



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

**EFFECTO DE LA LLUVIA ÁCIDA SOBRE LA COMUNIDAD DE
CLOROFÍCEAS Y CIANOBACTERIAS DE UN LAGO URBANO AL
NORTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

T E S I S

Que para obtener el título de:

BIÓLOGO

P R E S E N T A

Christian López García

**Director de Tesis:
Dr. Diego de Jesús Chaparro Herrera**

Los Reyes Iztacala, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

**“Cada adversidad, cada fracaso, cada angustia,
lleva consigo la semilla de un beneficio igual o mayor.”
Napoleón Hill**

Agradecimientos

Al Dr. Diego Chaparro Herrera mi director de tesis, por haberme abierto las puertas de su laboratorio y brindarme su confianza en todo momento con este proyecto de investigación. Gracias por su paciencia a lo largo de mi estancia, por cada uno de sus consejos, conocimientos y sobre todo su apoyo y motivación en cada momento. Todo eso siempre me alentó cuando no tenía confianza en mí mismo de creer lo que estaba haciendo, realmente para mí significaba mucho cada lección que me hizo aprender en momentos malos y buenos. Lo respeto y lo admiro demasiado, muchas gracias por todos los aprendizajes me los llevo en el alma.

A mis sinodales al Dr. Pedro Ramírez, Dr. Hugo Perales, Dra. Roció Fernández y al Dr. Luis Oseguera, por su tiempo y sus revisiones que me ayudaron mucho para mejorar y darle un sentido más claro a este trabajo de investigación.

Al proyecto CyMA, por haberme brindado los recursos y material como el espacio en el laboratorio de microbiología, dentro de la UIICSE. A la Facultad de Estudios Superiores Iztacala y sobre todo a la Universidad Nacional Autónoma de México, por poder permitirme alcanzar uno de mis sueños y metas más grandes.

A mis compañeros del laboratorio, quienes hicieron de mi estancia una de las mejores, muchas gracias por todos sus aprendizajes y experiencias, y sobre todo cada momento de alegría, carcajadas y buenos recuerdos.

Agradecimientos personales

A mis padres, que siempre estuvieron conmigo en todo momento. Gracias por su apoyo incondicional en este gran pasó en mi vida. A ustedes que siempre me brindaron su amor y cariño, que siempre me alentó a seguir adelante sin importar nada. Ustedes son mi motor para seguir adelante y no detenerme pase lo pase. A ustedes les agradezco cada momento, cada aprendizaje y cada lección. Soy muy afortunado de tenerlos, los amo mucho.

A mis hermanos, los cuales me cuidaron mucho y vieron por mí siempre. Gracias por cada palabra de ánimo y apoyarme en todos los aspectos. A ustedes que me enseñaron mucho, el seguir adelante y luchar por lo que quieres y en especial que todo se puede alcanzar con esfuerzo y perseverancia, los amo mucho.

Sin duda alguna ustedes son de las cosas que más amo en la vida, nunca se los digo y no suelo ser muy afectivo, pero que no les quede duda de que ustedes son mi mayor motor, a ustedes les debo todo.

Betsy, por brindarme tú amistad y si no hubiera sido por ti no habría entrado en el laboratorio bacteriología y poder conocer a personas increíbles de las que aprendí demasiado, te lo agradezco mucho. Contigo compartí muchos momentos increíbles y nuevas experiencias a lo largo de toda la carrera. Te convertiste en mi confidente, mi mejor amiga con quien me divertía en cada momento. Te quiero mucho.

Wendy, con quien compartí momentos muy agradables a lo largo de la carrera, gracias por todos tus consejos y tus palabras de ánimo en los momentos que me sentía cabizbajo, en verdad fueron muy valiosas. Eres una persona muy bondadosa. Te quiero mucho.

Darío muchas gracias por enseñarme nuevas técnicas y conocimientos que en verdad me fueron de gran ayuda para poder llevar este trabajo de investigación. Eres una persona muy buena onda y graciosa, con la que me llevo buenos recuerdos.

Naye, con quien compartí momentos muy padres y también muy divertidos. Gracias por tus palabras de aliento que me motivaron y enseñarme bastante del mundo de las bacterias. Eres una persona increíble y única, que brilla por sí sola, sigue adelante no te detengas llegaras muy lejos.

A mis compañeros y amigos del laboratorio, Luis, Lulú, Isaac, Mario, Jesús, Hugo y Miguel. A todos ustedes gracias por todos los momentos únicos que pase, por escucharme y brindarme sus consejos. Los aprecio mucho en verdad.

EFFECTO DE LA LLUVIA ÁCIDA SOBRE LA COMUNIDAD DE CLOROFÍCEAS Y CIANOBACTERIAS DE UN LAGO URBANO AL NORTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO

C. López-García

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

Avenida de los Barrios Número 1, Colonia Los Reyes Iztacala

Tlalnepantla, Estado de México, C.P. 54090.

lopezchristian321@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo plantea analizar la dinámica en las comunidades de clorofíceas y cianobacterias, así como la producción de cianotoxinas de estas últimas en el lago urbano Tezozómoc, ubicado al norte de la Ciudad de México, en relación con los contaminantes atmosféricos y la precipitación acumulada. Los parámetros fisicoquímicos analizados en el sistema acuático, muestran una influencia por parte de los contaminantes atmosféricos mediante las precipitaciones donde la combinación de frecuencia, intensidad y composiciones de las lluvias pueden dar como resultado el descenso en el pH del lago; sin embargo el fenómeno de la lluvia ácida puede pasar desapercibido por la neutralización de ciertos componentes presentes en la atmósfera por lo que se recomienda no solo considerar el pH como indicador de la lluvia ácida sino también en cuanto a la afectación en la dinámica de las comunidades de clorofíceas y cianobacterias, estas últimas se ven mayormente afectadas por la disminución en los niveles de pH teniendo como consecuencia un incremento en la comunidad de clorofíceas tanto en la riqueza como abundancia, no obstante otro factor a considerar es la precipitación pluvial, donde lluvias intensas también pueden llevar a una baja en la biomasa con una alta diversidad debido a la reducción en la dominancia de las cianobacterias. En la lluvia ácida se registra una disminución del pH del agua que se considera como normal (7.0-5.6), esto debido a los agentes contaminantes presentes en la atmósfera que al reaccionar con el agua de la lluvia forman algunos ácidos que al llegar a los sistemas acuáticos disminuyen el pH, afectando a distintos organismos como el fitoplancton y dentro de este la densidad de las comunidades de cianobacterias y su producción de cianotoxinas. En cuanto a los niveles de microcistina-LR no existe una relación muy clara entre la abundancia de cianobacterias y los niveles de toxicidad, sin embargo, se puede observar una disminución cuando se registran valores de pH ácidos, asimismo la precipitación en época de lluvias también tiene un impacto en la disminución de los niveles de toxicidad. Finalmente se realizó la interpolación de los contaminantes

atmosféricos de las alcaldías y municipios cercanos al lago Tezozómoc, mostrando que la alcaldía Azcapotzalco y el municipio de Tlalnepantla cuentan con niveles considerables de contaminación en comparación a las demás, no obstante se recomienda considerar el papel del viento, debido a que en la Ciudad de México estos van de norte a sur, por lo que se debería de considerar otros lagos urbanos ubicados hacia el sur de la ciudad y observar el impacto sobre las comunidades del fitoplancton presentes en esos cuerpos de agua.

Palabras Clave: Lluvia Ácida, Contaminantes Atmosféricos, Lago Urbano, Cianotoxinas

INDICE

1. INTRODUCCION.....	1
1.1 lluvia ácida.....	1
1.2 Lagos urbanos.....	2
1.3 Fitoplancton.....	2
1.3.1 Clorofíceas y Cianobacterias.....	3
1.4 Cianotoxinas.....	3
1.5 impacto lluvia ácida sobre el fitoplancton	4
2. ANTECEDENTES.....	5
3. JUSTIFICACION.....	6
4. OBJETIVOS.....	7
4.1 Objetivo general.....	7
4.2 Objetivos particulares.....	7
5. MATERIAL Y METODOS.....	8
5.1 Área de estudio.....	8
5.2 Colecta.....	8
5.3 Determinación fitoplancton.....	8
5.4 Clorofila <i>a</i>	9
5.5 Microcistinas.....	9
5.6 Monitoreo calidad del aire y precipitaciones y variación espacial.....	9
6. RESULTADOS.....	10
7. DISCUSION.....	37
8. CONCLUSION.....	46
9. LITERATURA CITADA.....	48
10. ANEXOS.....	53
Anexo 1. Procedimiento para la detección de microcistinas mediante el kit envirologix™ quantiplate™ kit for microcystins.....	53
Anexo 2. Listado de especies registradas en el lago Tezozómoc.....	55
Anexo 3. Conteos celulares de las especies..... presentes en el lago Tezozómoc	56

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Relación de la precipitación anual en la temperatura del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con la temperatura del lago Tezozómoc.....	10
Gráfica 2. Relación de la precipitación anual en el pH del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el pH del lago Tezozómoc.....	11
Gráfica 3. Relación de la precipitación anual en el oxígeno disuelto del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el oxígeno disuelto del lago Tezozómoc.....	12
Grafica 4. Relación de la precipitación anual en el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el porcentaje de oxígeno disuelto del lago Tezozómoc.....	13
Gráfica 5. Relación de la precipitación anual en el nivel de clorofila a ($\mu\text{g/L}$) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el nivel de clorofila a ($\mu\text{g/L}$) del lago Tezozómoc.....	14
Gráfica 6. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de dióxido de azufre (SO_2) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el promedio de siete días antes del muestreo de dióxido de azufre (SO_2) del lago Tezozómoc.....	15
Grafica 7. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de los óxidos de nitrógeno (NO_x) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el promedio de siete días antes del muestreo de óxidos de nitrógeno (NO_x) del lago Tezozómoc.....	16
Grafica 8. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de monóxido de carbono (CO) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el promedio de siete días antes del muestreo de monóxido de carbono (CO) del lago Tezozómoc.....	17
Grafica 9. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de materia particulada (PM) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el promedio de siete días antes del muestreo de la materia particulada (PM) del lago Tezozómoc.....	18

Gráfica 10. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de ozono(O_3) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y promedio de siete días antes del muestreo de ozono (O_3) del lago Tezozómoc.....19

Grafica 11. Relación de la precipitación anual sobre la abundancia de clorofíceas y cianobacterias del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con la abundancia de clorofíceas y cianobacterias del lago Tezozómoc.....21

Gráfica 12. Relación de la precipitación anual sobre las especies más dominantes de clorofíceas del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con la abundancia de clorofíceas del lago Tezozómoc.....22

Grafica 13. Relación de la precipitación anual sobre las especies más dominantes de cianobacterias del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con la abundancia de cianobacterias del lago Tezozómoc.....23

Grafica 14. Relación de la precipitación anual en el nivel de microcistina-LR del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con el nivel de microcistina-LR del lago Tezozómoc.....24

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sitio de muestreo lago Tezozómoc Azcapotzalco, México. Fuente Google maps (2018).....8

Figura 2. Ubicación espacial de los puntos de monitoreo de los contaminantes atmosféricos y de las precipitaciones ubicados alrededor del lago Tezozómoc.....25

Figura 3. Distribución espacial concentraciones atmosféricas de monóxido de nitrógeno (NO) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....26

Figura 4. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de dióxido de nitrógeno (NO_2) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....27

Figura 5. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de óxidos de nitrógeno (NO_x) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....28

Figura 6. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de dióxido de azufre (SO ₂) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....	29
Figura 7. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de materia particulada (PM ₁₀) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....	30
Figura 8. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de materia particulada (PM _{10-2.5}) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....	31
Figura 9. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de materia particulada (PM _{2.5}) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....	32
Figura 10. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de monóxido de carbono (CO) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....	33
Figura 11. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de ozono (O ₃) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....	34
Figura 12. Distribución espacial de la precipitación acumulada (mm) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).....	35
Figura 13. Análisis de correspondencia canónica (ACC) de los parámetros fisicoquímicos y su relación con las especies presentes en el lago Tezozómoc.....	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Listado de taxas de clorofíceas y cianobacterias.....	20
presentes en el lago Tezozómoc.	

1. INTRODUCCIÓN

Una problemática que ha ido creciendo a lo largo de los años, es la contaminación atmosférica producto del uso de combustibles fósiles derivado de las actividades antropogénicas como industria, transporte y urbanización, lo que incrementa las concentraciones de gases y partículas contaminantes en la atmósfera (Singh & Agrawal, 2008). Estos desechos se arrojan a la atmósfera en forma de polvo, humos y gases, siendo estos últimos los más peligrosos y causantes de la lluvia ácida, así como del efecto invernadero incrementando los niveles del ozono y el monóxido de carbono, que son altamente tóxicos para los humanos (Garcés & Hernández, 2004).

1.1 Lluvia ácida

El agua de lluvia se forma cuando las moléculas de vapor de agua se condensan sobre cristales de hielo o de sal en la atmósfera o sobre minúsculas partículas de polvo en las nubes, para formar gotas de agua que responden a la gravedad terrestre y caen formando la lluvia (Inzuza, 2019). El agua de lluvia normal o el agua de la atmósfera naturalmente registra un pH entre 5.7 y 7.0, por lo que es considerada ligeramente ácida, esto es por el dióxido de carbono (CO_2) del aire que forma ácido carbónico (H_2CO_3); parte de los contaminantes atmosféricos cuando entran en contacto con el agua presente en la atmósfera llegan a generar un fenómeno conocido como lluvia ácida; la cual se caracteriza por tener un pH inferior a 5.6, que puede llegar hasta 2.5 y excepcionalmente a 1.0 (Garcés & Hernández, 2004, Rodríguez & Sánchez, 2005).

De los contaminantes presentes, los principales responsables del fenómeno de la lluvia ácida son los óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales al interaccionar con la humedad de la atmósfera forman algunos ácidos, tales como ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3), ácido nitroso (HNO_2) y óxido nítrico (NO) siendo los mayores precursores de la lluvia ácida (Menz & Seip, 2004).

