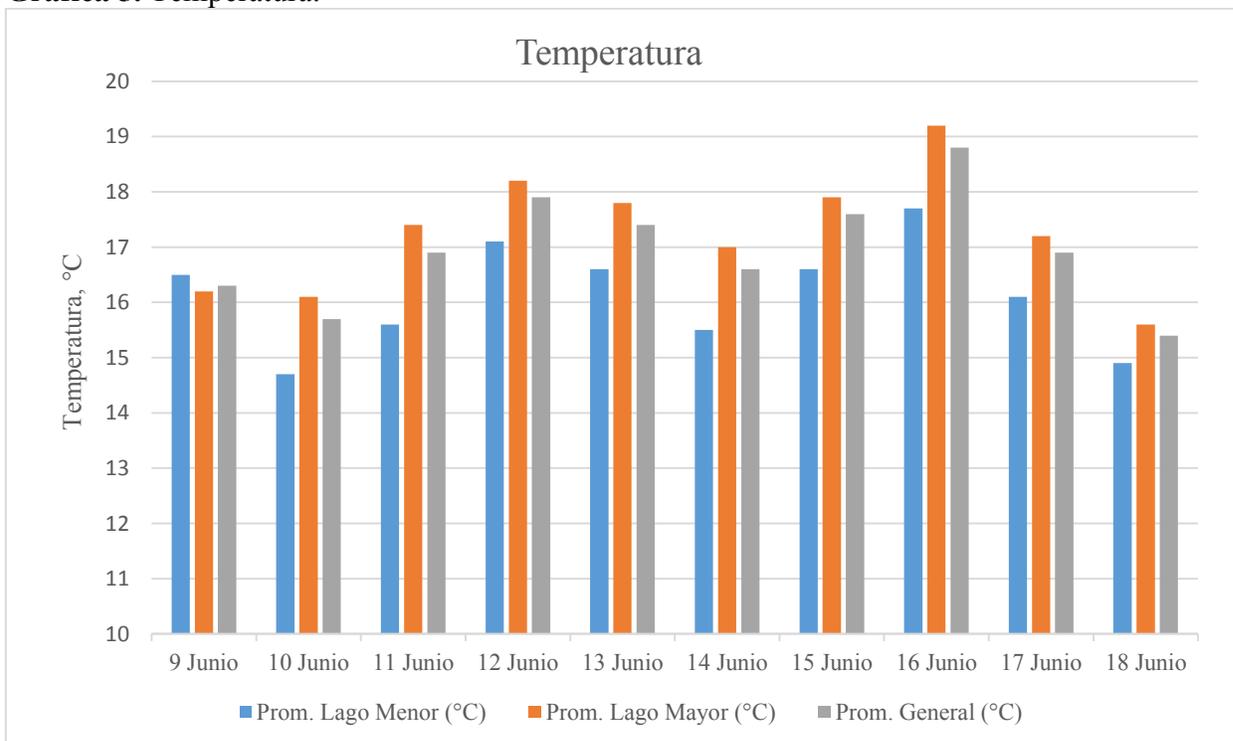
## Temperatura

La temperatura de los lagos fue de igual manera constante, pero este parámetro es afectado en gran medida por el clima, por lo tanto la variación es mínima por encontrarnos en una sola estación del año. En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 11.** Promedio de los lagos, Temperatura.

Día	Prom. Lago Menor (°C)	Prom. Lago Mayor (°C)	Prom. General (°C)
9 Junio	16.50	16.20	16.30
10 Junio	14.70	16.10	15.70
11 Junio	15.60	17.40	16.90
12 Junio	17.10	18.20	17.90
13 Junio	16.60	17.80	17.40
14 Junio	15.50	17.00	16.60
15 Junio	16.60	17.90	17.60
16 Junio	17.70	19.20	18.80
17 Junio	16.10	17.20	16.90
18 Junio	14.90	15.60	15.40

**Gráfica 5.** Temperatura.



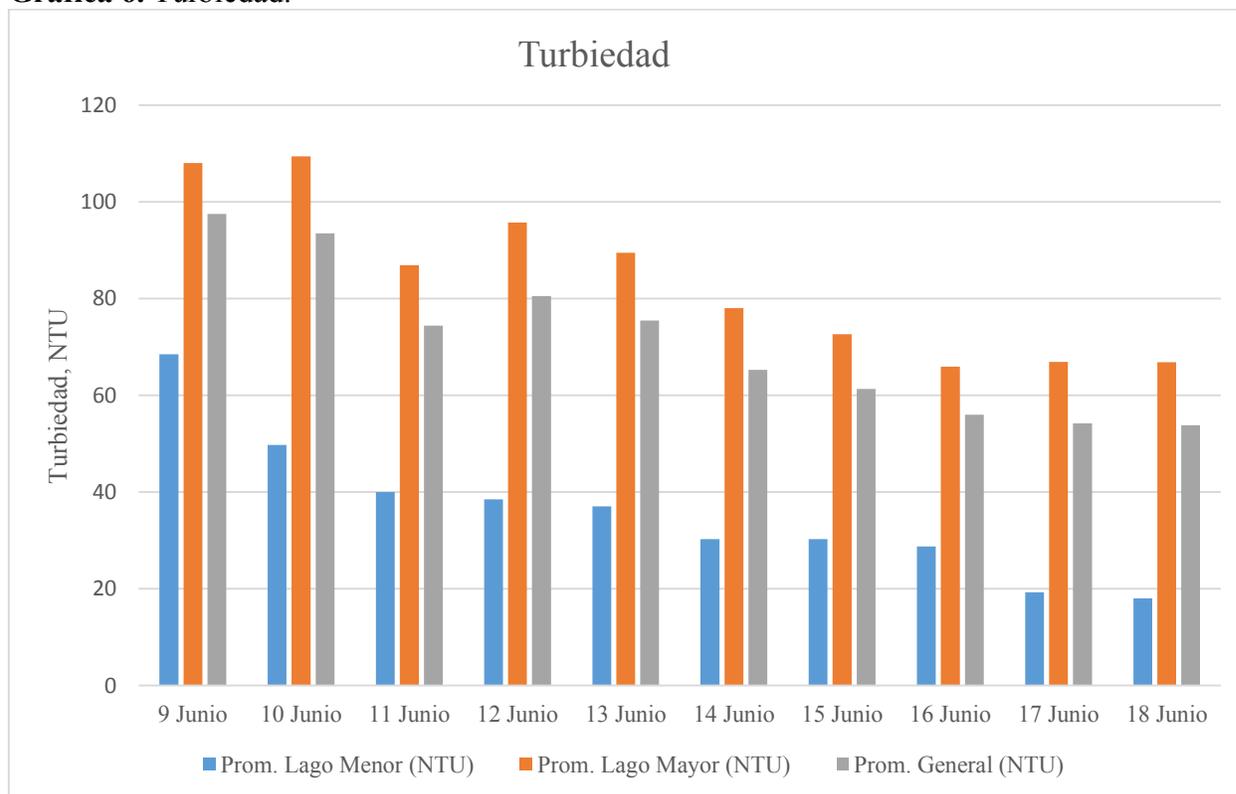
## Turbiedad

En este parámetro se puede percibir el mejoramiento de los lagos, ya que el día uno de nuestro muestreo, en el promedio general, teníamos una turbiedad de 93.50, llegando a una disminución del día diez de 53.80, debido a la eficacia del PAC y la efectiva remoción de algas, en la **Tabla 12** se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 12.** Promedio de los lagos, Turbiedad.

Día	Prom. Lago Menor (NTU)	Prom. Lago Mayor (NTU)	Prom. General (NTU)
9 Junio	68.50	108.00	97.50
10 Junio	49.75	109.36	93.50
11 Junio	40.00	86.91	74.40
12 Junio	38.50	95.73	80.50
13 Junio	37.00	89.45	75.47
14 Junio	30.25	78.00	65.27
15 Junio	30.25	72.64	61.30
16 Junio	28.75	65.91	56.00
17 Junio	19.25	66.91	54.20
18 Junio	18.00	66.82	53.80

**Gráfica 6.** Turbiedad.



El promedio general de los valores obtenidos de los dos cuerpos de agua, se presentan en la **Tabla 13**.

**Tabla 13.** Promedio general de parámetros

FECHA	SECCHI- Transparencia, cm	pH, Unidades	SDT, mg/L	OD, mg/L	Temp, °C	Turbiedad, NTU
9 Junio	18.57	10.69	226.60	18.32	16.29	97.47
10 Junio	21.27	10.20	226.13	15.19	15.73	93.47
11 Junio	24.00	11.37	226.67	16.93	16.91	74.40
12 Junio	25.56	10.72	230.20	18.50	17.92	80.47
13 Junio	26.76	10.90	230.40	18.93	17.44	75.47
14 Junio	28.30	11.71	226.60	18.19	16.61	65.27
15 Junio	30.40	10.72	236.33	18.91	17.59	61.33
16 Junio	34.90	11.33	242.40	19.76	18.78	56.00
17 Junio	32.87	10.75	232.73	18.26	16.93	54.20
18 Junio	32.60	10.64	239.60	15.94	15.41	53.80

Las algas forman parte de los sólidos suspendidos totales en el cuerpo de agua, por lo que el valor de concentración de los sólidos suspendidos es un buen método para conocer la concentración de microalgas, debido a que es un parámetro que se determina en laboratorio, se buscó la forma de correlacionar este parámetro con la turbiedad el cual fue determinado en campo, para este fin se requiere de mediciones simultáneas de turbiedad y sólidos suspendidos en algún cuerpo de agua que contenga microalgas.

Para obtener la correlación de turbiedad y sólidos suspendidos se utilizó una serie de datos proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) que muestran parámetros de la calidad de agua en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Chapultepec” y en los Lagos de Chapultepec de la 1ª Sección registrados desde el año 2007 a 2009 y que relacionan para cada 230 muestras determinaciones simultáneas de turbiedad y sólidos suspendidos totales.

En el **Anexo 4** se presentan los datos empleados para obtener la correlación entre turbiedad y sólidos suspendidos.