En México es posible encontrar distintos componentes presentes en la lluvia, los cuales van desde algunos metales traza (Al, Cd, Cr, Pb, Ni, Mn, V) en fracciones de lluvia solubles e insolubles y iones (SO_4^{-2} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , HCO_3^-) solo para las fracciones solubles; los cuales se especula que son provenientes de industrias y plantas termoeléctricas, que se encuentran al sur de la Ciudad de México (Báez *et al.*, 2007). Todos estos compuestos se depositan por medio de la lluvia o la nieve y es lo que se conoce como deposición húmeda, de igual forma también ocurre otro proceso atmosférico conocido como

deposición seca en donde partículas tales como cenizas o gases, como el dióxido de azufre (SO₂) o el óxido nítrico (NO) se depositan o se adsorben sobre las superficies, siendo los cuerpos de agua los más afectados por estos procesos (Bravo *et al.*, 2003).

1.2 Lagos Urbanos

A lo largo de la ciudad es posible encontrar algunos cuerpos de agua artificiales denominados lagos urbanos que también resultan afectados por la lluvia ácida; estos cuerpos de agua forman parte de lo que sería la ecología urbana, además contribuyen a mejorar la calidad de vida y a mitigar el clima urbano, proveen actividades educativas y recreativas como la navegación, además de sus usos estéticos, por lo que se consideran de importancia para los habitantes de las ciudades y el turismo (Mancini *et al.*, 2012).

En estos tipos de lagos es bastante común la eutrofización proceso originado por el incremento de nutrientes, debido a que existe una fuerte carga de fósforo por la escorrentía de las aguas pluviales, descargas municipales, sistemas sépticos defectuosos y desagües de aguas residuales. Con frecuencia los lagos urbanos mantienen sus niveles con aguas tratadas o bien actúan como receptores de vertidos lo que favorece el proceso de eutrofización, de igual forma existen fuentes internas de fósforo y nitrógeno derivado del excremento de las aves, aguas residuales y liberación de sedimentos (Schueler & Simpson, 2001); traduciéndose en una alta y fluctuante densidad del fitoplancton con frecuentes cambios en su composición (Oliva-Martínez *et al.*, 2008).

1.3 Fitoplancton

En los lagos urbanos es común la presencia de fitoplancton, compuesto por organismos fotosintetizadores microscópicos que se ubican, fundamentalmente en la columna de agua y cumplen con un papel fundamental en los procesos biogeoquímicos. Incorporan y transforman elementos inorgánicos a formas orgánicas, requeridas para el desarrollo y crecimiento de otros organismos con los que comparten su hábitat, además de ser la base de las redes tróficas e indicadores de la calidad de agua (Oliva-Martínez *et al.*, 2014). Por lo antes mencionado el fitoplancton ha ganado importancia como una herramienta de monitoreo dentro de los planes de manejo y recuperación de lagos urbanos, esto debido a las características fisiológicas, metabólicas y morfológicas específicas, con las que logran adaptarse a condiciones ambientales muy particulares y gracias a que pueden ocupar nichos específicos (Rodríguez, 2008).

1.3.1 Clorofíceas y Cianobacterias

Dentro del fitoplancton es posible encontrar distintos grupos, las clorofíceas son conocidas como algas verdes, de las cuales el 90% de las especies registradas pertenecen a aguas dulces (Hernández-Becerril, 2014). Por otra parte, las cianobacterias son un grupo de algas conocidas como algas verde-azules las cuales son las únicas microalgas procariotas (Lee, 2008). Estas últimas con excelentes adaptaciones competitivas frente a otras comunidades donde los nutrientes como el fósforo y nitrógeno no solo favorecen el desarrollo de estas comunidades, sino también la producción de cianotoxinas que resultan en algunas afectaciones para los distintos organismos que habitan el sistema, siendo los géneros que producen estas toxinas *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Microcystis*, *Aphanizomenon* y *Nodularia* (Campos *et al.*, 2005).

1.4 Cianotoxinas

Las cianotoxinas son un conjunto de compuestos tóxicos de distinta naturaleza química producidos como metabolitos secundarios (Cantoral *et al.*, 2017). La función de estas toxinas se ha asociado como un mecanismo de defensa para contrarrestar la competencia con otras algas que componen el fitoplancton (Guevara & Calix, 2018). Con base en su naturaleza química se clasifican en: péptidos cíclicos (heptapéptidos y pentapéptidos), organofosforados naturales (Cantoral *et al.*, 2017). Sin embargo, para términos prácticos se pueden clasificar según su efecto sobre los organismos como: hepatotoxinas, neurotoxinas y dermatotoxinas (Almanza *et al.*, 2016).

Dentro de la gran variedad de toxinas, las microcistinas (MCs) es posible encontrarlas comúnmente en los lagos urbanos, debido a que son producidas por varios géneros de cianobacterias particularmente por el género *Microcystis* (Pineda-Mendoza, *et al.*, 2012). Estas son potentes hepatotoxinas que presentan un riesgo para los organismos que habitan en los cuerpos de agua, teniendo afectaciones en peces, invertebrados y otra fauna acuática. Disminuyendo su diversidad y alterando las interacciones entre los organismos dentro de la comunidad (Cantoral *et al.*, 2017). Debido a estas afectaciones se han propuesto algunos límites permisibles, la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017, agua para uso y consumo humano, establece como límite permisible 1 µg/L de microcistina-LR. No obstante, para aguas recreativas como los lagos urbanos no hay una regulación en nuestro país. Por lo que la agencia estadounidense de protección del medio ambiente (EPA) recomienda como límite permisible en aguas recreativas una concentración de 8 µg/L de microcistina-LR.

1.5 Impacto de la lluvia ácida sobre el fitoplancton

La lluvia ácida puede generar diversas problemáticas las cuales van desde afectaciones a la salud, deterioro de edificaciones y piezas arquitectónicas, desgaste de paisaje hasta efectos sobre cuerpos de agua (Granados, *et. al*, 2010). Estos últimos son los más susceptibles de sufrir cambios, ocasionando que los cuerpos de agua tengan niveles de pH por debajo de los que normalmente presentan.(EPA, 2011) Por ello estas variaciones en el pH del agua puede tener un efecto directo en el pH de los fluidos del cuerpo de un organismo y de esta forma afectar la velocidad de las reacciones químicas dentro de ellos (Montes-Pérez, 2016), por esta razón la gran mayoría de los organismos son altamente susceptibles a los cambios en el pH de su alrededor (Granados *et al.*, 2010). Con estos cambios, la acidificación del medio lleva a que las especies declinen o desaparezcan y la relación presa-depredador de la red de alimentación se pueda ver afectada (Rodríguez & Sánchez, 2005).

Otro impacto de la acidificación en los cuerpos de agua es sobre los productores primarios debido a que afecta tanto la composición de las especies como la abundancia del fitoplancton (Haines, 1981). Se ha observado el efecto de estas variaciones de pH mostrando que incrementa la transparencia del agua y disminuye la concentración de clorofila-a cuando el pH disminuye (Kwiatkowski & Roff, 1976). Sin embargo, otros autores mencionan que el fenómeno de la lluvia ácida sobre las comunidades de fitoplancton puede incrementar la concentración de clorofila-a mediante la adición de nutrientes durante los periodos donde existe una limitante (Manny, *et al.*, 1987).

ANTECEDENTES

- En 1987 Manny y colaboradores estudiaron el efecto de la lluvia ácida sobre el crecimiento del fitoplancton en el lago de Michigan, demostrando que el agua de lluvia estimula la producción de clorofila-a y además el fósforo presente en la lluvia puede ser el factor causante de esta estimulación cuando otras fuentes de fósforo se encuentran limitadas.
- En el 2007 Báez y colaboradores determinaron la composición química del agua de lluvia colectada al sureste de la Ciudad de México durante las temporadas de lluvia del 2001 y el 2002, encontrando distintos metales traza como Al, Cd, Cr Mn, Pb, Ni, V, y Cd, asimismo encontraron SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- , H^+ , Na^+ , Mg^{2+} y K^+ asociados a contaminantes de origen antropogénico derivados de la actividad industrial.
- En el 2008 Oliva-Martínez y colaboradores determinaron la composición fitoplactonica del lago hipertrófico urbano Tezozómoc ubicado en la Ciudad de México, realizaron durante todo un año muestreos mensuales de superficie en la zona litoral y limnética del lago, midieron distintos parámetros fisicoquímicos; en la composición del fitoplancton encontraron una riqueza de 50 especies, siendo el grupo de las clorofíceas el grupo más abundante y con mayor número de especies en, sin embargo en los meses de septiembre y diciembre dos especies de *Microcystis* fueron muy abundantes en el lago.
- En el 2018 Sosa-Echeverría y colaboradores analizaron la variación espacial y temporal de la composición química de la lluvia ácida de la Ciudad de México de 2003 a 2014, donde realizaron la colecta de lluvia semanalmente analizando los iones principales (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^-), pH y conductividad eléctrica en 16 estaciones de muestreo ubicadas en la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), encontrando que el pH disminuye de norte a sur y el valor más bajo anual que se registró es de 4.64 en el año 2006.
- En el 2018 Llanas evaluó el efecto del ácido sulfúrico componente de la lluvia ácida sobre *Scenedesmus* spp. y *Microcystis panniformis* en dos lagos urbanos de la Ciudad de México, estableciendo que existe una relación positiva en cuanto a la densidad celular. Sin embargo, en cuanto a la producción de microcistina-LR no se encontró una relación muy clara con las densidades celulares de *M. panniformis*.
- En el 2018 Zavala evaluó el efecto del óxido de nitrógeno contenido en la lluvia ácida en clorofíceas y cianobacterias, reportando que existe una relación con el aumento en la densidad celular No obstante en cuanto a la relación de las densidades celulares con respecto a la producción de microcistinas-LR no se reportó una relación muy clara.

JUSTIFICACIÓN

A lo largo de los años ha aumentado el interés sobre el impacto de los contaminantes atmosféricos producto de la urbanización e industrialización en distintos escenarios, uno de ellos es el efecto de la lluvia ácida sobre las comunidades de fitoplancton en los lagos urbanos y un interés en particular sobre su posible influencia en la producción de toxinas por parte de las cianobacterias. Algo que no resulta raro es que las ciudades que cuentan con una mayor urbanización, industrialización y tránsito vehicular sean las que presentan los peores índices de calidad de atmosférica, un ejemplo claro son Bangladesh, Pakistán e India que de acuerdo al informe “2018 World Air Quality Report” realizado por IQair Air Visual donde posiciona a los países con peores índices de calidad atmosférica y en el que nuestro país también ocupa el lugar número 33 dentro de esta lista ocasionado por distintas fuentes de emisión.

El acceso a distintas fuentes de información nos permite indagar más acerca del fenómeno de la lluvia ácida a través del monitoreo de las emisiones diarias de los contaminantes atmosféricos y de las precipitaciones. No obstante, esta no es la única fuente de información acerca de este proceso, el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos en los cuerpos de agua y la dinámica del fitoplancton, nos proporciona un panorama más amplio siendo las comunidades de fitoplancton muy susceptibles a los cambios en el pH del agua.

Por lo que con este trabajo se pretende abordar el impacto de los contaminantes atmosféricos en lo que respecta a una zona altamente industrializada ubicada al norte de Ciudad de México. Las recientes y constantes contingencias ambientales han llevado a tomar medidas preventivas para salvaguardar la salud de los habitantes, sin embargo se han dejado de lado el impacto en otros organismos en especial el fitoplancton y sus posibles afectaciones. Si bien algunos trabajos han analizado las afectaciones de los principales precursores de la lluvia ácida en algunos grupos de fitoplancton han dejado de lado la interacción entre todos los contaminantes atmosféricos así como las afectaciones en la dinámica dentro de las comunidades y su relación con la producción de cianotoxinas.

OBJETIVO GENERAL

- Analizar el efecto de la lluvia ácida sobre la comunidad de clorofíceas y cianobacterias presentes en el lago Tezozómoc (lago urbano en la Ciudad de México).

OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar los parámetros fisicoquímicos del lago Tezozómoc para relacionarlos con la calidad atmosférica y la precipitación.
- Analizar la riqueza y abundancia de clorofíceas y cianobacterias presentes en el sistema para asociarlas con la calidad atmosférica y la precipitación pluvial en el lago Tezozómoc.
- Relacionar la cantidad de microcistinas en el lago Tezozómoc con la calidad atmosférica y la precipitación pluvial en ese cuerpo de agua.
- Buscar la relación entre los distintos niveles de los contaminantes atmosféricos y la precipitación pluvial en las alcaldías y municipios aledaños al lago Tezozómoc para determinar cómo las actividades antropogénicas influyen en la dinámica del lago.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El lago Tezozómoc ubicado al noroeste de la alcaldía Azcapotzalco en la Ciudad de México, entre las coordenadas 19° 29' 05" N y 99° 12' 36" O, a una altura de 2250 m.s.n.m. (Oliva-Martínez, *et al.*, 2008). Presenta un clima templado subhúmedo con verano fresco largo con pocas oscilaciones. La superficie del lago es de aproximadamente, 17,000 m², con una profundidad mínima de 0.5 m y una máxima de 2.10 m, con capacidad de 33,000 m³. El agua que lo abastece, proviene de la planta de tratamiento "El Rosario", con una afluencia diaria de 6 L (Contreras-Rivero, *et al.*, 2005).



Figura 1. Sitio de muestreo lago Tezozómoc Azcapotzalco, México. Fuente Google maps (2018).

Colecta

Se realizaron muestreos mensuales durante un año en el punto señalado del lago de Tezozómoc (Figura 1), se filtraron 20 L de agua, con la ayuda de una malla para fitoplancton de 20 μm , depositando el concentrado en envases de plástico y vidrio y fijándolas con aceto-lugol para la conservación y posterior determinación de las especies de algas presentes en el lago. También se tomaron muestras de agua para la determinación de clorofila *a* y cianotoxinas en laboratorio, en cuanto a los parámetros fisicoquímicos, se midieron *in situ* pH, oxígeno disuelto (OD), saturación de oxígeno y temperatura con ayuda de una sonda multiparamétrica marca HACH *hydrolab* DS5X.