La ecuación que correlaciona a la turbiedad con los sólidos suspendidos con una correlación de  $R^2 = 0.9097$ , lo que indica un grado alto de confiabilidad.

$$SST = 0.6873(Turbiedad) + 14.634$$

En la **Tabla 14**, se establecen los valores de los (SST) que se obtuvieron con base a esta ecuación.

**Tabla 14.** Valores SST

FECHA	TIEMPO (DÍAS)	TURBIEDAD (NTU)	SST (mg/l)
9 Junio	1.00	93.50	78.90
10 Junio	2.00	97.50	81.65
11 Junio	3.00	74.40	65.77
12 Junio	4.00	80.50	69.96
13 Junio	5.00	75.47	66.50
14 Junio	6.00	65.27	59.49
15 Junio	7.00	61.30	56.77
16 Junio	8.00	56.00	53.12
17 Junio	9.00	54.20	51.89
18 Junio	10.00	53.80	51.61

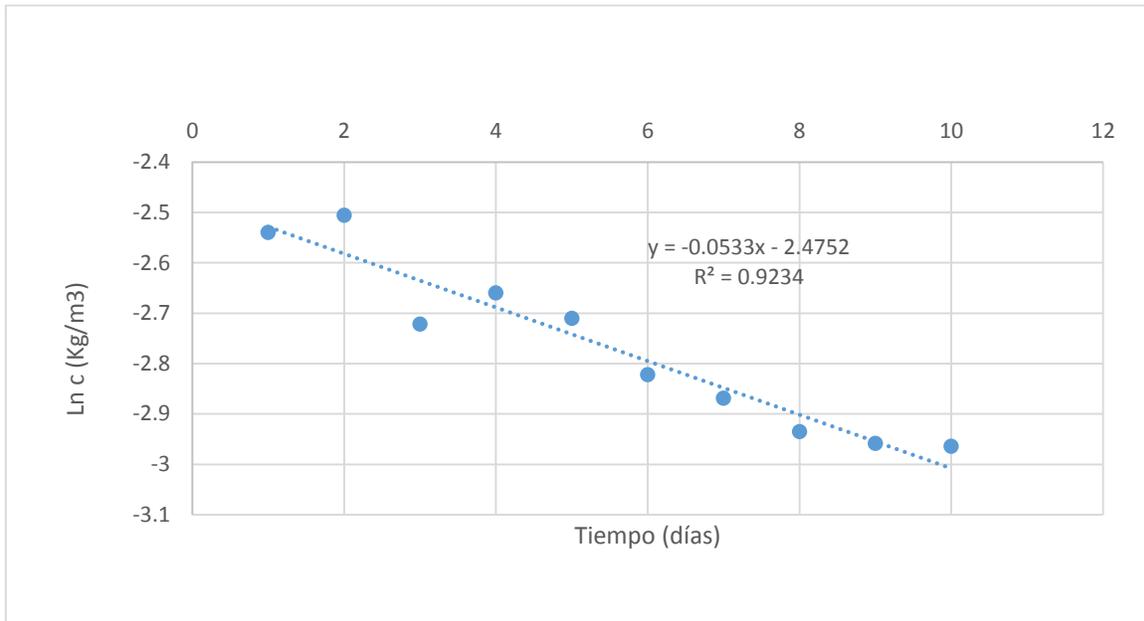
Al retomar nuestra ecuación que nos ayudará a evaluar la concentración de algas con respecto al tiempo  $\ln c = (\alpha \cdot t) + \ln c_0$  y que este logaritmo natural hace referencia a la medición de la concentración de algas en el lago, se tomara a los sólidos suspendidos totales (SST) como una medida indirecta, por lo tanto obtenemos los resultados que se muestran en la **Tabla 15**.

**Tabla 15.** Valores de  $\ln$  SST

LOTE	FECHA	TIEMPO (DÍAS)	TURBIEDAD	SST (mg/l)	SST (kg/m <sup>3</sup> )	$\ln c$
1	18 Mayo	1	93.50	78.90	0.079	-2.54
2	19 Mayo	2	97.50	81.65	0.082	-2.51
3	20 Mayo	3	74.40	65.77	0.066	-2.72
4	21 Mayo	4	80.50	69.96	0.070	-2.66
5	22 Mayo	5	75.47	66.50	0.067	-2.71
6	23 Mayo	6	65.27	59.49	0.059	-2.82
7	24 Mayo	7	61.30	56.77	0.057	-2.87
8	25 Mayo	8	56.00	53.12	0.053	-2.94
9	26 Mayo	9	54.20	51.89	0.052	-2.96
10	27 Mayo	10	53.80	51.61	0.052	-2.96

A partir de los datos presentados en la **Tabla 15** podemos graficar el tiempo en días contra el logaritmo natural de la concentración  $\ln c$ , de acuerdo a la expresión  $\ln c = \alpha \cdot t + \ln c_0$ , que nos representa la variación de la concentración de algas con respecto al tiempo, para que, por medio de mínimos cuadrados, se obtenga una función continua para dichos pares ordenados que mejor se ajuste a los datos. (**Gráfica 7**).

**Gráfica 7.** Variación de la concentración de algas con respecto al tiempo.



La ecuación obtenida es:

$$\ln(SST) = -0.0533t - 2.4752$$

El valor de la pendiente se refiere a nuestro valor  $\alpha$ , este valor tiene como unidades  $\frac{Kg}{m^3 \cdot día}$  lo que indica la producción de algas, por lo tanto encontramos que:

$$\alpha = -0.0533 \frac{Kg}{m^3 \cdot día}$$

En el subcapítulo 4.2.2 aplicamos un cambio de variable en donde nombramos  $\alpha = \left[ k - \frac{(Q_v + Q_u + EQ_r)}{V} \right]$ , en este término, tenemos como incógnitas  $k$ ,  $Q_v$ ,  $Q_u$  y  $E$  que se determinaran a continuación.

El Caudal que se utiliza para riego  $Q_u$ , será un valor estimado, sabiendo que el agua que se extrae para este fin es por medio de una bomba directamente de la pipa, se estima un caudal de 2 l/s operando durante 8 horas, de esta manera tenemos que:

$$V_{ext} = 2(l/s)(3600 s/1 hrs)(8 hrs) = 57,600 l$$

Para poder obtener el Caudal de riego por día se divide entre 86,400 s que corresponden a un día.

$$Q_u = \frac{57,600 l}{86,400 s} = 0.66 l/s$$

Al convertir a  $m^3/día$ , tenemos que:

$$Q_u = (0.66 \text{ l/s}) \cdot \left(\frac{1m^3}{1000 \text{ l}}\right) \cdot \left(\frac{86,400 \text{ s}}{1 \text{ día}}\right) = 57.024 \text{ m}^3/día$$

De esta manera obtenemos el valor del caudal de riego  $Q_u = 57.024 \text{ m}^3/día$ .

El Caudal de vertido  $Q_v$  se obtendrá aplicando el balance hidráulico, por lo tanto tenemos que:

$$Q_e = Q_{ev} + Q_{inf} + Q_u + Q_v$$

La evaporación y la infiltración se desprecian por tratarse de valores muy pequeños, por lo cual queda:

$$Q_e = Q_u + Q_v$$

Al suponer que las pérdidas son muy pequeñas, y por balance hidráulico sabemos que el agua que entra es igual a la que sale:

$$Q_i = Q_e$$

Por lo tanto:

$$Q_i = Q_u + Q_v$$

Despejando para obtener el Caudal de vertido  $Q_v$  tenemos que:

$$Q_v = Q_i - Q_u$$

Los valores de los caudales de entrada  $Q_i$  y de riego  $Q_u$  son valores conocidos, por lo cual sustituimos dichos valores en la ecuación anterior.

$$Q_v = (27 \text{ l/s}) - (0.66 \text{ l/s}) = 26.34 \text{ l/s}$$

Convirtiendo a  $m^3/día$ , tenemos que:

$$Q_v = (26.34 \text{ l/s}) \cdot \left(\frac{1m^3}{1000 \text{ l}}\right) \cdot \left(\frac{86,400 \text{ s}}{1 \text{ día}}\right) = 2,275.77 \text{ m}^3/día$$

De esta manera queda definido el valor del caudal de vertido  $Q_v = 2,275.77 \text{ m}^3/\text{día}$

Para la obtención de la tasa de eficiencia de remoción E la ecuación a resolver es:

$$E = \frac{(c - c_r)}{c}$$

Donde:

- $c = \text{Concentración general del lago}$
- $c_r = \text{Concentración de remoción}$

Para obtener la concentración  $c_r$ , nos basamos en la concentración del punto Alfa, puesto que esta concentración es la mezcla de las concentraciones de remoción y de entrada.

La eficiencia de remoción está dada por concentraciones de algas, si tomamos en cuenta que en la descarga de la planta no existe concentración de esta materia, la concentración de entrada será restada a la concentración del punto Alfa, para trabajar entonces, con concentración de algas.

Por lo tanto, la concentración de remoción  $c_r$  queda expresado de la siguiente manera:

$$c_r = c_m - c_i$$

Donde:

- $c_r = \text{Concentración de remoción}$
- $c_m = \text{Concentración de mezcla}$
- $c_i = \text{Concentración de entrada}$

La concentración en Alfa  $c_m$  la obtenemos por medio de la turbiedad registrada en ese punto, aplicando la ecuación de correlación con sólidos suspendidos totales.

En la **Tabla 16** se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 16.** Valores de SST para el Punto Alfa

PUNTO DE MUESTREO	FECHA (Días)	Turbiedad, (NTU)	SST (mg/l)
Alfa	9 Junio	74.00	65.49
Alfa	10 Junio	12.00	22.88
Alfa	11 Junio	16.00	25.63
Alfa	12 Junio	10.00	21.51
Alfa	13 Junio	15.10	25.01
Alfa	14 Junio	6.00	18.76
Alfa	15 Junio	7.00	19.45
Alfa	16 Junio	6.00	18.76
Alfa	17 Junio	6.00	18.76
Alfa	18 Junio	6.00	18.76
<b>Promedio</b>			25.50

De tal forma obtenemos el valor promedio para este punto, quedando establecido el valor de la concentración de mezclado  $c_m$ .

$$c_m = 25.5(mg/l)$$

De la misma manera, para la determinación de la concentración de entrada  $c_i$ , nos basamos en los datos de turbiedad registrados en este punto, para posteriormente convertirlos por medio de la ecuación de correlación a un valor de sólidos suspendidos totales (SST).

En la **Tabla 17** se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 17.** Valores de SST para el Punto de entrada

PUNTO DE MUESTREO	FECHA	Turbiedad, NTU	SST (mg/l)
PTAR	9 Junio	8.00	20.13
PTAR	10 Junio	9.00	20.82
PTAR	11 Junio	11.00	22.19
PTAR	12 Junio	13.00	23.57
PTAR	13 Junio	16.00	25.63
PTAR	14 Junio	14.00	24.26
PTAR	15 Junio	31.00	35.94
PTAR	16 Junio	13.00	23.57
PTAR	17 Junio	14.00	24.26
PTAR	18 Junio	18.00	27.01
<b>Promedio</b>			24.74

Al obtener el valor promedio para este punto, queda establecido el valor de la concentración de entrada  $c_i$ .

$$c_i = 24.74 \text{ (mg/l)}$$

La concentración general del lago está definida por el valor promedio de los sólidos suspendidos totales, tal como se muestra en la **Tabla 18**:

**Tabla 18.** Promedio de los SST en Lago de Chapultepec, 1ª Sección

FECHA	TIEMPO (DÍAS)	SST (mg/l)
9 Junio	1.00	78.90
10 Junio	2.00	81.65
11 Junio	3.00	65.77
12 Junio	4.00	69.96
13 Junio	5.00	66.50
14 Junio	6.00	59.49
15 Junio	7.00	56.77
16 Junio	8.00	53.12
17 Junio	9.00	51.89
18 Junio	10.00	51.61
<b>Promedio</b>		63.57

De esta manera obtenemos el valor promedio de la concentración general del lago:

$$c = 63.57 \text{ mg/l}$$

Para obtener el valor de  $c_r$  se sustituyen los valores encontrados:

$$c_r = 25.5 \text{ mg/l} - 24.74 \text{ mg/l} = 0.76 \text{ mg/l}$$

Conociendo los valores de las concentraciones tanto general como la de remoción podemos obtener la tasa de eficiencia de remoción, recordando que:

$$E = \frac{c - c_r}{c}$$

Sustituyendo valores, tenemos que:

$$E = \frac{63.57 \text{ mg/l} - 0.76 \text{ mg/l}}{63.57 \text{ mg/l}}$$

$$E = 0.988$$

El caudal de recirculación como mencionamos en el capítulo anterior es de 40 l/s, necesitamos convertirlo a  $m^3/día$  para ser congruentes con las unidades de trabajo, por lo tanto tenemos que:

$$Q_r = (40 \text{ l/s}) \cdot \left(\frac{1m^3}{1000 \text{ l}}\right) \cdot \left(\frac{86,400 \text{ s}}{1 \text{ día}}\right) = 3,456.00m^3/día$$

Si bien sabemos que  $\alpha = \left[k - \frac{(Q_v + Q_u + EQ_r)}{V}\right]$ , podemos despejar el valor de la velocidad de generación k, quedando:

$$k = \left[\alpha + \frac{(Q_v + Q_u + EQ_r)}{V}\right]$$

Al sustituir valores tenemos que:

$$k = \left[-0.0533 + \frac{(2,275.77 \text{ m}^3/día + 57.024 \text{ m}^3/día + (0.988 \cdot 3,456.00 \text{ m}^3/día))}{54,000 \text{ m}^3}\right]$$

$$k = 0.0531 \text{ día}^{-1}$$

Esta tasa de crecimiento y acumulación está calculada para una temperatura de 17°C que es el promedio registrado en el periodo de muestreo.

## 4.5. Alternativa 1. Control del caudal de vertido

Esta alternativa propone producir el caudal suficiente para que por medio del vertido sea desalojada la producción diaria de algas y evitar que las algas generadas por día permanezcan en el sistema, en esta solución no se considera que exista otro tipo de tratamiento como el de recirculación por lo tanto la remoción de algas se elimina, quedando expresado de la siguiente manera:

$$Q_v = k \cdot V$$

$$Q_v = (0.0531 \text{ día}^{-1}) \cdot 54000 \text{ m}^3$$

$$Q_v = 2,867.39 \text{ m}^3/día$$

Convirtiendo este valor a  $l/s$ , tenemos:

$$2,867.39 \frac{m^3}{día} \cdot \left( \frac{1000l}{1m^3} \right) \left( \frac{1día}{86,400s} \right) = 33.18 \text{ l/s}$$

Esto indica que nuestro caudal de vertido necesario para que no exista una acumulación de algas con las condiciones actuales es de  $33.18 \text{ l/s}$ .

En la siguiente tabla se muestra el promedio de la temperatura con la cual obtuvimos la tasa de crecimiento  $k = 0.0531 \text{ día}^{-1}$ .

**Tabla 17.** Promedio de la Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

Día	Promedio general ( $^{\circ}\text{C}$ )
9 Junio	16.3
10 Junio	15.7
11 Junio	16.9
12 Junio	17.9
13 Junio	17.4
14 Junio	16.6
15 Junio	17.6
16 Junio	18.8
17 Junio	16.9
18 Junio	15.4
<b>Promedio T =</b>	
	16.95

El caudal mínimo obtenido para evitar la acumulación de algas es para una temperatura promedio de  $17^{\circ}\text{C}$ .

Se proponen dos temperaturas más dado los cambios de estación, para establecer el caudal necesario que evite la acumulación de algas, en diferentes épocas del año, proponemos una temperatura de verano de  $25^{\circ}\text{C}$  y para invierno, una temperatura de  $12^{\circ}\text{C}$ .

Al aplicar la ecuación  $Q_v = k \cdot V$ , se requiere ajustar el valor de la tasa de crecimiento de algas, para esto se necesita una constante que relacione la velocidad con la temperatura ( $\theta$ ), utilizaremos la ecuación de Arrhenius [23], la cual es:

$$k_{(T)} = k_{17} \cdot \theta^{(T-17)}$$

La constante ( $\theta$ ) tiene un valor promedio de 1.066 [23], y recordando el valor de  $k$  para una temperatura promedio de  $17^{\circ}\text{C}$  es  $0.0531 \text{ día}^{-1}$ , entonces tenemos que para una temperatura máxima de verano de  $25^{\circ}\text{C}$  es:

$$k_{(25)} = k_{17} \cdot \theta^{(25-17)}$$

$$k_{(25)} = 0.0531 \cdot 1.066^{(8)} = 0.0885 \text{ día}^{-1}$$

Para obtener el caudal necesario para desalojar las algas generadas, tenemos que:

$$Q_v = k \cdot V$$

$$Q_v = 0.0885 \text{ día}^{-1} \cdot 54000 \text{ m}^3$$

$$Q_v = 4779 \text{ m}^3/\text{día}$$

Convirtiendo este valor a  $l/s$ , tenemos:

$$4779 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \left( \frac{1000l}{1\text{m}^3} \right) \left( \frac{1\text{día}}{86,400s} \right) = 55.31 \text{ l/s}$$

Esto indica que en época de primavera y a una temperatura máxima de 25 °C, se necesita un caudal de vertido de 55.31  $l/s$ , para evitar la acumulación de las algas.

Para una época de invierno el valor mínimo de temperatura propuesto es de 12 °C, por tanto el valor de  $k$  es:

$$k_{(12)} = k_{17} \cdot \theta^{(12-17)}$$

$$k_{(12)} = 0.0531 \cdot 1.066^{(-5)} = 0.0385 \text{ día}^{-1}$$

El caudal de vertido necesario para desalojar la generación de algas que se producen con una temperatura mínima de 12°C es:

$$Q_v = k \cdot V$$

$$Q_v = 0.0385 \text{ día}^{-1} \cdot 54000 \text{ m}^3$$

$$Q_v = 2,079 \text{ m}^3/\text{día}$$

Convirtiendo este valor a  $l/s$ , tenemos:

$$2,079 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \left( \frac{1000l}{1\text{m}^3} \right) \left( \frac{1\text{día}}{86,400s} \right) = 24.06 \text{ l/s}$$

De esta manera, sabemos que para época de invierno con una temperatura mínima de 12 °C, el caudal de vertido necesario para que no exista acumulación de algas es de 24.06  $l/s$ .

En resumen se muestra la **Tabla 18** con los caudales necesarios para cada estación.

**Tabla 18.** Caudales mínimos para evitar la acumulación de algas en los lagos para diferentes épocas del año.

Estación del año	Temperatura promedio (°C)	Caudal necesario de vertido para evitar acumulación (l/s)
Primavera	17	33.18
Verano	25	55.31
Invierno	12	24.06

Se muestra la evaluación económica para esta alternativa, quedando de la siguiente manera:

Considerando la condición más desfavorable en crecimiento de algas que la temperatura de 25°C y estimando que los requerimientos de agua para la segunda sección es de una cantidad igual a la estimada para la primera, se toma como base de cálculo una planta de tratamiento de aguas residuales de 160 l/s, de tal forma que se alimentarían 60 l/s para cada sección y 40 l/s, para atender los requerimientos de los usuarios externos.

El esquema de proceso a emplear es el de la planta actual, mediante el sistema de lodos activados.