Determinación fitoplancton

De las muestras colectadas se tomó 1 mL de las muestras previamente fijadas con aceto-lugol y fue colocado en la cámara de Sedgewick-Rafter, se dejó reposar durante 5 minutos para la sedimentación de los organismos, posteriormente se llevó a un microscopio de luz invertida. Para la determinación taxonómica se consultó literatura especializada Prescott

(1975) y Komárek y Fott (1983). El conteo celular se realizó en un total de 30 campos dentro de la cámara de Sedgewick-Rafter que de acuerdo a Mcalice (1971) el recuento en 30 campos determina el 90 y el 95% de las especies representantes en una muestra, finalmente se aplicó la siguiente ecuación:

$T = [(C)/(N)] * 1000$ donde:

T = población en 1mL de muestra,

C = número de organismos cuantificados

N = número de campos

Clorofila a

Las muestras colectadas, se filtraron en un equipo millipore utilizando un filtro de microfibras de vidrio, posteriormente se maceró con acetona al 90%, y se conservaron en refrigeración a -4° C por 24 horas, después se centrifugaron a 5,000 rpm durante 5 minutos y finalmente se midió la absorbancia del sobrenadante por medio de un fluorómetro marca TURNER designs trilogy medido a una longitud de onda de excitación de 485 nm.

Microcistinas

Se congelaron las muestras a 0°C, posteriormente se sonicaron durante una hora en un equipo Ultra sonic LC 30 H a 50 hzt, este proceso se realizó tres veces, para después poder centrifugar a 10,000 rpm durante 10 minutos, se tomó el sobrenadante y se pasó por un filtro de ésteres de celulosa de 0.45 µm. Debido a la alta concentración de microcistina en las muestras se realizó una dilución 1:5 para que fuera posible su medición con el Kit EnviroLogix™ Quantiplate™ Kit for microcystins (anexo1).

Monitoreo calidad del aire y precipitaciones y variación espacial

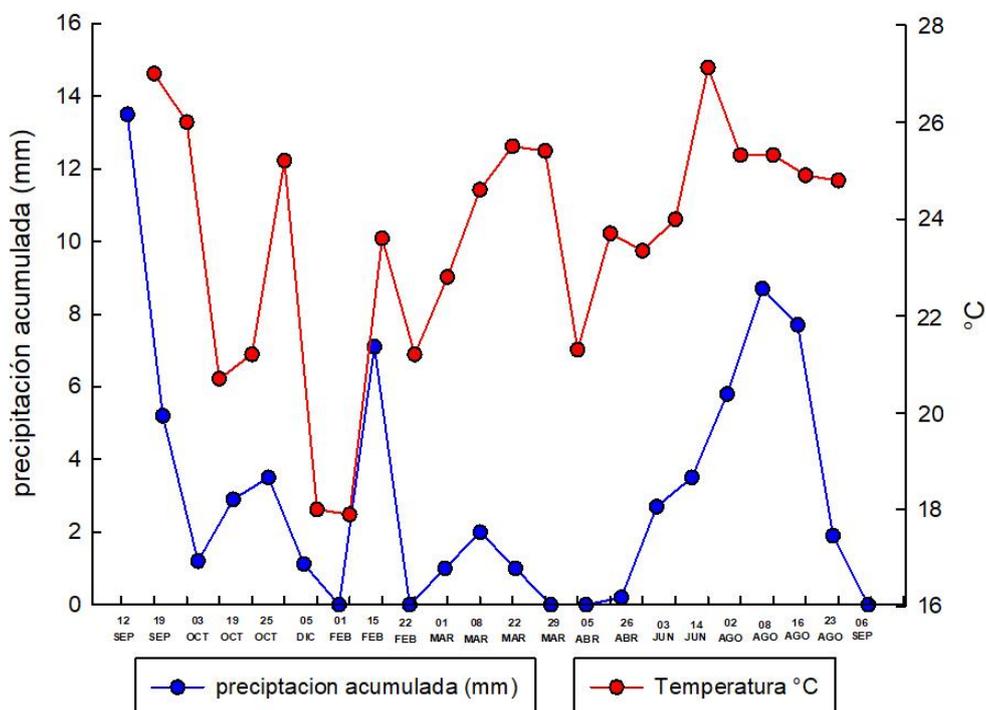
En cuanto al monitoreo de la calidad del aire se realizó a través de la dirección de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México, donde se tomaba el promedio de las concentraciones de O₃, CO, SO₂, NO, NO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{10-2.5} siete días antes del muestreo a realizar, asimismo, se registró la cantidad de precipitación acumulada (mm) siete días antes del muestreo a través del sistema meteorológico nacional y The Weather Channel; estos registros se realizaron tanto en las alcaldías de la Ciudad de México (Azcapotzalco, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc) como en los municipios del Estado de México (Naucalpan y Tlalnepantla) aledaños al lago Tezozómoc.

Asimismo, con los datos obtenidos se realizó mediante el programa arcGIS la distribución espacial de las concentraciones de los contaminantes y la precipitación acumulada de las distintas alcaldías y municipios aledaños al lago Tezozómoc.

RESULTADOS

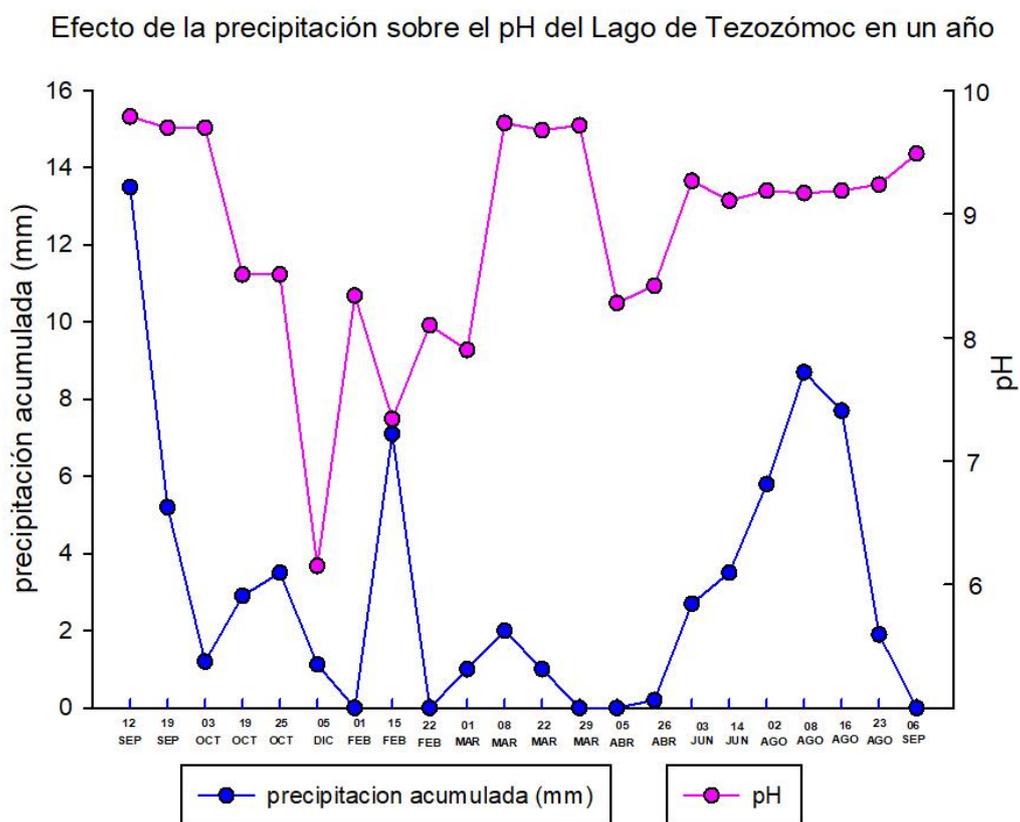
En la gráfica 1 se observa la relación entre la precipitación acumulada siete días antes del muestreo con respecto a la temperatura del lago Tezozómoc, los niveles de temperatura se encontraron en un rango de 17.9 a 27.1° C, el nivel más bajo de temperatura presentó una precipitación acumulada de 0 mm correspondiente al 01 de febrero del 2019, en cambio el nivel más alto de temperatura que se registró corresponde al 14 de Junio del 2019 con una precipitación acumulada de 13.5 mm. En los meses de junio a septiembre la temperatura se mantuvo elevada con una precipitación constante y en el periodo de octubre a febrero la temperatura disminuyó, así como precipitaciones escasas o incluso ausentes.

Efecto de la precipitación sobre la temperatura del Lago de Tezozómoc en un año



Gráfica 1. Relación de la precipitación anual y la temperatura del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y la temperatura del lago Tezozómoc.

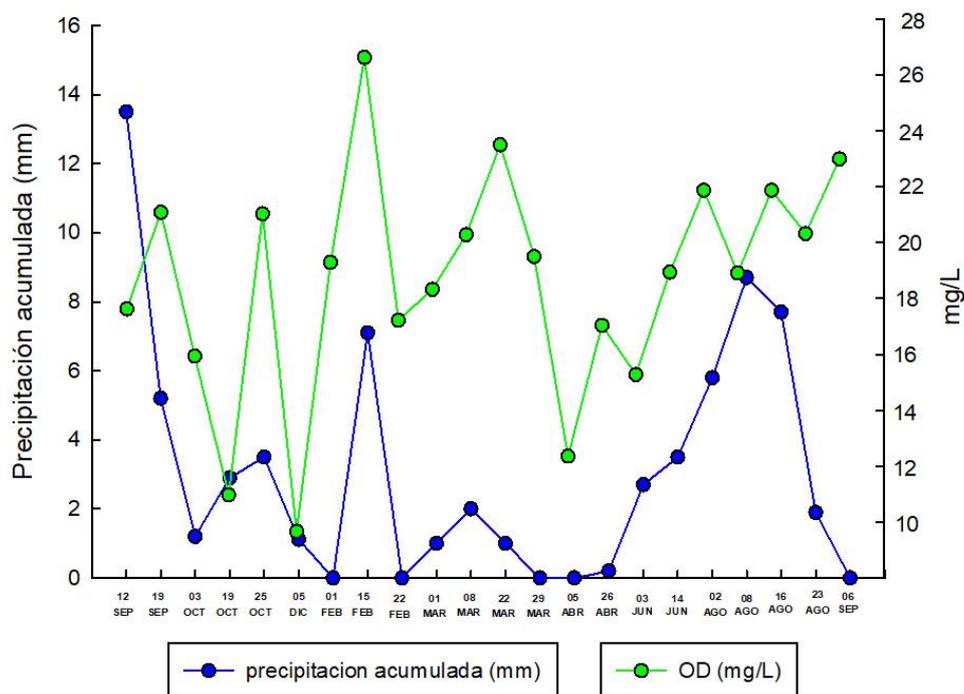
En cuanto a la relación de la precipitación acumulada con respecto al nivel de pH en el lago Tezozómoc se registraron valores que van desde 6.15 a 9.79, el valor más alto de pH registró una precipitación acumulada de 13.5 mm el 12 de septiembre del 2019, en cambio el nivel más bajo de pH presentó una precipitación acumulada de 1.12 mm el cual corresponde al 05 de diciembre del 2018 (grafica 2). Las mayores oscilaciones en el nivel de pH se registraron de octubre a febrero presentando pocas precipitaciones, en cambio en el periodo de junio a septiembre el pH se mantuvo de una manera constante, además de lluvias más presentes.



Gráfica 2. Relación de la precipitación anual en el pH del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y pH del lago Tezozómoc.

La relación entre la precipitación acumulada con respecto a la cantidad de oxígeno disuelto presente en el lago Tezozómoc se muestra en la gráfica 3, en la cual los niveles registrados oscilan desde los 9.67 mg/L a 26.62 mg/L, el valor más alto corresponde a la fecha 15 de febrero del 2019 con una precipitación acumulada de 7.1 mm, y el valor más bajo de oxígeno disuelto en el lago Tezozómoc se registró durante al 05 de diciembre del 2018. con una precipitación acumulada de 1.12 mm. Los niveles más bajos se registraron durante octubre a diciembre, llegando a presentar oscilaciones amplias, con precipitaciones bajas en cambio a lo que corresponde los meses de junio a septiembre se comportaron de una forma más uniforme con precipitaciones más elevadas.

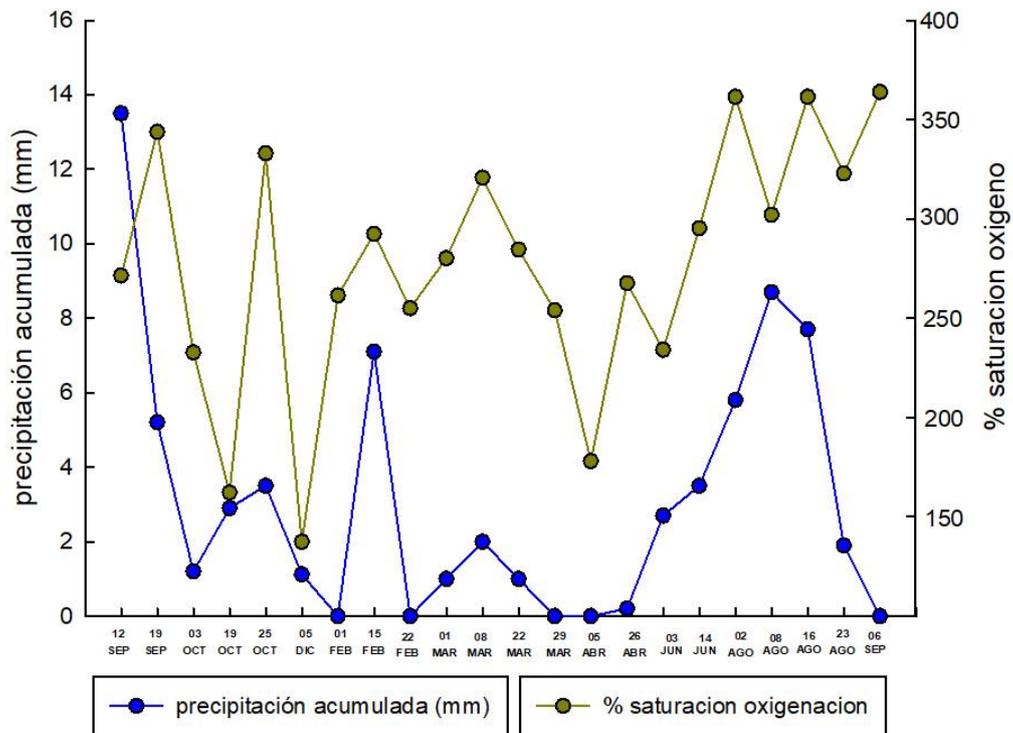
Efecto de la precipitación sobre el oxígeno disuelto del Lago de Tezozómoc en un año



Gráfica 3. Relación de la precipitación anual en el oxígeno disuelto del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y oxígeno disuelto del lago Tezozómoc.