El resultado del análisis para obtener los costos de operación y mantenimiento de la planta es el siguiente:

**NUEVA PLANTA DE TRATAMIENTO “CHAPULTEPEC”  
COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO [24][25]**

DATOS	UNIDAD	CANTIDAD	m <sup>3</sup> /AÑO	MILLONES DE m <sup>3</sup> /AÑO
Caudal	m <sup>3</sup> /s	0.17	5'361,120.00	5.36112
Total HP bombas y sopladores	HP	383		
Cargo kWh	\$	2.09		
Salario mínimo	\$ día	70.1		
Costo herramientas	Lote	780		
Costo protección personal	Lote	2000		
Carbón activado	\$ por Kg	25		
Metanol	\$ por l	12		
Total Watt lámpara UV	kW	26.7		

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	AÑO	P.U	COSTO ANUAL
----------	--------	----------	-----	-----	-------------

<b>CONSUMO ENERGÍA</b>
------------------------

Bombas y sopladores	kW/hr	285.6	2'467,651	\$2.09	\$5'157,391
Lámpara de Luz UV	kW/hr	6.7	57,888	\$2.09	\$120,986
Consumo en servicios generales (25% bombas y sopladores)	kW/hr	71.4	616,913	\$2.09	\$1'289,348
<b>TOTAL</b>					<b>\$6'567,724</b>

<b>MANTENIMIENTO</b>
----------------------

Herramienta	Lote	4	8	\$780	\$6,240
Equipo de protección	Lote	24	48	\$2,000	\$96,000
Revisión (Equipos)	Lote	1	6	\$75,000	\$450,000
Servicios auxiliares	Lote	1	6	\$41,250	\$247,500
<b>TOTAL</b>					<b>\$799,470</b>

<b>PERSONAL</b>
-----------------

Jefe de planta 1	jornada	1	365	\$1,778	\$649,092
Jefe de turno 4	jornada	4	1460	\$1,188	\$1'734,431
Operadores 8	jornada	8	2920	\$961	\$2'806,509
Laboratorista 2	jornada	2	730	\$440	\$321,322
Administrativo 1	jornada	1	365	\$440	\$160,661
Mecánico 4	jornada	2	730	\$440	\$321,322
Electricista 4	jornada	2	730	\$440	\$321,322
Intendencia 4	jornada	2	730	\$100	\$73,000
Vigilancia 4	jornada	2	730	\$100	\$73,000
<b>TOTAL</b>					<b>\$6'460,658</b>

<b>PRODUCTOS QUÍMICOS</b>
---------------------------

Carbón activado	Kg/Año	0	0	\$25	\$0
Metanol	l	0	0	\$12	\$0
<b>TOTAL</b>					<b>\$0</b>

CONSUMO DE ENERGÍA	\$6,567,724
HERRAMIENTA Y EQUIPO	\$799,740
PERSONAL	\$6,460,658
PRODUCTOS QUÍMICOS	\$0
AMORTIZACIÓN	\$0

TOTAL	\$13,828,122
TOTAL \$/m <sup>3</sup>	2.58

## 4.6. Alternativa 2. Construcción de Planta de tratamiento para remoción de microalgas por clarifloculación

Esta alternativa sugiere que la producción de algas diaria sea desalojada por el tratamiento de un caudal que después de ser procesado para la remoción de las microalgas retorne al lago como recirculación, por lo tanto este término se iguala a la producción de algas quedando de la siguiente manera:

$$Q_v \cdot c = 0; \quad EQ_r \cdot c = k \cdot c \cdot V$$

Esto implica construir una planta de tratamiento capaz de retirar la producción de algas por día por medio de la remoción, mediante el proceso de clarifloculación, a través de la adición del coagulante Ploricloruro de aluminio (PAC), con esta ecuación obtenemos el caudal de recirculación necesario para que no exista acumulación de algas. Considerando que la eficiencia de remoción, calculada anteriormente, es de  $E = 0.988$  Resolviendo la ecuación para las tres diferentes temperaturas se tienen los siguientes caudales a tratar:

Estación del año	Temperatura promedio (°C)	Caudal a tratar por clarifloculación (l/s)
Primavera	17	33.58
Verano	25	55.98
Invierno	12	24.35

Se realizó una evaluación económica para obtener el costo de operación y mantenimiento de esta alternativa y poder selección la más eficiente, la cual se muestra a continuación:

### TRATAMIENTO FÍSICO QUÍMICO COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMINETO [24][25]

DATOS	UNIDAD	CANTIDAD	m <sup>3</sup> /AÑO	MILLONES DE m <sup>3</sup> /AÑO
Caudal	m <sup>3</sup> /s	0.06	1'892,160.00	1.89216
Total kW bombas	kW	112		
Cargo kWh	\$	1.84		
Salario mínimo	\$ día	70.1		
Costo herramientas	Lote	780		
Costo protección personal	Lote	2000		
PAC	Tambos/día	7.5		
PAC	Kg/tambo	280		
PAC	\$ por Kg	7.9		

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	AÑO	P.U	COSTO ANUAL
----------	--------	----------	-----	-----	-------------

<b>CONSUMO ENERGÍA</b>
------------------------

Bombas	kW/hr	111.3	961,200	1.84	\$1'768,608
Consumo en servicios generales (25% bombas)	kW/hr	27.8	240,300	1.84	\$442,152
				<b>TOTAL</b>	<b>\$2'210,760</b>

<b>MANTENIMIENTO</b>
----------------------

Herramienta	Lote	2	4	\$780	\$3,120
Equipo de protección	Lote	11	22	\$2,000	\$44,000
Revisión (Equipos)	Lote	1	6	\$75,000	\$450,000
Servicios auxiliares	Lote	1	6	\$41,250	\$247,500
				<b>TOTAL</b>	<b>\$744,620</b>

<b>PERSONAL</b>
-----------------

Jefe de planta 1	jornada	1	365	\$1,778	\$649,092
Jefe de turno 4	jornada	1	365	\$1,188	\$433,608
Operadores 8	jornada	3	1095	\$961	\$1'052,441
Laboratorista 2	jornada	1	365	\$440	\$160,661
Administrativo 1	jornada	1	365	\$440	\$160,661
Mecánico 4	jornada	1	365	\$440	\$160,661
Electricista 4	jornada	1	365	\$440	\$160,661
Intendencia 4	jornada	1	365	\$100	\$36,500
Vigilancia 4	jornada	1	365	\$100	\$36,500
		<b>TOTAL</b>	<b>11</b>	<b>TOTAL</b>	<b>\$2'850,784</b>

<b>PRODUCTOS QUÍMICOS</b>
---------------------------

PAC	Kg/Año	766500	766500	\$8	\$6'055,350
				<b>TOTAL</b>	<b>\$6'055,350</b>

CONSUMO DE ENERGÍA	\$2'210,760
HERRAMIENTA Y EQUIPO	\$744,620
PERSONAL	\$2'850,784
PRODUCTOS QUÍMICOS	\$6'055,350
AMORTIZACIÓN	\$0

<b>TOTAL</b>	<b>\$11'861,514</b>
<b>TOTAL \$/m<sup>3</sup></b>	<b>6.27</b>

# CAPÍTULO 5.

---

## Conclusiones

El Valle de México fue una región lacustre, con condiciones propicias para los asentamientos humanos, originando la fundación de importantes ciudades, la más importante: México-Tenochtitlan, el crecimiento incontrolado de estos centros de población ha ido más allá del equilibrio, ocasionado la desaparición de los cuerpos de agua, creando una problemática para la supervivencia de la urbe, que actualmente no tienen una solución definitiva.

Uno de estos problemas lo representa atender los servicios públicos relacionados con el uso del agua para el consumo humano, la recolección después de su uso y finalmente su disposición. Las fuentes locales de abastecimiento se encuentran sobreexplotadas, por lo que se importan caudales de cuencas lejanas para mantener los niveles de disponibilidad y atender las necesidades primarias, esta situación ha puesto en evidencia la importancia del reúso del agua para atender las actividades donde no se requiera la calidad potable, dentro de estas se identifica el mantener los escasos cuerpos de agua remantes en la cuenca, integrados a la ciudad, los cuales prestan un servicio de gran importancia, sobre todo aquellos cuya vocación de uso es el atender los requerimientos de esparcimiento de los habitantes, contribuyendo a mantener un adecuado nivel de salud mental.

Los cuerpos de agua existentes en el Valle de México, para atender este servicio, presentan una problemática común, la generación y acumulación de microalgas provocando condiciones indeseables para las actividades de recreo. Los conocimientos técnicos adquiridos durante la formación como ingenieros civiles nos permiten generar métodos técnicos para contribuir a la solución de este tipo de problemas, por lo que establecimos la hipótesis de desarrollar la metodología para identificar y cuantificar las acciones para el control de la problemática, planteando soluciones eficientes que permitan mejorar las condiciones del lago.

Se realizaron trabajos de monitoreo en el lago de la primera sección del bosque de Chapultepec en la ciudad de México, los cuales comprendieron un periodo de 10 días continuos, lo que permitió obtener la información suficiente para el análisis de las condiciones actuales en el lago y poder calcular los caudales mínimos necesarios para evitar la acumulación de algas.

Se evalúan dos alternativas de solución: 1).- La construcción de una nueva planta de tratamiento de aguas residuales con capacidad para suministrar el caudal de aguas tratada suficiente para que mediante el vertido se desaljen las microalgas que sean generadas por día y evitar la acumulación y 2).- La construcción de una planta para tratamiento del agua por medio de clarifloculación, para tratar una corriente de recirculación del lago y remover la producción de algas evitando su acumulación. De las dos alternativas, que son eficaces en el propósito de evitar la acumulación, la más eficiente se define de la evaluación económica, obteniendo en conclusión que la mejor alternativa para mejorar las condiciones de calidad del agua en los lagos del bosque de Chapultepec es la construcción de una nueva planta de tratamiento de aguas residuales con una capacidad total de producción de 160 l/s, para abastecer las dos secciones y los usuarios externos, manteniendo el sistema de tratamiento de la planta actual, que tendría un costo de operación y mantenimiento de 2.58 \$/m<sup>3</sup> que comparado con un tratamiento en los lagos para la remoción de microalgas por un proceso fisicoquímico con un costo unitario de 6.27 \$/m<sup>3</sup> resulta la mejor alternativa.

# ANEXOS

## Anexo 1. Solicitud de acceso y respuesta



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVÉNMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
CIVIL Y GEOMÁTICA  
SECRETARÍA ACADÉMICA

# ACUSE

**ARQ. LAURA JANKA ZIRES**  
Directora del Bosque de Chapultepec

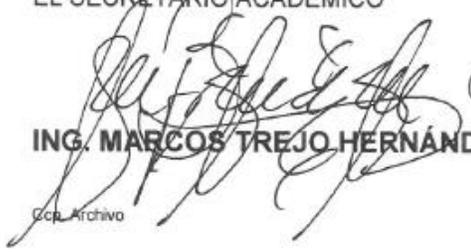
PRESENTE

Por medio de ésta se hace constar que los alumnos **ALMA ANGÉLICA PALACIOS ADAME** con número de cuenta **301064503** y **ALEJANDRO VEGA MORALES** con número de cuenta **305022217** se encuentran registrados en el programa de la carrera de Ingeniería Civil y que son miembros de la generación 2008; se encuentran desarrollando su tema de Tesis relacionada con un modelo matemático que va a evaluar la concentración de algas en el tiempo en un cuerpo de agua artificial.