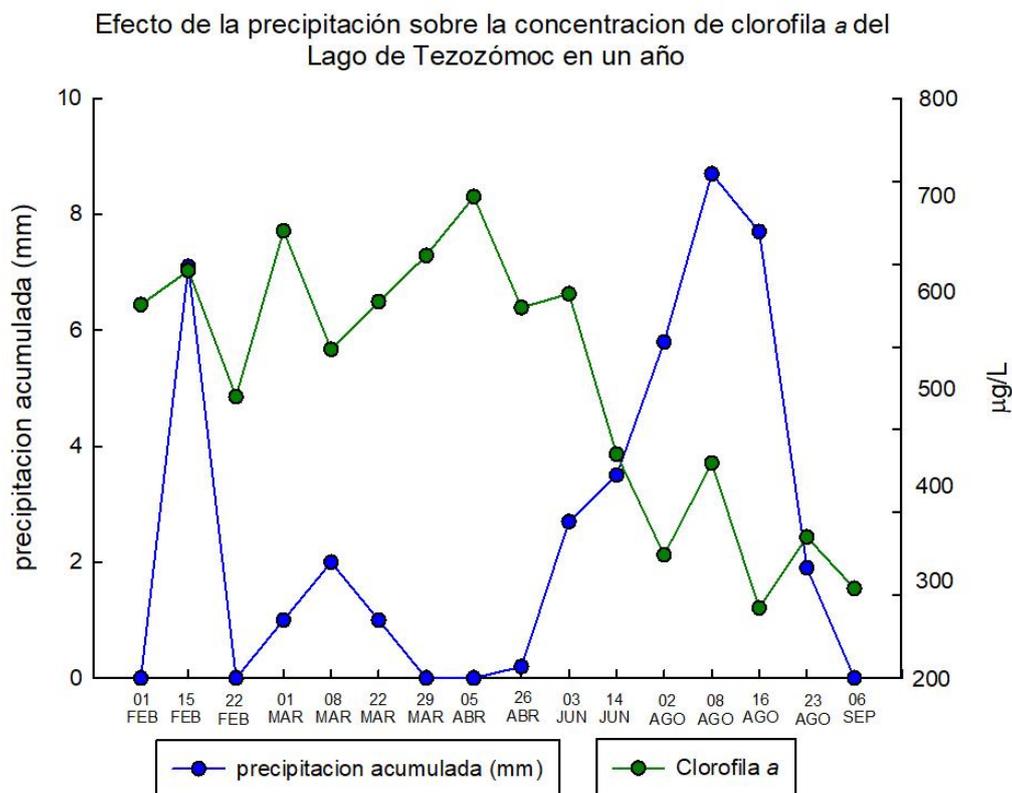
Los niveles de porcentaje de saturación de oxígeno disuelto con respecto a la precipitación acumulada en el lago Tezozómoc se muestra en la gráfica 4, en la cual se pueden observar valores que oscilan desde los 363.9% con una precipitación acumulada nula el 03 de septiembre del 2019, en cambio el nivel más bajo registrado fue de 137.5% con una precipitación acumulada de 1.12 mm el cual corresponde al 05 de diciembre del 2018.

Efecto de la precipitación sobre el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto del Lago de Tezozómoc en un año



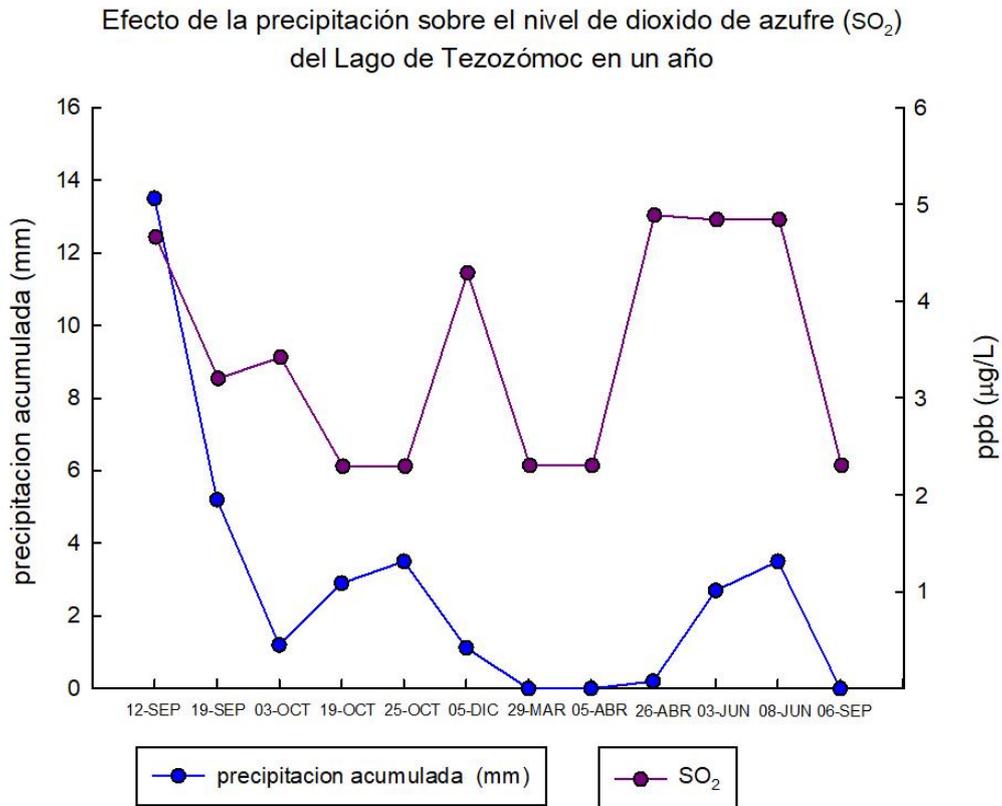
Grafica 4. Relación de la precipitación anual en el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y porcentaje de oxígeno disuelto del lago Tezozómoc.

La precipitación acumulada y niveles de clorofila *a* encontrados en el lago Tezozómoc se muestran en la gráfica 5, los valores registrados muestran una variación que va desde los 184.72 $\mu\text{g/L}$ a 681.38 $\mu\text{g/L}$, el valor más alto de clorofila *a* se registró el 05 de abril del 2019 sin precipitación acumulada, por el contrario el valor más bajo se presentó durante 16 de agosto del 2019 con una precipitación acumulada de 7.7 mm. Los niveles de clorofila *a* en su mayoría se mantuvieron constantes en los meses de febrero a abril con precipitaciones bajas o nulas, no obstante para el periodo de junio a septiembre se mantuvo a la baja la concentración de clorofila *a* con un aumento en las precipitaciones.



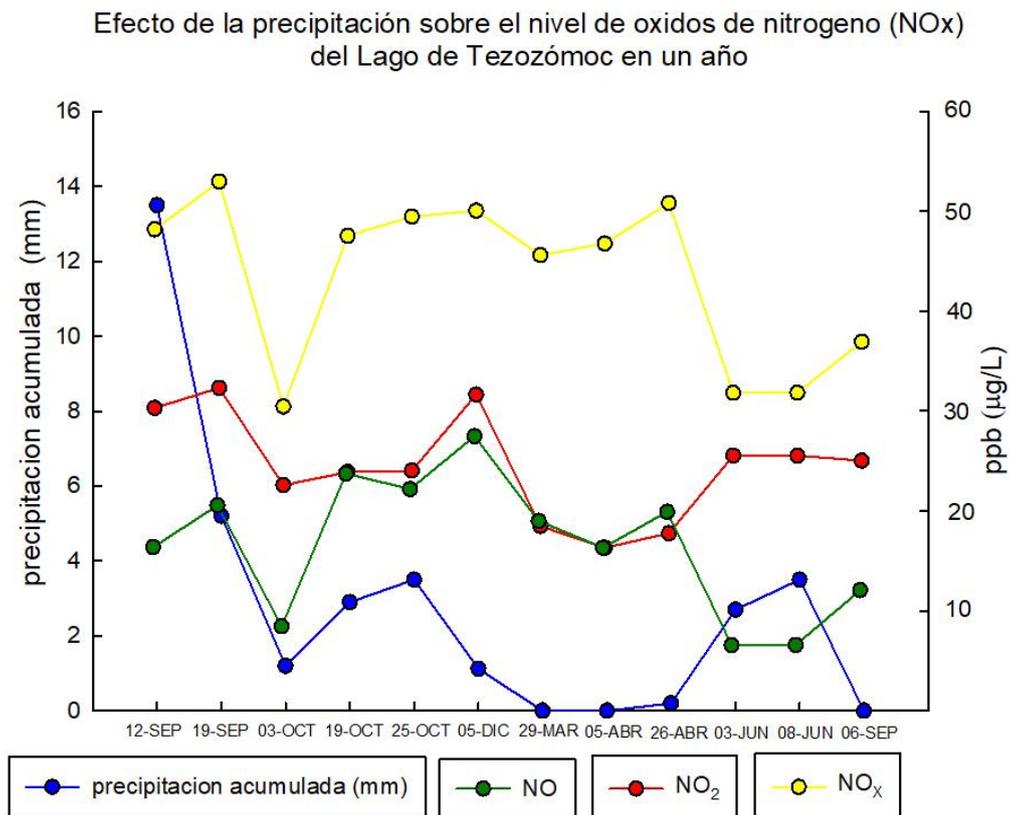
Gráfica 5. Relación de la precipitación anual en el nivel de clorofila *a* ($\mu\text{g/L}$) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y nivel de clorofila *a* ($\mu\text{g/L}$) del lago Tezozómoc.

En la gráfica 6 se reporta la precipitación acumulada y el promedio de los niveles de dióxido de azufre (SO₂), en donde concentraciones más altas de SO₂ fueron 4.88 µg/L con una precipitación acumulada de 0.22 mm el 26 de abril del 2019, los niveles más bajos de SO₂ fueron de 2.3 µg/L que se registraron en diferentes muestreos con fechas del 19 y 25 de octubre del 2018 y precipitación acumulada de 2.9 y 3.5 mm respectivamente, en cambio las fechas que registraron una precipitación acumulada nula fueron el 29 de marzo , 05 abril y 06 de septiembre del 2019.



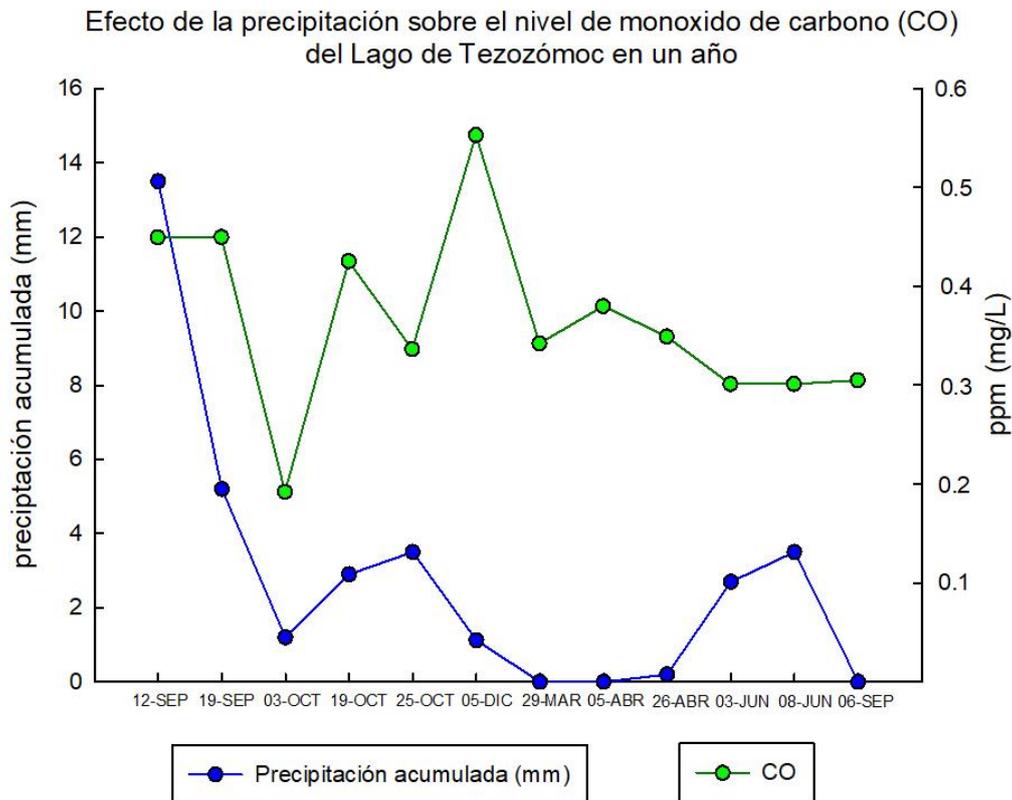
Gráfica 6. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de dióxido de azufre (SO₂) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y promedio de siete días antes del muestreo de dióxido de azufre (SO₂) del lago Tezozómoc.

En la gráfica 7 se observa la relación entre la precipitación acumulada siete días antes con respecto al promedio de monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, y NO_x) siete días antes del muestreo, las concentraciones más altas de NO, NO₂, y NO_x fueron 27.48 µg/L, 32.31 µg/L y 53.14 µg/L con una precipitación acumulada de 1.12, 5.2 y 5.2 mm respectivamente, las cuales corresponden a los muestreos del 05 de diciembre del 2018 (NO) y al 19 de septiembre del 2018 (NO₂ y NO_x); por el contrario las concentraciones más bajas de NO, NO₂, y NO_x fueron 6.55 µg/L, 16.03 µg/L y 30.61 µg/L respectivamente, presentando una precipitación acumulada de 2.7 y 3.5 mm para NO el 05 y 14 de junio del 2019, una precipitación nula para NO₂ el 05 de abril del 2019 y finalmente NO_x presentó una precipitación acumulada de 1.2 mm el 03 de octubre del 2018.



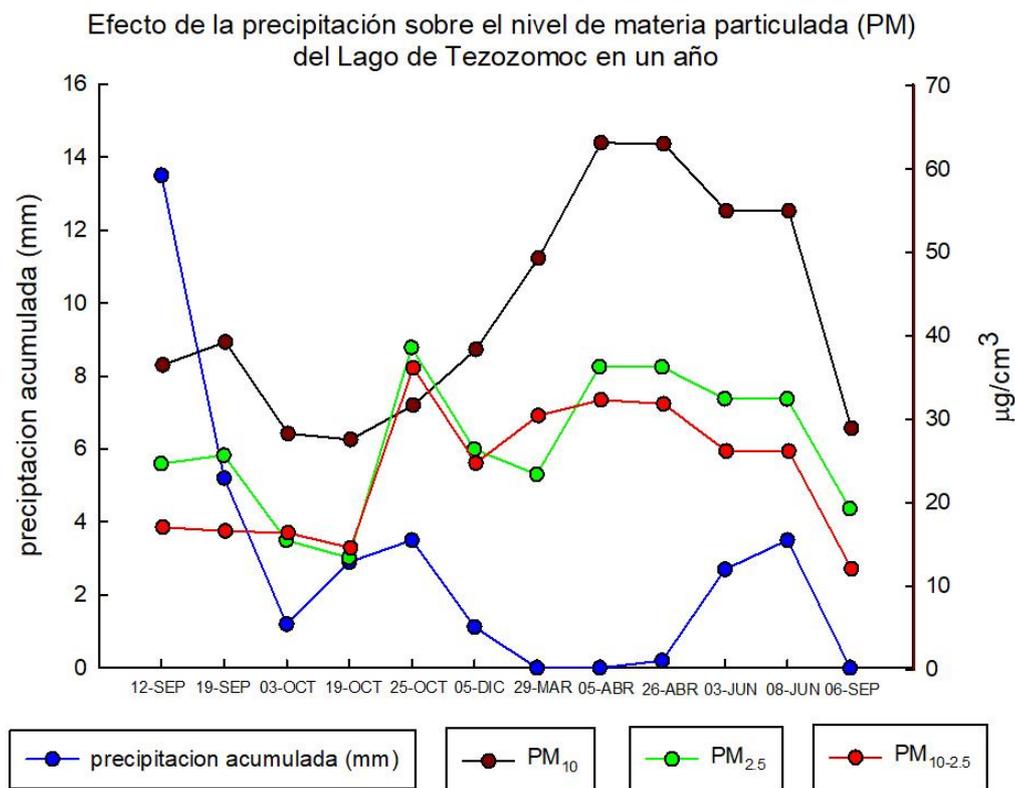
Gráfica 7. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de los óxidos de nitrógeno (NO_x) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y promedio de siete días antes del muestreo de óxidos de nitrógeno (NO_x) del lago Tezozómoc.

Los niveles en promedio de siete días antes del muestreo de monóxido de carbono (CO) con respecto a la precipitación acumulada se reportan en la gráfica 8, en donde la concentración más alta de CO fue 0.5529 mg/L presentando una precipitación acumulada de 1.12 mm a la fecha del 05 de diciembre del 2018, por el contrario el nivel más bajo de CO fue 0.1920 mg/L con una precipitación acumulada de 1.2 mm que corresponde al 03 de octubre del 2018.



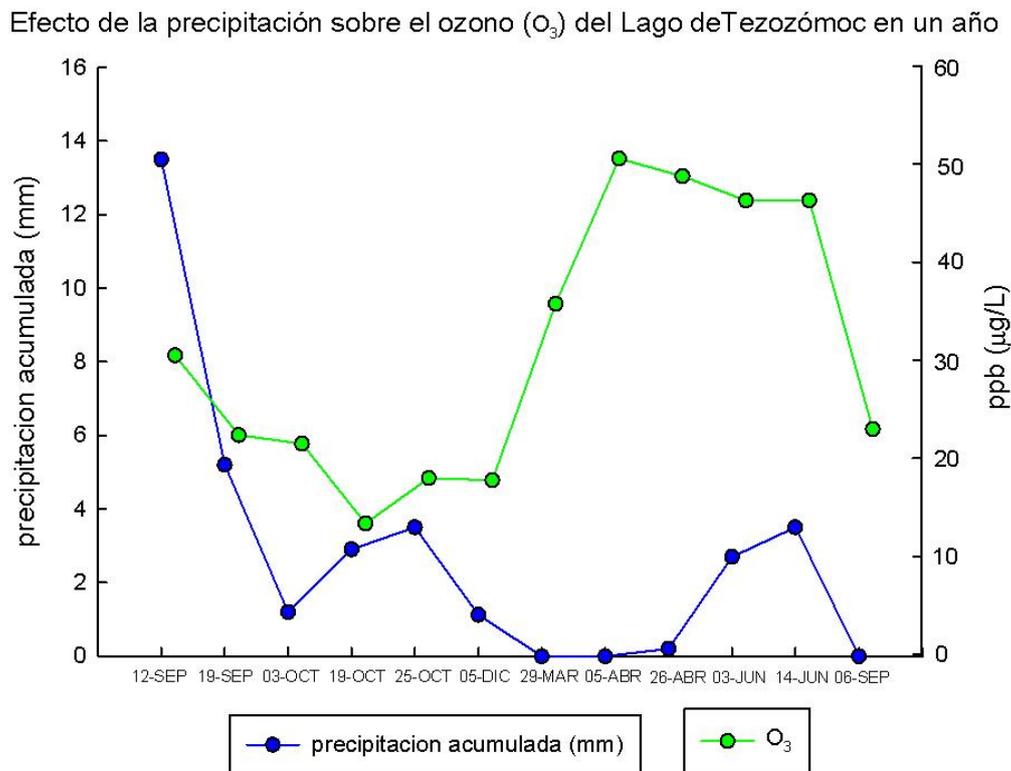
Gráfica 8. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de monóxido de carbono (CO) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y promedio de siete días antes del muestreo de monóxido de carbono (CO) del lago Tezozómoc.

La relación entre la precipitación acumulada siete días y el promedio siete días antes del muestreo de partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}), partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) y partículas fracción gruesa o “coarse” ($PM_{10-2.5}$) se muestran en la gráfica 9, donde las concentraciones más altas fueron $63.13 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ (PM_{10}), $35.87 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ ($PM_{2.5}$), y $33.38 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ ($PM_{10-2.5}$), las cuales presentaron una precipitación acumulada de 3.5 mm solo PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ el 25 de octubre del 2018, en cambio PM_{10} presento una precipitación acumulada nula el 05 de abril del 2019, por el contrario las concentraciones más bajas fueron $27.55 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ (PM_{10}), $12.42 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ ($PM_{2.5}$), y $11.025 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ ($PM_{10-2.5}$), las cuales registraron una precipitación acumulada de 2.9 mm el 19 de octubre del 2018 solo para PM_{10} y $PM_{2.5}$ y precipitación nula $PM_{10-2.5}$ el 06 de septiembre del 2019.



Gráfica 9. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de materia particulada (PM) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y promedio de siete días antes del muestreo de la materia particulada (PM) del lago Tezozómoc.

Los niveles en promedio de siete días antes del muestreo de ozono (O_3) con respecto a la precipitación acumulada se muestran a continuación en la gráfica 10, en donde la concentración más alta de O_3 fue $50.54 \mu\text{g/L}$ presentando una precipitación acumulada nula la cual corresponde al 05 de abril del 2019, por el contrario, el nivel más bajo de O_3 fue $13.35 \mu\text{g/L}$ con una precipitación acumulada de 2.9 mm que corresponde al 19 de octubre del 2018.



Gráfica 10. Relación de la precipitación anual en el nivel promedio de ozono(O_3) del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y promedio de siete días antes del muestreo de ozono(O_3) del lago Tezozómoc.

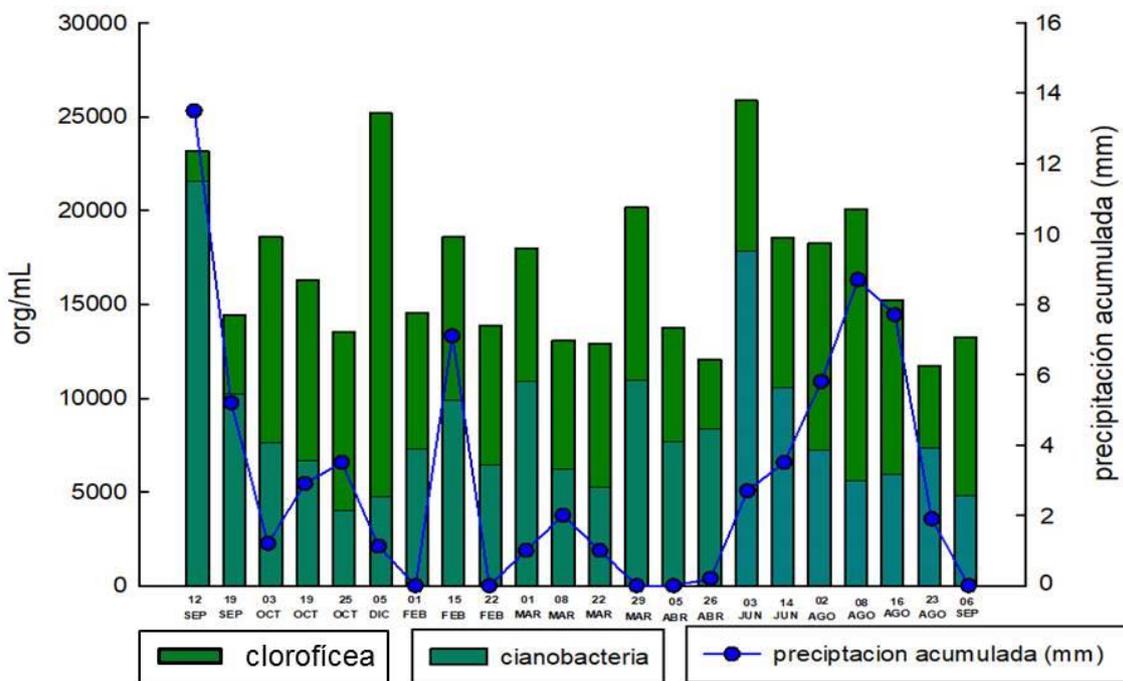
A continuación, se muestra en la tabla 1 el listado de especies presentes en el lago Tezozómoc, en donde se registraron un total de 22 especies entre las cuales solo 5 pertenecen a la división Cyanobacteria siendo la división Chlorophyta el grupo que presentó una mayor riqueza de especies a lo largo de los muestreos realizados en el lago Tezozómoc (ver anexo 1).

División: Chlorophyta	División: Cyanobacteria
Clase: Chlorophyceae	Clase: Cyanophyceae
Orden: Chlorococcales	Orden: Chroococcales
<i>Golenkinia radiata</i>	<i>Microcystis botrys</i>
<i>Pediastrum boryanum</i>	<i>Microcystis flos-aquae</i>
<i>Schroederia setigera</i>	<i>Spirulina major</i>
<i>Micractinium pusillum</i>	<i>Anabaena spiroides</i>
<i>Oocystis</i> spp.	<i>Merismopedia punctata</i>
<i>Kirchneriella lunaris</i>	
<i>Scenedesmus</i> spp.	
<i>Monoraphidium caribeum</i>	
<i>Monoraphidium griffithii</i>	
<i>Selenastrum minutum</i>	
<i>Tetraedron triangulare</i>	
<i>Coelastrum pseudomicroporum</i>	
Orden: Volvocales	
<i>Chlorogonium mínimum</i>	
<i>Chlamydomonas globosa</i>	
<i>Pteromonas angulosa</i>	
<i>Eudorina elegans</i>	
<i>Pandorina morum</i>	

Tabla 1. Listado de taxas de clorofíceas y cianobacterias presentes en el lago Tezozómoc.

La variación entre las abundancias de los grupos de clorofíceas y cianobacterias con respecto a la precipitación acumulada, el grupo dominante es su mayoría fue el de las cianobacterias, presentando 21,600 org/mL como su máximo el 12 de septiembre del 2018 con una precipitación acumulada de 13.5 mm y un mínimo de 4,070 org/mL el 25 de octubre del 2018 con una precipitación acumulada 3.5 mm, en cambio el grupo de las clorofíceas presentó 20,420 org/mL con un máximo el 05 de diciembre del 2018 y una precipitación acumulada de 1.12 mm y un mínimo 1,600 org/mL el 12 de septiembre del 2018 con una precipitación acumulada de 13.5 mm. En los meses de junio a septiembre las clorofíceas con respecto a la precipitación presentaron un aumento en el número de organismos y un descenso en el número de cianobacterias.