Con base en lo anterior es que solicito de la manera más atenta el que se les den las **facilidades de acceso a las instalaciones de los lagos de Chapultepec 1ª. Sección** con el fin de que los citados alumnos puedan realizar trabajo de campo, durante 10 días, consistente en la obtención de muestras, lo cual les permitirá calibrar el modelo arriba comentado.

Agradezco de antemano el apoyo que se les pudiera brindar a estos alumnos y aprovecho la oportunidad de la comunicación para hacerle llegar cordiales saludos.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria, D. F., a 11 de mayo de 2015  
EL SECRETARIO ACADÉMICO



**ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ**

Cop. Archivo



GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL  
SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE  
**REVISADO**  
11 MAY 2015  
3 8 11 11  
DIRECCIÓN GENERAL DE BOSQUES URBANOS  
Y EDUCACIÓN AMBIENTAL  
DIRECCIÓN GENERAL

## 15002438



**CDMX**  
CIUDAD DE MÉXICO  
**190 años**

México, Distrito Federal a 08 de Junio del 2015.

**SEDEMA/DGBUEA/DBCH/ 1760 /2015**

**ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ**  
El Secretario Académico en la Facultad de  
Ingeniería División de Ingenierías Civil y  
Geomántica de la UNAM  
**PRESENTE:**

Por este medio y en base a su solicitud recibida el 11 de mayo del 2015, me permito informarle que no tenemos inconveniente que los alumnos CC. **ALMA ANGELICA PALACIOS ADAME** con número de cuenta **301064503** y **ALEJANDRO VEGA MORALES** con número de cuenta **305022217**, alumnos de la carrera de Ingeniería Civil, realicen sus muestreos en los lagos de la primera Sección del Bosque de Chapultepec para realizar su tesis.

Del mismo modo es importante recalcar que dicha información deberá ser manejada únicamente para uso científico y no de divulgación, y del mismo modo al término de dicha tesis le agradeceré nos envíe una copia para enriquecer el acervo científico del Bosque de Chapultepec.

Así mismo, es importante destacar que queda bajo responsabilidad de su institución educativa la seguridad del alumno.

Sin otro asunto en particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**LA DIRECTORA**



**ARQ. LAURA JANINA ZIRES**

*Por un uso ambientalmente responsable y sustentable del papel, las siguientes copias se envían de forma electrónica*

C.c.p. Ing. Rosa María Gómez Sosa.- Directora General de Bosques Urbanos y Educación Ambiental.- Presente

LJZ/MJMF/RH/PA/ksav\*  
Folio: 15002438



Secretaría del Medio Ambiente  
Dirección General de Bosques Urbanos y Educación Ambiental  
Dirección del Bosque de Chapultepec

Interior del Bosque de Chapultepec 1ª. Sección  
Colonia San Miguel Chapultepec  
Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11850  
sedema.df.gob.mx

## Anexo 2. Memoria fotográfica



Gárgola tipo



Gárgola tipo en operación



Gárgola en operación



Camión pipa, extrayendo agua para riego

## Canal del Quijote



Llegada de agua de la PTAR al Quijote



Gasto de entrada 27 l/s.



Canal del Quijote y la isla de la bruja



Canal del Quijote



Llegada al lago menor.

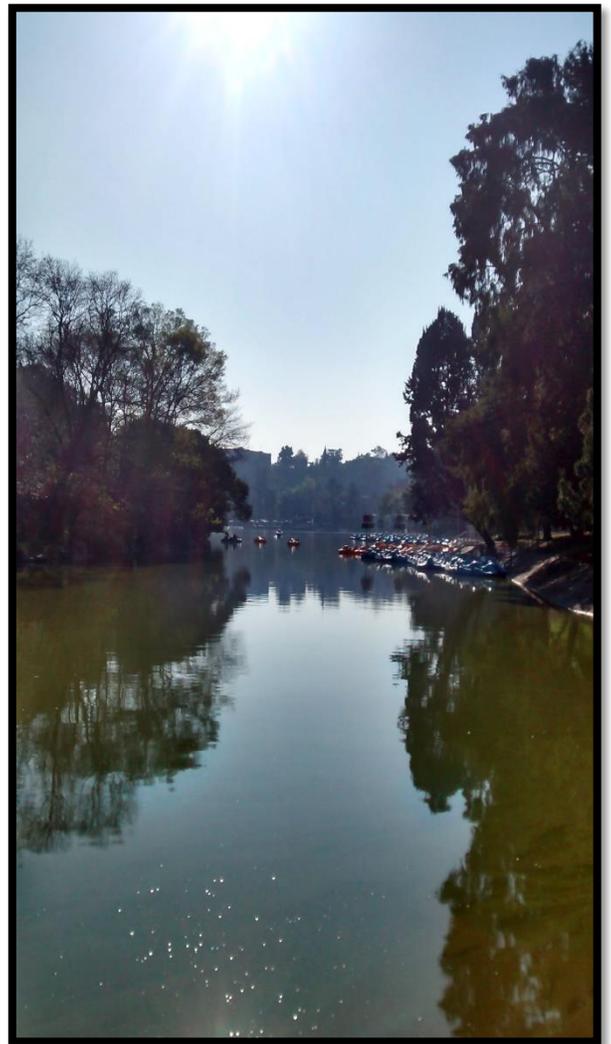


PM Alfa

# Lago Menor



# Lago Mayor

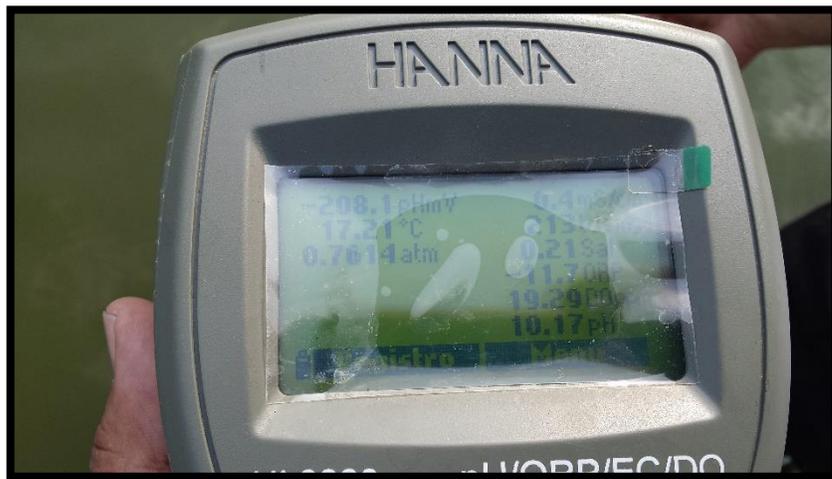


## Vertedor de Salida



## Equipo de medición





# Anexo 3. Datos de campo



FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.

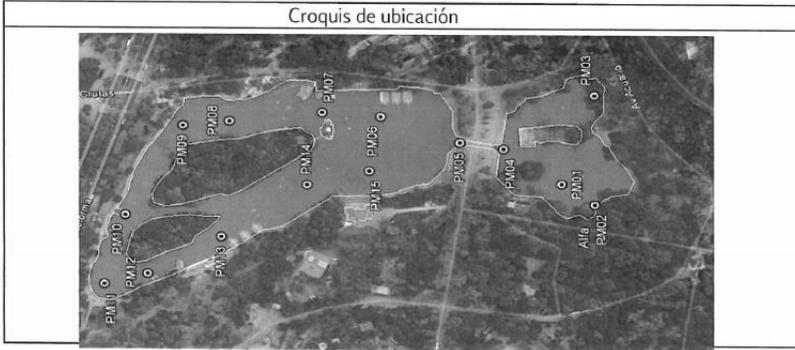


FECHA: 9-Junio HORA: 12:30 CLIMA: Nublado MUESTREO POR: Angelica y Alejandro

Muestra

PARAM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta
SECCHI	29	26	25.5	21.5	18	17	17	15.5	16	15.5	19	16	17	18	17.5	31	66
pH	9.85	9.75	9.37	10.7	10.6	10.88	10.9	10.9	10.78	10.77	10.8	10.7	11.58	12.06	11.22	11.3	10.09
SDT	720	778	778	730	728	719	773	724	727	730	744	726	723	721	728	716	728
OD	11.74	14.1	12.84	21.71	22	16.64	18.34	18.46	18.45	20.8	22	14.7	19.05	17.73	20.83	4.63	8.41
Temp.	16.4	16.5	16.4	16.7	16.7	16.8	15.9	16	16.2	15.6	16.1	16.2	16.1	16.1	16.7	16.4	18.5
Turb.	73	68	49	8.4	105	109	109	120	112	107	116	109	104	97	105	74	8

Croquis de ubicación





FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.