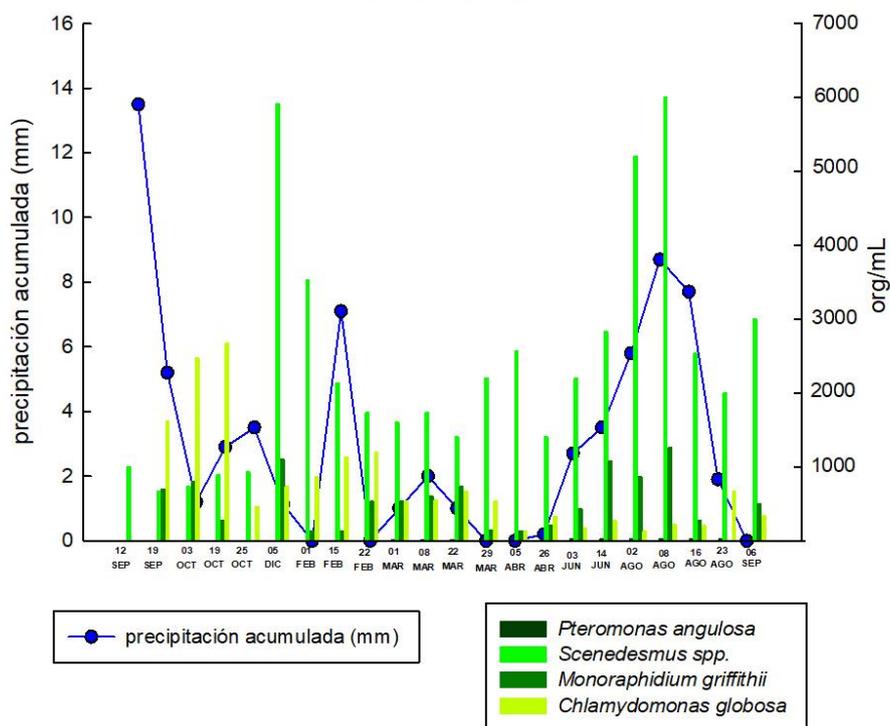
Efecto de la precipitación sobre la abundancia de clorofíceas y cianobacterias del Lago de Tezozómoc en un año



Gráfica 11. Relación de la precipitación anual sobre la abundancia de clorofíceas y cianobacterias del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y abundancia de clorofíceas y cianobacterias del lago Tezozómoc.

Las 4 especies más dominantes de clorofíceas fueron *Chlamydomonas globosa*, *Pteromonas angulosa*, *Scenedesmus* spp. y *Monoraphidium griffithii*. Las abundancias más altas fueron 4,800 org/mL (*Pteromonas angulosa*), 6,000 org/mL (*Scenedesmus* spp.) y 1,260 org/mL (*Monoraphidium griffithii*); con una precipitación acumulada de 1.12 mm que corresponde al 05 de diciembre para *Pteromonas angulosa* y una precipitación acumulada de 8.7 mm que corresponde al 08 de agosto del 2019 para *Scenedesmus* spp. En cambio, *Chlamydomonas globosa* su abundancia más alta fue 2670 org/mL con una precipitación acumulada 1.2mm correspondiente al 03 de octubre de 2018; por otra parte las abundancias más bajas fueron la ausencia de *Pteromonas angulosa*, *Chlamydomonas globosa* y *Monoraphidium griffithii*, sin embargo *Scenedesmus* spp. presentó la abundancia más baja con 660 org/mL y una precipitación acumulada de 5.2 mm que corresponde al 19 de septiembre del 2018.

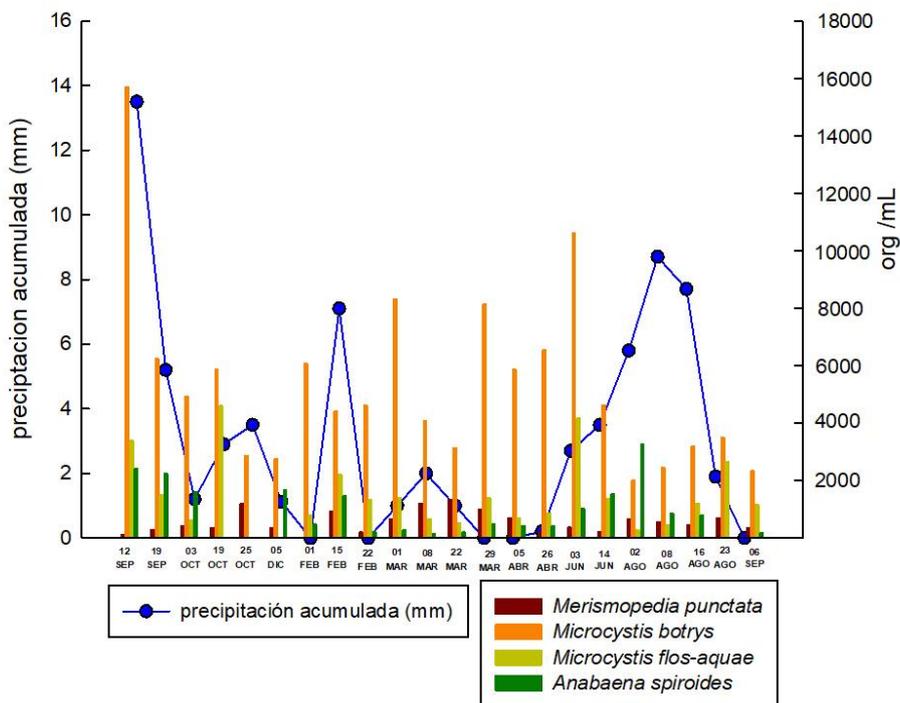
Efecto de la precipitación sobre las especies más dominantes de clorofíceas del Lago de Tezozómoc en un año



Gráfica 12. Relación de la precipitación anual sobre las especies más dominantes de clorofíceas del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo relacionándolo con la abundancia de clorofíceas del lago Tezozómoc.

Por otra parte, las 4 especies más dominantes de cianobacterias fueron *Merismopedia punctata*, *Anabaena spiroides*, *Microcystis flos-aquae* y *Microcystis botrys*. Las abundancias más altas registradas fueron 1,400 org/mL (*Merismopedia punctata*), 3,270 org/mL (*Anabaena spiroides*), 5,333 org/mL (*Microcystis flos-aquae*) y 15,700 org/mL (*Microcystis botrys*) con una precipitación acumulada de 1, 5.8, 2.7 y 13.5 mm que corresponden al 22 de marzo del 2019, 02 de agosto del 2019, 03 de junio del 2019 y 12 de septiembre del 2018 respectivamente; en cambio las abundancias más bajas fueron la ausencia para *Merismopedia punctata*, *Anabaena spiroides* y *Microcystis flos-aquae* sin embargo, la abundancia más baja de *Microcystis botrys* fue 200 org/mL con una precipitación acumulada de 5.8 el 02 de agosto del 2019.

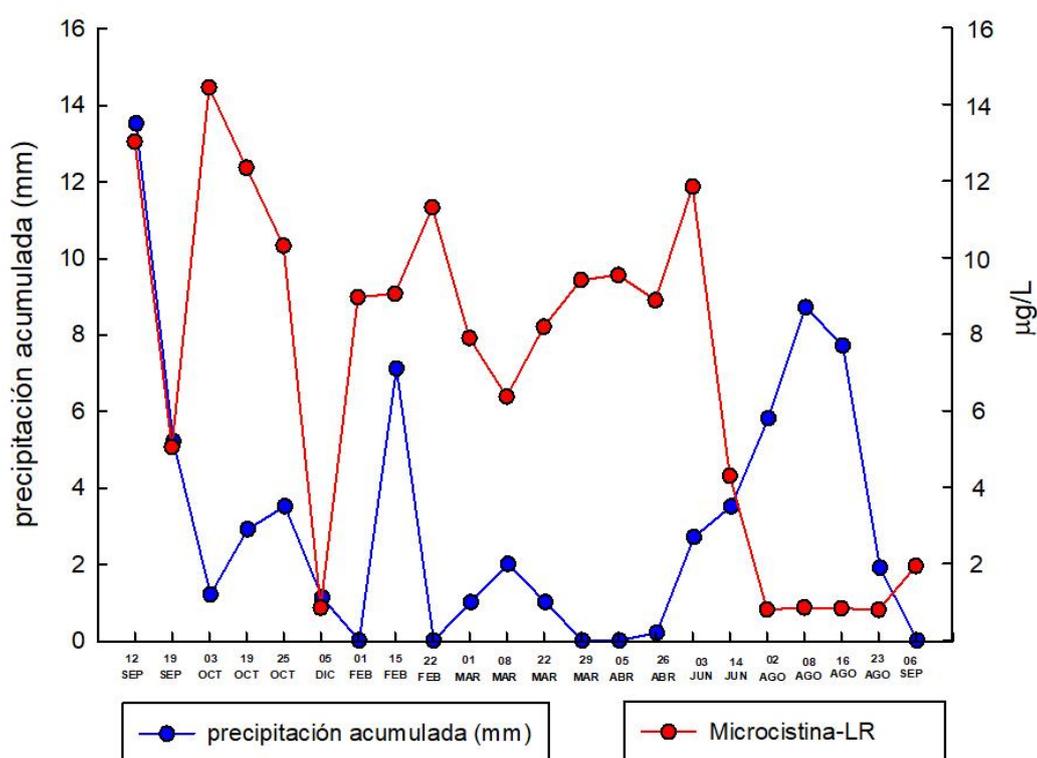
Efecto de la precipitación sobre las especies más dominantes de cianobacterias del Lago de Tezozómoc en un año



Gráfica 13. Relación de la precipitación anual sobre las especies más dominantes de cianobacterias del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y abundancia de cianobacterias del lago Tezozómoc.

En cuanto a los niveles de microcistina-LR registrados en el lago Tezozómoc y su relación entre la precipitación acumulada se muestra en la gráfica 13, en donde los valores de esta toxina muestran oscilaciones que van desde los 14.46 $\mu\text{g/L}$ con una precipitación acumulada de 1.2 mm el 03 de octubre del 2018 al nivel más bajo de microcistina-LR de 0.82 $\mu\text{g/L}$ con una precipitación acumulada 1.9 mm correspondiente al 23 de agosto del 2019. Los niveles de microcistina-LR presentaron bastantes oscilaciones a excepción de los meses de junio a septiembre donde se mantuvieron en concentraciones muy bajas con precipitaciones elevadas.

Efecto de la precipitación sobre la concentración de microcistina-LR del Lago de Tezozómoc en un año



Gráfica 14. Relación de la precipitación anual en el nivel de microcistina-LR del Lago de Tezozómoc. Medida tomada del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y The Weather Channel, monitoreo de la acumulación de la lluvia en siete días antes del muestreo y nivel de microcistina-LR del lago Tezozómoc.

Sistemas de información geográfica (SIG)

A través de los programas de percepción remota y con las bases de datos de los contaminantes atmosféricos de la dirección monitoreo atmosférico de la Ciudad de México y los niveles de precipitación del servicio meteorológico nacional, se realizó la interpolación de las concentraciones y lluvias en cada uno de los municipios y alcaldías que rodean al lago Tezozómoc siete días antes de cada muestreo realizado. La alcaldía Gustavo A. Madero no se tomó en cuenta debido a la falta de datos en cuanto a las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

Debido a que las estaciones de monitoreo de los contaminantes atmosféricos y los niveles de precipitación no se encuentran en el mismo punto de monitoreo como se puede apreciar en la figura 2, donde se muestra la ubicación espacial de cada uno de los puntos de monitoreo, por lo que se tomó como supuesto que ambas se encuentran ubicadas en las estaciones contaminantes.

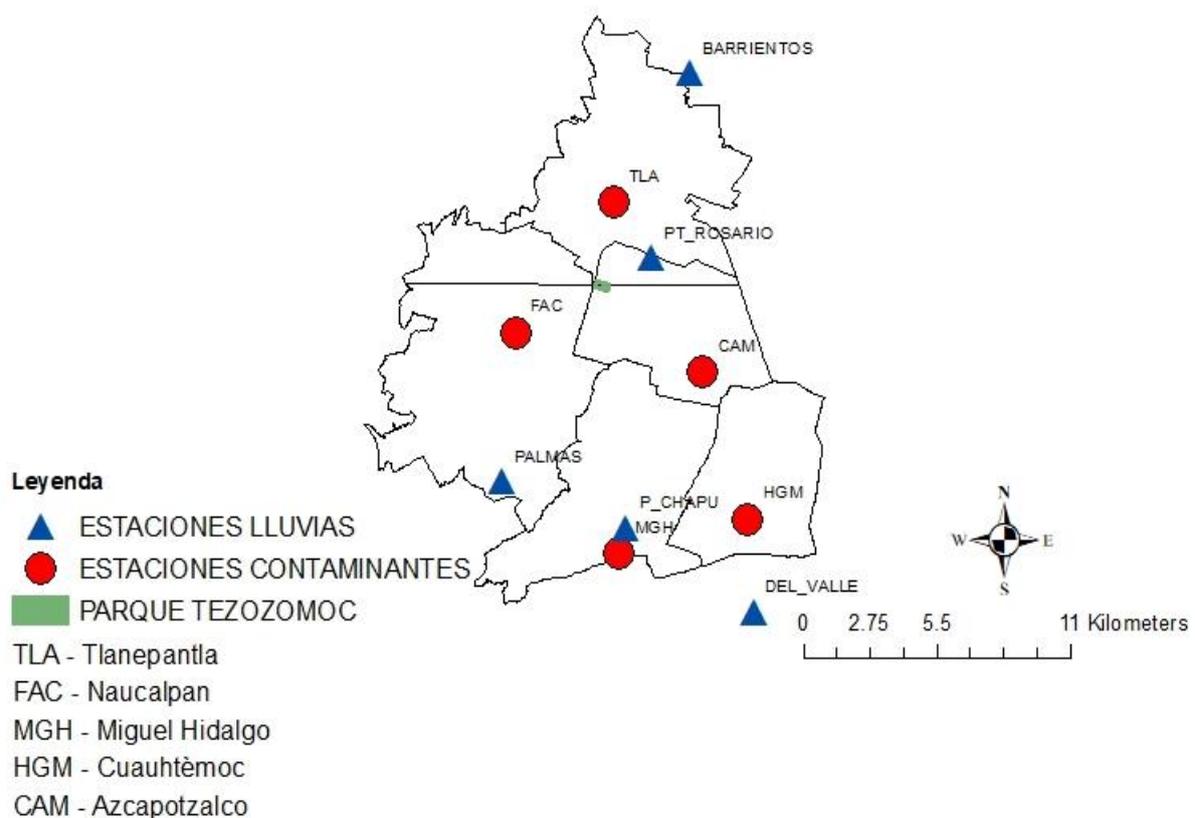


Figura 2. Ubicación espacial de los puntos de monitoreo de los contaminantes atmosféricos y de las precipitaciones ubicados alrededor del lago Tezozómoc.