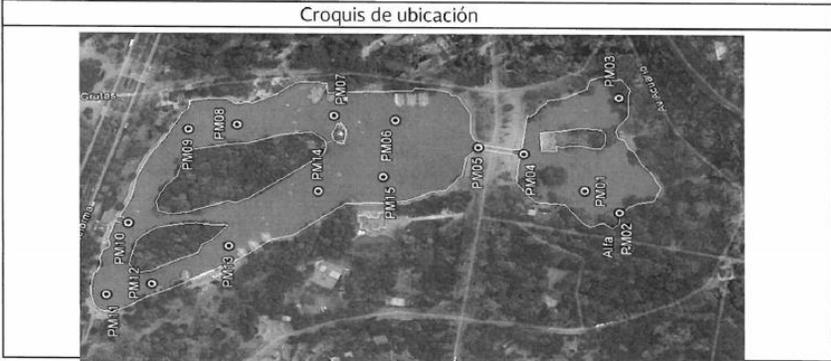


FECHA: 10 Junio HORA: 12:00 CLIMA: Nublado MUESTREO POR: Angelica y Alejandro

Muestra

PARAM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta
SECCHI	50.5	41	27.5	19	18.5	18.5	15	16	15	15	16	17.5	15	18	16.5	73.5	72
pH	8.46	8.89	9.29	9.77	10.53	10.47	10.91	10.75	10.67	10.78	10.82	10.58	10.55	10.58	10.99	7.75	7.92
SDT	740	740	724	718	726	719	717	730	727	727	734	733	719	718	720	752	746
OD	6.13	8.69	8.26	15.7	14.43	17	14.49	18.2	18.87	15.53	21.24	13.86	14.57	14.42	17.95	6.02	7.93
Temp.	15	15.1	19	19.8	16.8	16.3	15.8	16.4	16.1	16.2	17	15.6	15.0	15.6	15.7	15	17.3
Turb.	13	30	62	94	101	104	106	114	116	116	107	114	110	108	107	12	9

Croquis de ubicación



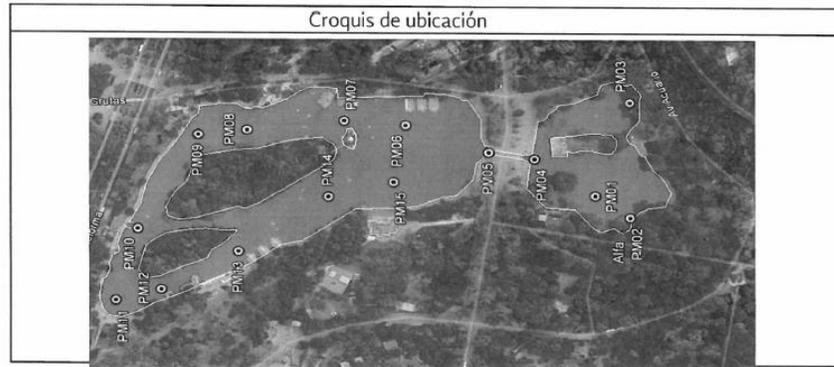


FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.



FECHA: 11-Junio HORA: 11:20 CLIMA: Soleado MUESTREO POR: Angelica y Alejandro

PARAM.	Muestra															Alfa	Planta
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
SECCHI	38.5	48	41	36.5	17.5	14.5	18	15	18.5	20	16	17	21	21.5	17	62	72
pH	9.96	9.55	9.76	10.44	11.11	11.5	11.69	11.84	11.92	12.14	12.39	12.18	12.06	12.04	11.98	10.83	10.26
SDT	227	216	229	227	227	221	223	225	225	233	232	228	226	225	226	223	223
OD	10.89	8.79	10.03	9.7	14.33	17.46	19.29	14.66	18.6	20.93	21.68	14.35	14.83	21.77	21.72	7.53	10.29
Temp.	16	16	15.3	15.1	15.7	15.8	17.1	16	18.7	18.9	16.8	18.3	17.6	17.9	18.3	15.5	17.5
Turb.	40	41	42	37	66	92	82	109	102	84	96	82	84	74	85	16	11

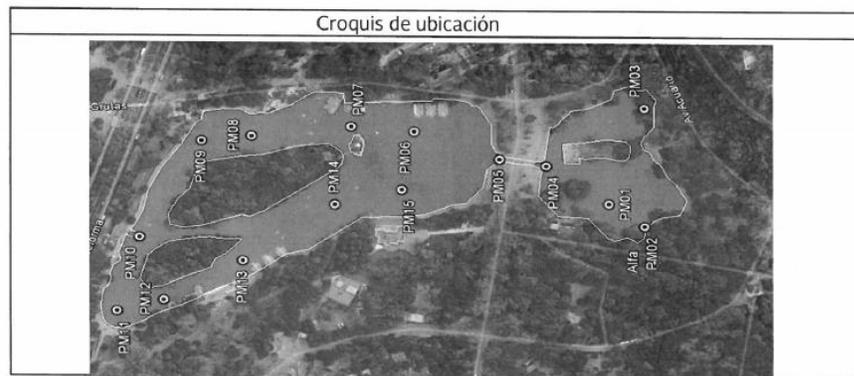


FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.



FECHA: 17-Junio HORA: 12:30 CLIMA: Soleado MUESTREO POR: Angelica y Alejandro

PARAM.	Muestra															Alfa	Planta
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
SECCHI	63	53.4	46	22	19	21.5	19	18	20	18	16	18	18.5	17	20	8.95	26
pH	8.83	9.24	9.39	10.51	10.99	11.25	11.26	11.13	11.27	11.15	11.39	11.06	11.3	11.29	11.27	8.63	8.99
SDT	233	230	228	228	233	230	228	239	240	227	236	224	220	227	230	237	238
OD	9.8	9.37	11.99	17.49	21.75	20.81	22	22	21.57	19	21.57	14.22	14.48	20.5	21.2	8.12	15.37
Temp.	17.4	16.8	16.6	17.5	18.9	17.2	17.8	17.5	20.3	18.9	20.9	17.2	17.3	17.5	18	15.7	17.7
Turb.	19	31	36	73	77	85	99	103	103	111	79	103	104	103	91	10	13





FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.

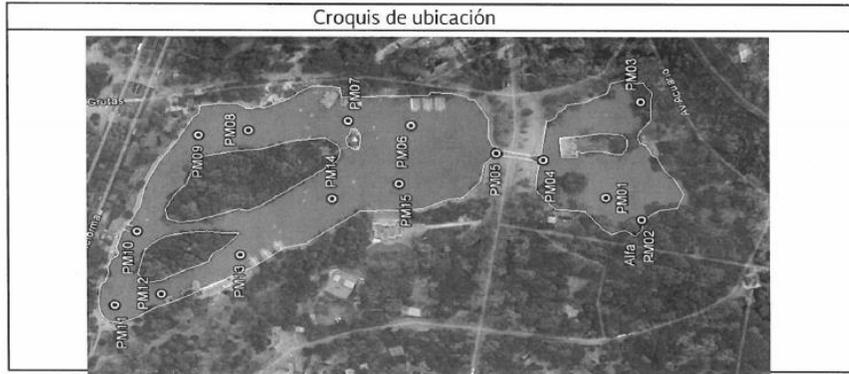


FECHA: 13-Junio HORA: 11:20 CLIMA: Soleado MUESTREO POR: Angelica y Alejandro

Muestra

PARAM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta
SECCHI	59.9	42.5	36	33	27.5	24	23	21	20	19	20	18.5	22	20.5	20	69	16
pH	9.5	9.45	9.68	10.15	11.27	11.11	11.02	11.21	11.37	11.46	11.58	11.5	11.39	11.32	9.98	8.74	
SDT	230	230	229	218	236	222	225	225	236	230	240	242	228	235	235	239	242
OD	11.37	10.22	12.12	14.88	22	18.03	20.47	22	22	21.37	22	22	22	22	21.50	8.03	22
Temp.	16.9	16.8	16.1	16.5	18.7	16.6	17.4	18.8	18.9	16.1	14.5	18.23	17.3	17.87	16.9	15.1	16.8
Turb.	28	29	32	59	59	78	81	85	87	100	96	102	100	99	99	12	16

Croquis de ubicación



FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.

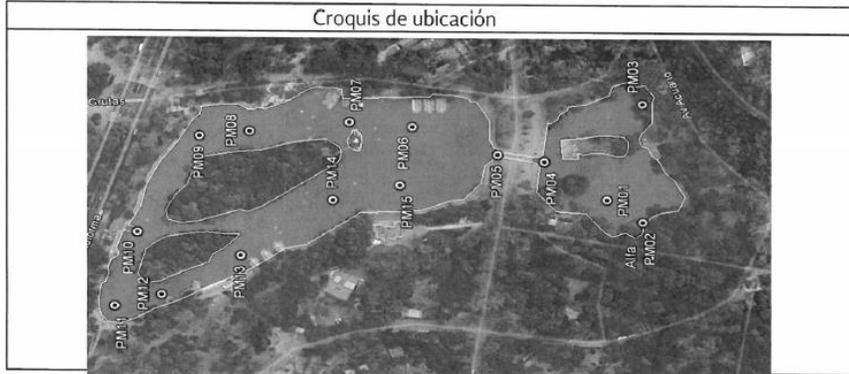


FECHA: 14-Junio HORA: 11:00 CLIMA: Nublado MUESTREO POR: Angelica y Alejandro

Muestra

PARAM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta
SECCHI	49	39	44	45	27.5	21.5	18	20	20.5	20.5	25	23	22	23.5	20	70.5	37
pH	10.82	11.1	11.09	11.1	11.15	11.86	12.15	12.15	12.00	12.08	12	12.08	11.68	11.28	11.92	9.18	9.02
SDT	230	235	229	225	225	226	225	227	229	220	232	225	225	224	227	246	251
OD	13.78	11.12	13.3	11.89	20.91	20.36	17.61	21.76	18.9	14.57	22	19.19	19.8	21.42	21.3	8.04	11.62
Temp.	16	15	15.2	15.7	17.6	16.8	15.7	16.7	17	16.8	14.9	15.9	15.9	17	18.4	19.1	15.5
Turb.	28	26	40	27	67	88	59	85	76	80	69	81	81	91	75	6	19

Croquis de ubicación





FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.

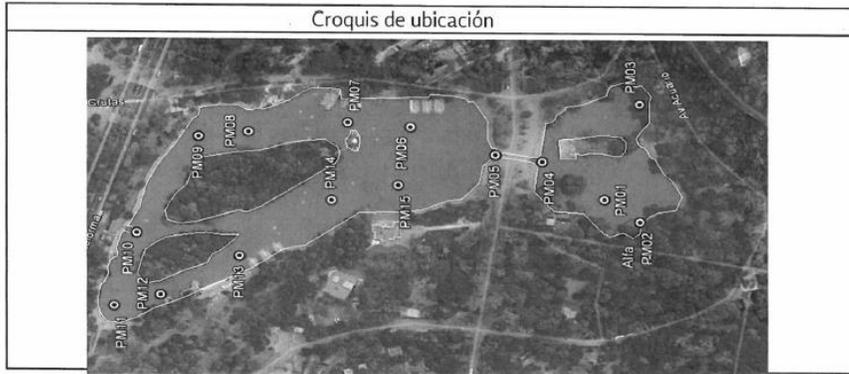


FECHA: 15 Junio HORA: 12:00 CLIMA: Soleado MUESTREO POR: Angelica u Alejandro

Muestra

PARAM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta
SECCHI	69	44	49	36.5	27	25	29	20	23	29	28	23	22	29.5	22	69	46
pH	9.13	9.43	9.44	10.73	11.27	11.54	10.97	10.89	11.18	10.95	10.45	11.15	10.97	11.08	11.06	8.47	8.52
SDT	231	234	229	224	233	237	234	253	251	234	234	240	236	235	237	234	230
OD	11.29	12.27	12.82	15.56	20.59	21.95	21.19	22	21.19	18.59	18.59	21.18	21.45	21.39	21.29	7.64	22
Temp.	16.8	16.9	16.4	16.3	18.1	18.2	16.9	17.2	18.6	21	20	17.8	17	17.6	17.5	15.2	16.5
Turb.	21	19	20	52	57	61	86	86	56	63	63	77	80	72	84	7	31

Croquis de ubicación



FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.

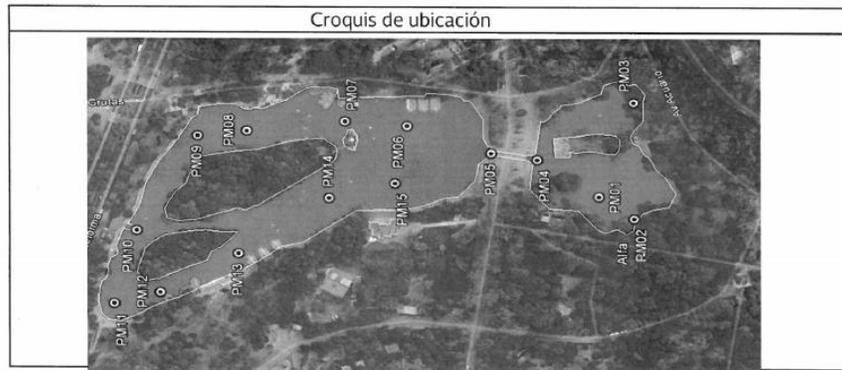


FECHA: 16 Junio HORA: 12:20 CLIMA: Soleado MUESTREO POR: Angelica u Alejandro

Muestra

PARAM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta
SECCHI	68	59	58	45	46	33	27	24	21.5	29	26	27	24	23	23	71	23
pH	9.8	9.9	4.7	11.04	11.58	11.81	11.51	11.51	11.72	11.8	11.93	12.06	11.99	11.91	11.73	9.5	9.99
SDT	234	232	230	229	241	243	234	242	252	246	245	256	248	246	261	236	218
OD	15.53	12.03	13.28	16.65	22	22	22	20.8	22	22	22	20.15	22	22	22	8.17	19.52
Temp.	16.1	17.7	17.2	19.8	21	19.8	17.5	18	19.8	18.8	21.2	19.1	18.9	18.1	18.7	15.1	18.1
Turb.	19	20	28	48	48	68	77	78	72	75	46	57	69	68	67	6	21

Croquis de ubicación





FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.

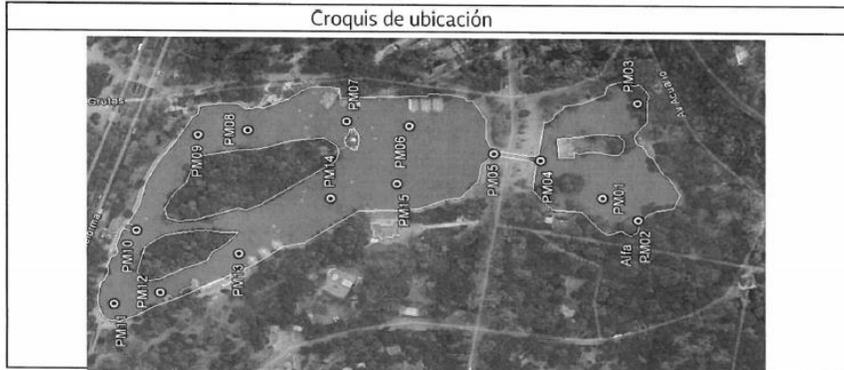


FECHA: 17 Junio HORA: 12:10 CLIMA: Nublado MUESTREO POR: Angelica y Alejandro

Muestra

PARAM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta
SECCHI	63	38	54	48	57	31	26	22	29	25	29	27	23	22	23	71	31
pH	9.39	9.43	9.38	9.67	10.34	10.95	11.51	11.27	11.29	11.4	11.17	11.39	11.41	11.96	11.52	9.6	8.72
SDT	233	238	231	229	222	226	235	232	243	230	228	232	237	233	242	240	228
OD	11.86	9.19	12.08	12.16	16.71	18.58	22	22	22	19.85	20.59	20.89	22	22	22	8.92	5.44
Temp.	17	15.8	15.9	15.8	16.6	16.7	17.5	16.7	18.1	17.1	18.7	17.3	17.1	16.3	17.3	16.1	19.4
Turb.	19	9	25	24	48	60	65	77	70	83	50	70	68	76	69	6	14

Croquis de ubicación



FORMATO DE DATOS DE CAMPO  
MUESTREO DE PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS  
DE CHAPULTEPEC, EN EL D.F.

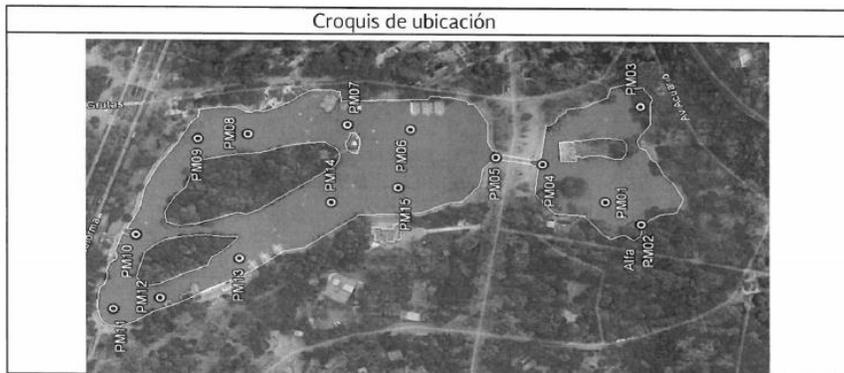


FECHA: 18 Junio HORA: 11:30 CLIMA: Nublado MUESTREO POR: Angelica y Alejandro

Muestra

PARAM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Alfa	Planta
SECCHI	69	91	53	54.5	30.5	25	23.5	23	24	25.5	22	20.5	23.5	25	27	72	
pH	8.84	8.85	9.49	9.76	10.15	10.68	11.25	11.33	11.22	11.5	11.43	11.39	11.9	11.23	11.72	9.63	8.24
SDT	237	243	232	231	281	321	229	227	222	235	224	223	250	226	223	242	248
OD	10.26	8.54	12.43	10.19	10.18	16.4	18.9	14.76	16.46	19.18	20.45	17.88	17.68	20.84	18.92	7.98	6.66
Temp.	15.4	14.9	14.6	14.6	15	15.7	15.4	15.2	15.1	16	16.5	15.5	15.4	15.8	15.7	16	18.2
Turb.	13	5	26	28	51	57	66	74	76	71	89	80	66	67	58	6	18

Croquis de ubicación



## Anexo 4. Correlación entre turbiedad y solidos suspendidos totales

TURBIEDAD NTU	SST mg/l
------------------	-------------

0.53	8
1.19	7
1.19	21
1.21	43
1.559	10
2.04	4
2.15	4
2.23	47
2.26	4
2.45	9
2.54	4
2.62	4
2.75	8
2.84	10
2.93	4
2.94	4
3.07	4
3.14	14
3.14	46
3.27	10
3.36	6
3.4	6
3.66	5
3.78	7
3.85	16
3.85	27
4.16	8
4.28	4
4.32	9
4.38	8
4.41	5
4.68	6
4.73	4

TURBIEDAD NTU	SST mg/l
------------------	-------------

5.17	14
5.18	12
6.1	10
6.22	15
6.26	6
6.27	29
7.23	35
7.44	10
9.02	10
9.07	12
9.43	15
9.48	24
10.06	9
10.25	33
10.26	9
10.7	13
11.26	15
11.6	14
11.74	23
11.84	28
13.14	28
13.62	31
14.95	25
15.03	22
15.2	51
15.22	41
15.37	40
15.82	44
16.26	28
17.32	25
18.38	32
19.4	40
19.45	45

TURBIEDAD NTU	SST mg/l
------------------	-------------

20.3	41
20.5	20
21.2	40
21.4	21
21.5	50
21.6	39
21.7	44
21.8	31
22	50
22.2	50
22.6	31
22.6	31
23.7	51
24.7	56
26.2	53
28	65
28.4	51
28.9	30
28.9	64
29.9	48
30.6	59
30.8	49
31.6	46
31.8	44
32.9	20
33.2	32
37.8	34
42	76
43.3	62
46.1	60
46.1	60
47.6	69
50.2	33

TURBIEDAD NTU	SST mg/l
------------------	-------------

53.9	44
53.9	44
55.4	42
61.9	68
61.9	68
62.1	55
63.3	61
63.3	61
64.4	62
66.2	50
69	36
71.7	82
72.1	57
72.6	79
72.8	40
74.1	85
74.5	50
76.1	100
78.2	67
82.3	58
83.7	79
83.8	43
83.8	43
86.5	70
88.9	37
90.1	105
91.6	78
95.3	76
100.4	118
102	82
103.5	78
106.1	67
109.7	80