En la figura 3 se muestra los niveles de monóxido de nitrógeno de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC), siendo Azcapotzalco, Tlalnepantla y Cuauhtémoc las zonas con una mayor concentración teniendo concentraciones de 28.205 a 30.308 $\mu\text{g/L}$ de NO.

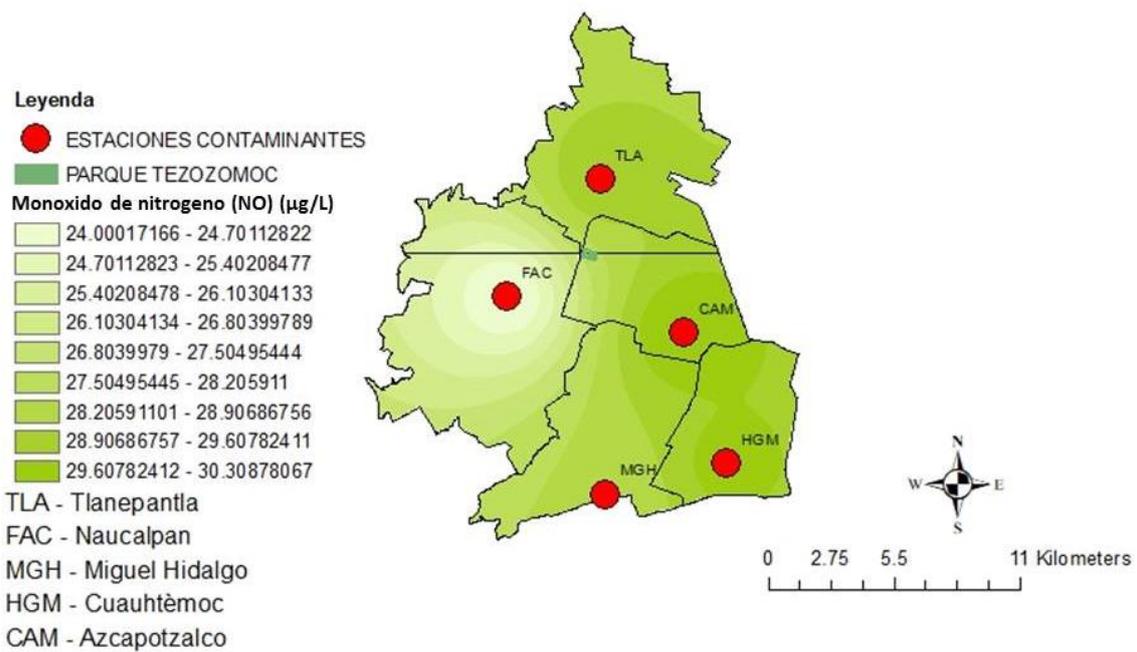


Figura 3. Distribución espacial concentraciones atmosféricas de monóxido de nitrógeno (NO) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

Los niveles de dióxido de nitrógeno (NO₂) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC) se muestran a lo largo de la figura 4, la cual muestra como las zonas de Azcapotzalco, Tlalnepantla y Cuauhtémoc son las que presentan las concentraciones más elevadas teniendo niveles que van desde los 28.205 a 30.308 µg/L de NO₂.

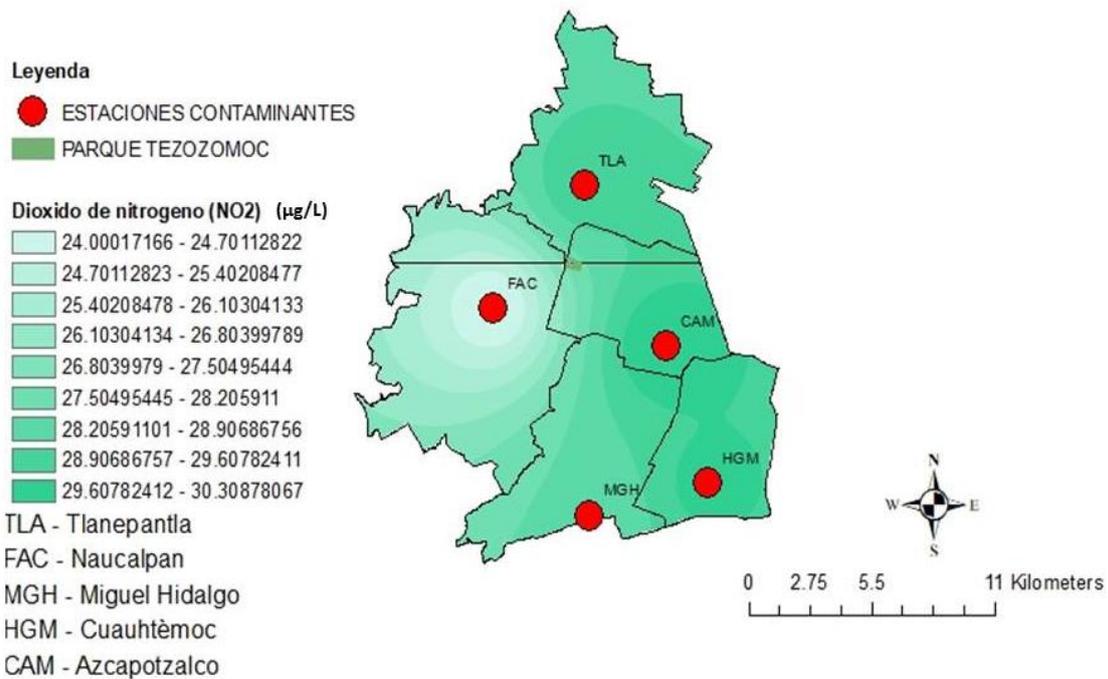


Figura 4. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de dióxido de nitrógeno (NO₂) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

La distribución espacial de los óxidos de nitrógeno (NO_x) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC) se muestran en la siguiente figura 5, siendo Azcapotzalco y Tlalnepantla las zonas con mayor concentración de óxidos de nitrógeno teniendo concentraciones de 46.44 a 48.341 $\mu\text{g}/\text{L}$.

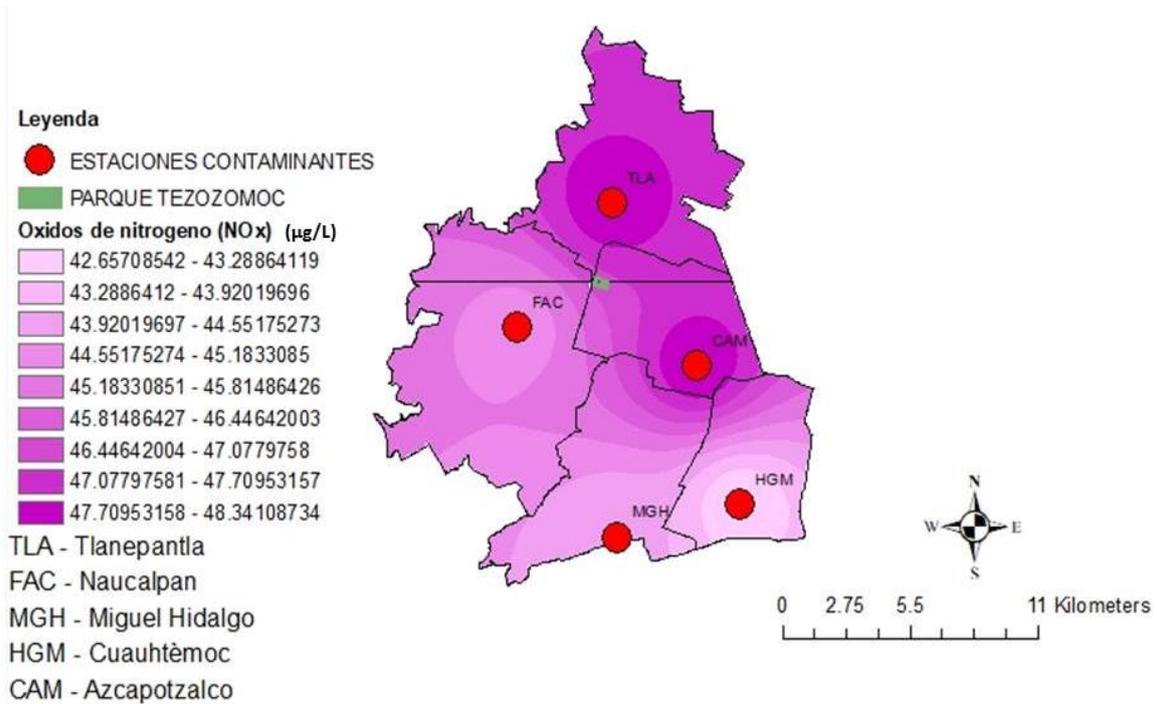


Figura 5. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de óxidos de nitrógeno (NO_x) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

La variación espacial del dióxido de azufre (SO₂) en las zonas que rodean al lago Tezozómoc se muestra en la figura 6, donde aparecen las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC), siendo Azcapotzalco, Cuauhtémoc y Tlalnepantla las zonas con una mayor concentración con valores de 4.110 a 4.659 µg/L de SO₂

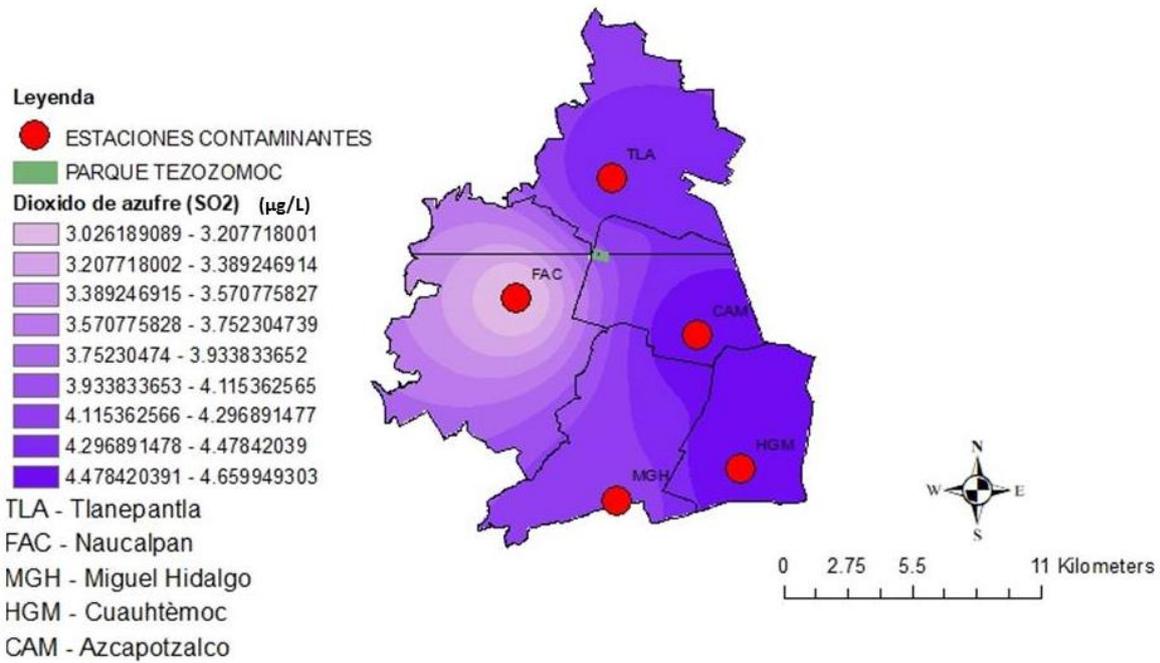


Figura 6. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de dióxido de azufre (SO₂) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

En la figura 7 se muestra los niveles de partículas menores a 10 micrómetros de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC), siendo Tlalnepantla la zona con una mayor concentración con valores de 37.275 a 44.458 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ de PM_{10} .