TURBIEDAD NTU	SST mg/l
------------------	-------------

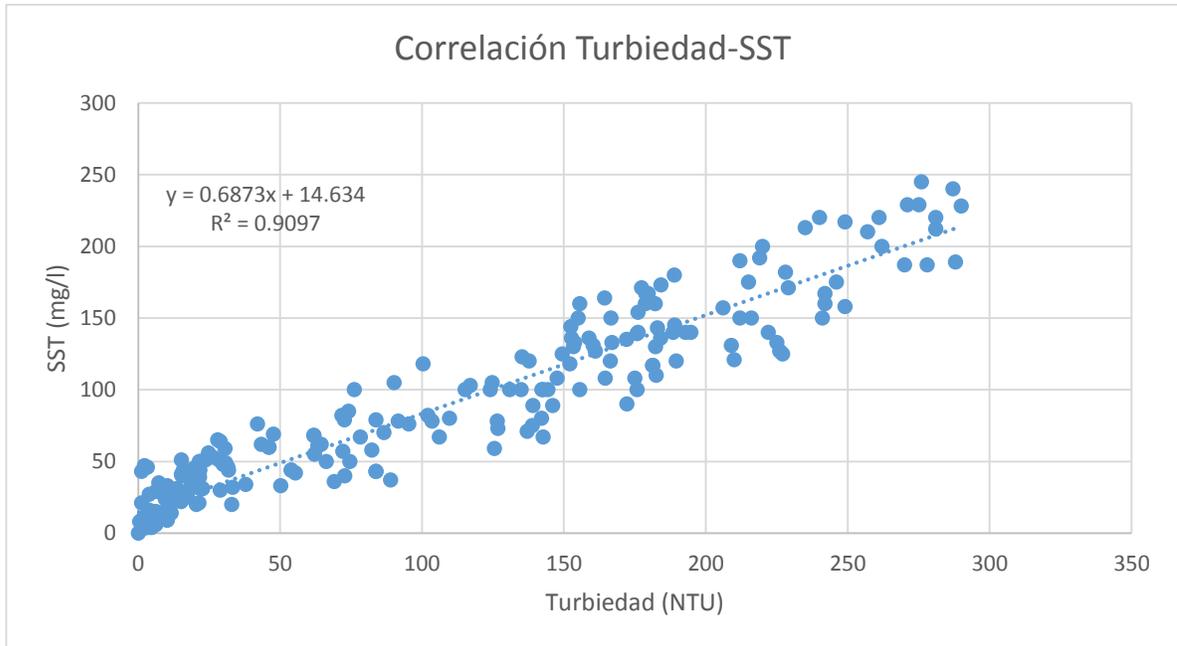
115.2	100
117	103
124	100
124.7	105
125.5	59
126.5	78
126.7	73
130.9	100
134.9	100
135.3	123
137	71
137.7	120
138.8	75
139.1	89
142.1	80
142.2	100
142.6	100
142.7	67
144.3	100
146	89
147.6	108
149.38	125
152.1	118
152.4	144
152.6	136
153.3	130
153.8	133
155	150
155.5	100
155.6	160
158.8	136
160.3	131
161.1	127

TURBIEDAD NTU	SST mg/l
------------------	-------------

164.3	164
164.5	108
166.3	120
166.6	150
166.9	133
172.1	135
172.2	90
175	108
175.7	100
175.8	139
176.1	140
176.1	154
177.3	171
178.7	160
178.8	167
179.7	167
181.3	117
181.3	117
182.2	160
182.3	130
182.52	110
182.9	143
184	136
184.2	173
188.4	140
188.9	180
189	145
189.5	120
192.8	140
194.7	140
206	157
209	131
210	121

TURBIEDAD NTU	SST mg/l
------------------	-------------

212	150
212	190
215	175
216	150
219	192
220	200
222	140
225	133
226	127
227	125
228	182
229	171
235	213
240	220
241	150
242	160
242	167
246	175
249	158
249	217
257	210
261	220
262	200
270	187
271	229
275	229
276	245
278	187
281	212
281	220
287	240
288	189
290	228



# BIBLIOGRAFÍA

---

1. DIEZ, Peñaloza Tania. “La maravillosa historia de la Ciudad de México”. Código Diez [En línea]. Junio 2010 [Fecha de consulta: 07 de abril de 2015]. Disponible en:
2. DIEZ, Peñaloza Tania. “La maravillosa historia de la Ciudad de México”. Código Diez [En línea]. Junio 2010 [Fecha de consulta: 07 de abril de 2015]. Disponible en: <<http://www.codigodiez.mx/textosarquitectura/lamaravillosahistoria.html>>
3. AVIÑA, José Carlos. “Cuicuilco, Asentamiento sureño de la capital”. Revista buen viaje [en línea]. [Fecha de consulta: 07 de abril de 2015]. Disponible en: <<http://www.revistabuenviaje.com/conocemexico/destinos/df/cuicuilco/cuicuilco.php>>
4. ANÓNIMO. “Cuicuilco”. Historia del arte mexicano [en línea] [Fecha de consulta: 07 de abril de 2015]. Disponible en: <<https://sites.google.com/site/historiadelartemexicano/cuicuilco>>
5. SIEBE, Claus. “La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/-35 años AP y sus implicaciones” Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, UNAM. [En línea]. 2009. [Fecha de consulta: 11 de abril de 2015]. Disponible en: <[http://www.repsa.unam.mx/documentos/Siebe\\_2009\\_volcan\\_xitle.pdf](http://www.repsa.unam.mx/documentos/Siebe_2009_volcan_xitle.pdf)>
6. PÉREZ, Mario, RANGEL, Francisco Carlos y SANDOVAL, Zasil. “Cuicuilco Ciudad de México”. INAH, México. [En línea] 2ª Edición 2007. [Fecha de consulta: 13 de abril de 2015]. Disponible en: <<http://sic.conaculta.gob.mx/documentos/1114.pdf>>
7. ANÓNIMO, “Historia de la Ciudad de México” [en línea]. 2009. [Fecha de consulta: 22 de abril de 2015]. Disponible en: <<http://www.ciudadmexico.com.mx/historia.htm>>
8. ESPINOZA, Víctor, COLLADO, Jaime, MORALES, Juan Manuel y HERNÁNDEZ, Josué. “El Gran Reto del Agua en la Ciudad de México. Pasado, Presente y Prospectivas de Solución para una de las Ciudades más complejas del Mundo”. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Octubre de 2012. [191 páginas](#).
9. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. “Semblanza Histórica del Agua en México”. [En línea]. Noviembre de 2009. [Fecha de consulta: 23 de abril de 2015]. Disponible en: <<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-28SemblanzaHist%C3%B3ricaM%C3%A9xico.pdf>>
10. LEMA, José, MELGOZA, Javier, DE GARAY, Adrián, MONROY, Oscar, FRESAN, Magdalena, PÉREZ, Cuauhtémoc y MOCTEZUMA, Pedro, “Repensar la Cuenca: La Gestión de Ciclos del Agua en el Valle de México” [En línea]. Consejo de Cuenca del Valle de México. 2010. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2015]. Disponible en: <<http://cuencavalledemexico.com/wp-content/uploads/2010/04/capitulo-2-Tratar-y-rehusar-las-aguas-residuales1.pdf>>

11. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. “Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación”. [En línea]. Diciembre de 2011. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2015]. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-INVENTRIO%202011%20FINAL.pdf>
12. RICO, Carlos Alberto. “Gestión, Recreación y Desarrollo Humano” [En línea]. V Congreso Nacional de Recreación. Colombia, 1998. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2015]. Disponible en: [http://www.redreacion.org/documentos/congreso5/CARico.htm#\\_ftn1](http://www.redreacion.org/documentos/congreso5/CARico.htm#_ftn1)
13. FUNLIBRE. “Beneficios en la Recreación” [En línea]. Adaptación de Driver, B.L. and Bruns, D.H. Concepts and uses of the benefits approach to leisure. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2015]. Disponible en: <http://www.funlibre.org/encurso/simposio3if/beneficios.html>
14. “Capítulo 3”. “Depuración biológica de las aguas residuales urbanas”. 3.1 el agua residual urbana y sus efectos sobre el medio. [Fecha de consulta: 30 de abril de 2015]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5909/08Mjkm08de18.pdf?sequence=8>
15. SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, “Normas Oficiales Mexicanas” [Fecha de consulta: 2 de junio de 2015]. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-aguas-residuales>
16. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. “Estudio de prefactibilidad del manejo del agua residual y tratada, en el Bosque de Chapultepec”. 271 páginas.
17. PACHECO H. Gerardo, ROJAS T. Alejandro, HERNÁNDEZ Q. Agustín. “Estados de Saturación del Agua”. Laboratorio de termodinámica. Disponible en: <http://www.dcb.unam.mx/CoordinacionesAcademicas/FisicaQuimica/Termodinamica/estadossagua.pdf>
18. UTN Facultad Regional La Plata Integración III. “Balance de materia”. [Fecha de consulta: 6 de junio de 2015]. Disponible en: [http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/integracion3/UT2\\_Balance\\_de\\_materia.pdf](http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/integracion3/UT2_Balance_de_materia.pdf)
19. SOKOLOV, A.A., CHAPMAN, T.G. “Métodos de Cálculo del balance hídrico. Guía Internacional de Investigación y Métodos”. Instituto de Hidrología de España. 183 páginas.
20. RODRÍGUEZ Velázquez Juan Alberto, STEEGMANN Pascual Cristina. “Modelos Matemáticos” [Fecha de consulta: 19 de junio de 2015]. Disponible en: [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Modelos\\_matematicos.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Modelos_matematicos.pdf).
21. CORREA, María Teresa. Tesis “Determinación de las constantes cinéticas de nitrificación de una agua residual mixta” Universidad Autónoma de Nuevo León. 91 páginas.
22. CASTRO Esparza Maria Luisa, PEREZ Carrión José M. “Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de mejoramiento de calidad de agua para consumo humano”. Manual de Instrucción. Abril 1981.
23. Chapra Steven C. “Surface Water- Quality Modeling”.

**24. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA.** “Estudio de Ingeniería básica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el sistema de riego de áreas verdes en el Bosque de Chapultepec. Contrato No. SGAPDS – GPT- DF – 14 – 011 – RF – 13.

**25. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA,** “Tabulador de Precios Unitarios para Servicios Relacionados con la Obra Pública (Estudios y Proyectos). Edición 2015