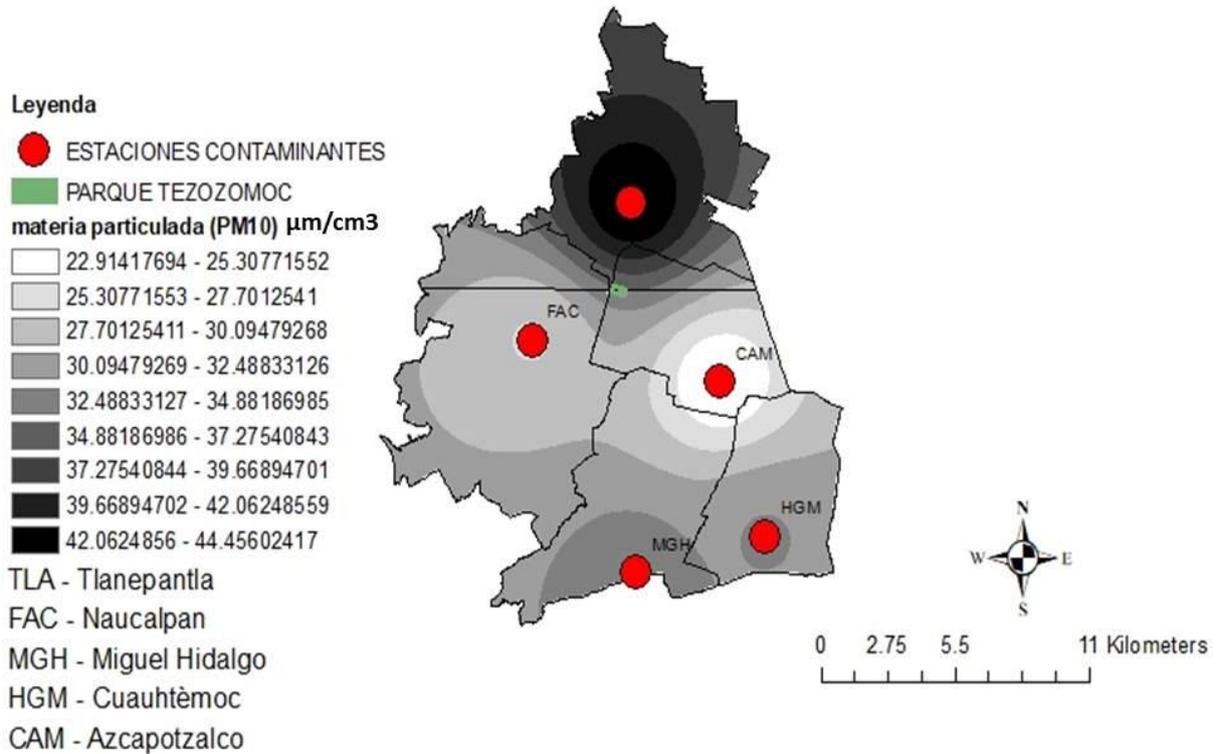


Figura 7. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de materia particulada (PM_{10}) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

Los niveles de partículas fracción gruesa o “coarse” de las alcaldías de la Ciudad de México se muestran a continuación en la figura 8 en la cual se observa la variación espacial en las alcaldías de Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC), siendo Azcapotzalco y Tlalnepantla las zonas con una mayor concentración con valores de 12.53 a 16.115 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$.

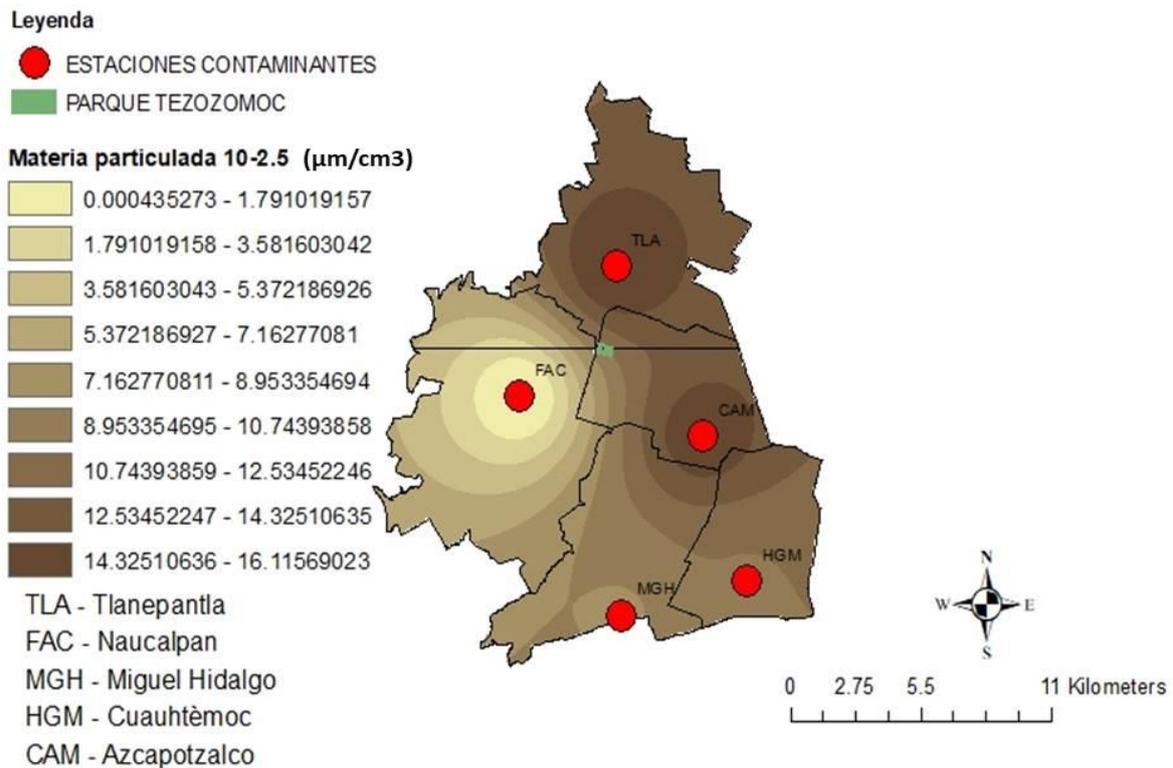


Figura 8. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de materia particulada ($\text{PM}_{10-2.5}$) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

En la figura 9 se muestra los niveles de partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC), siendo Azcapotzalco y Tlalnepantla las zonas con valores altos teniendo concentraciones de 12.53 a $16.115 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ de $PM_{2.5}$.

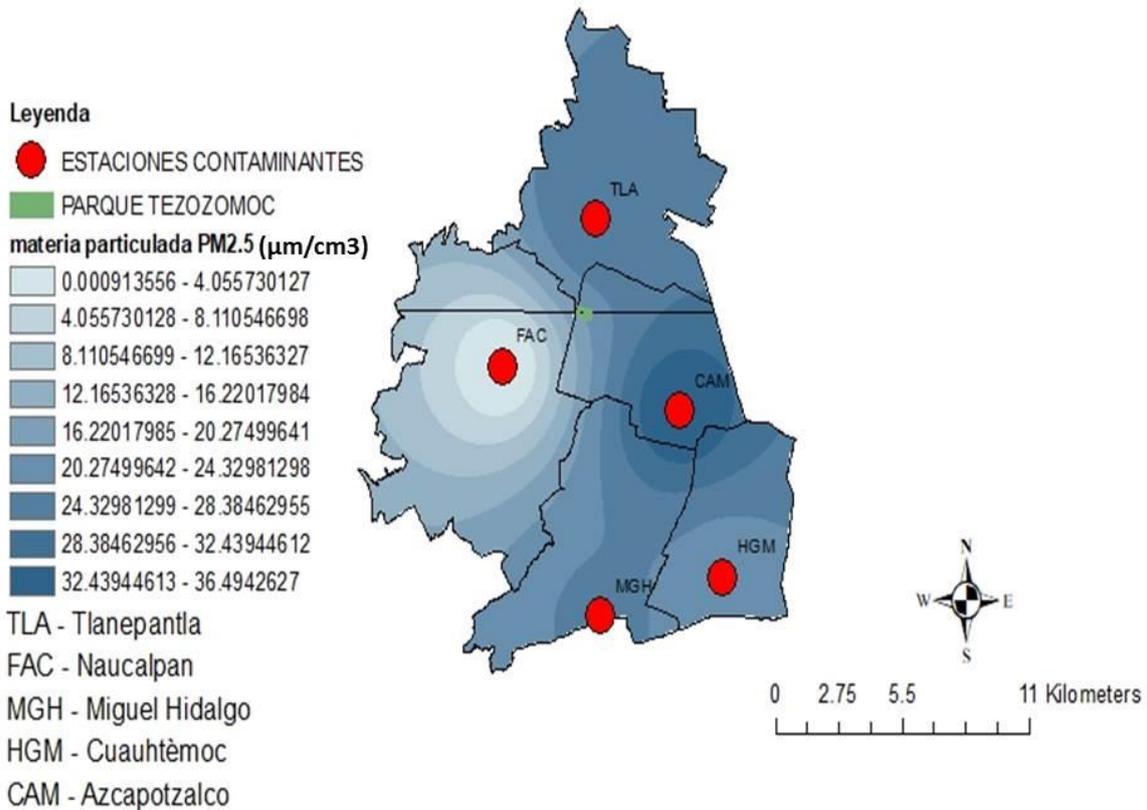


Figura 9. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de materia particulada ($PM_{2.5}$) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

La variación espacial de los niveles de monóxido de carbono (CO) a lo largo de las zonas que rodean al lago Tezozómoc tales como las alcaldías Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH) y Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC) se muestran en la figura 10, de las cuales resaltan Naucalpan y Tlalnepantla las zonas con una mayor concentración teniendo concentraciones 0.497 a 0.535 mg/L

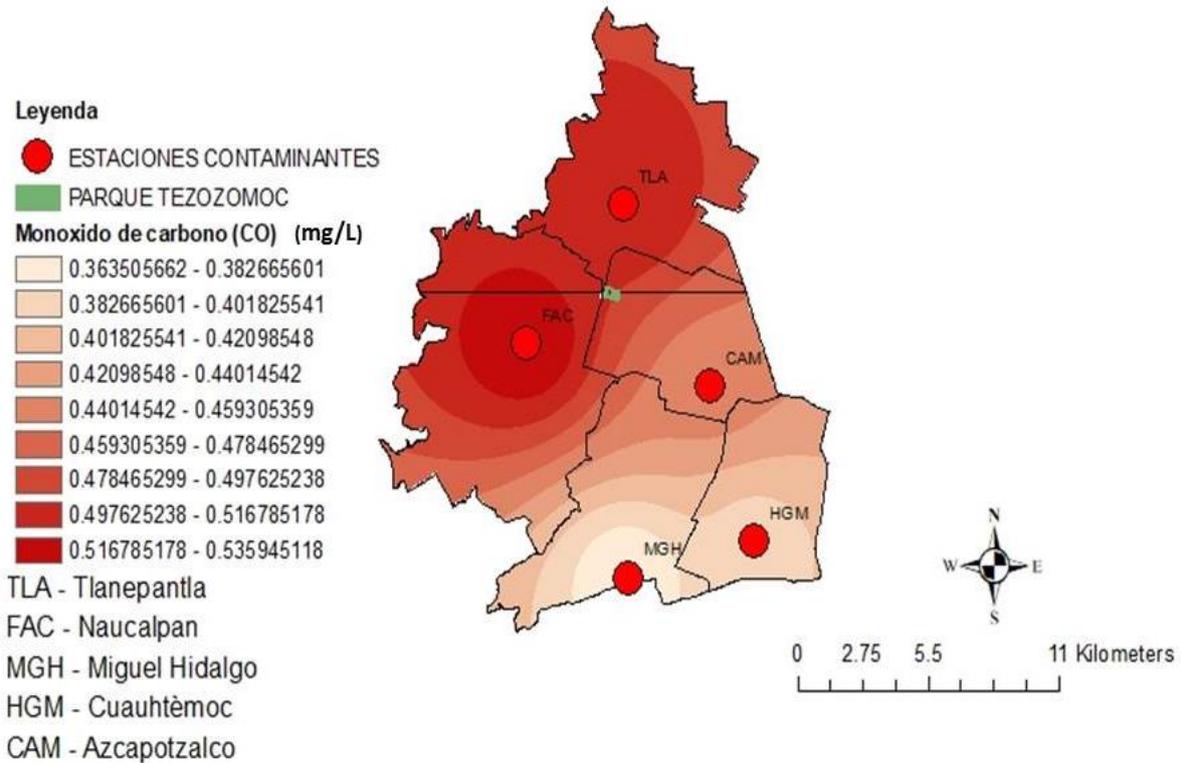


Figura 10. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de monóxido de carbono (CO) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

La variación espacial de los niveles de ozono (O_3) a lo largo de las zonas que rodean al lago Tezozómoc tales como las alcaldías Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH) y Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC) se muestran en la figura 11, de las cuales resalta Naucalpan con mayor concentración teniendo valores de 30.4897 a 28.8563 $\mu\text{g/L}$

Leyenda

● ESTACION CONTAMINANTES

■ PARQUE TEZOZOMOC

Ozono (O_3)

26,81463051 - 27,22297732

27,22297733 - 27,63132413

27,63132414 - 28,03967094

28,03967095 - 28,44801776

28,44801777 - 28,85636457

28,85636458 - 29,26471138

29,26471139 - 29,67305819

29,6730582 - 30,081405

30,08140501 - 30,48975182

TLA - Tlalnepantla

FAC - Naucalpan

MGH - Miguel Hidalgo

HGM - Cuauhtémoc

CAM - Azcapotzalco

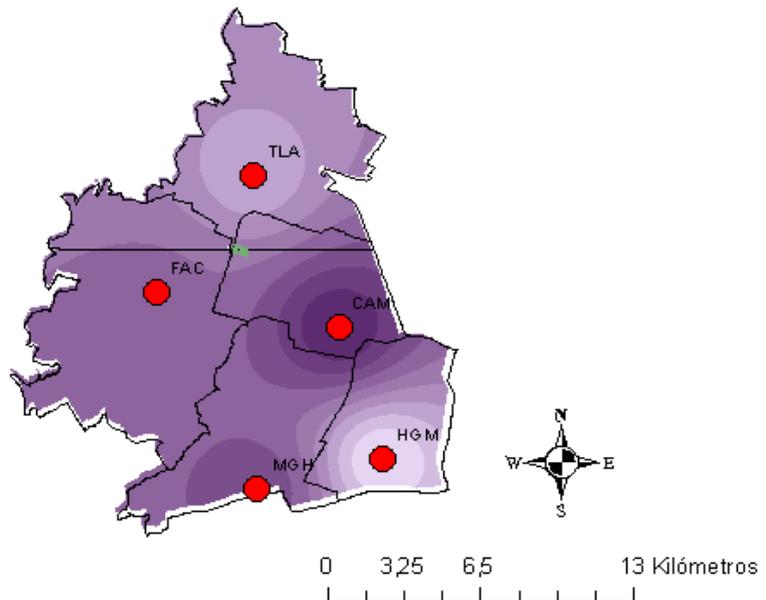


Figura 11. Distribución espacial de las concentraciones atmosféricas de ozono (O_3) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlalnepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

Las zonas con una mayor precipitación acumulada se muestran a continuación en la figura 12, la cual describe las diferentes zonas que tuvieron una mayor precipitación por una parte se encuentran las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlanepantla (TLA) y Naucalpan (FAC), siendo Cuauhtémoc la zona con una mayor precipitación acumulada con 47.928 a 38.044 mm.

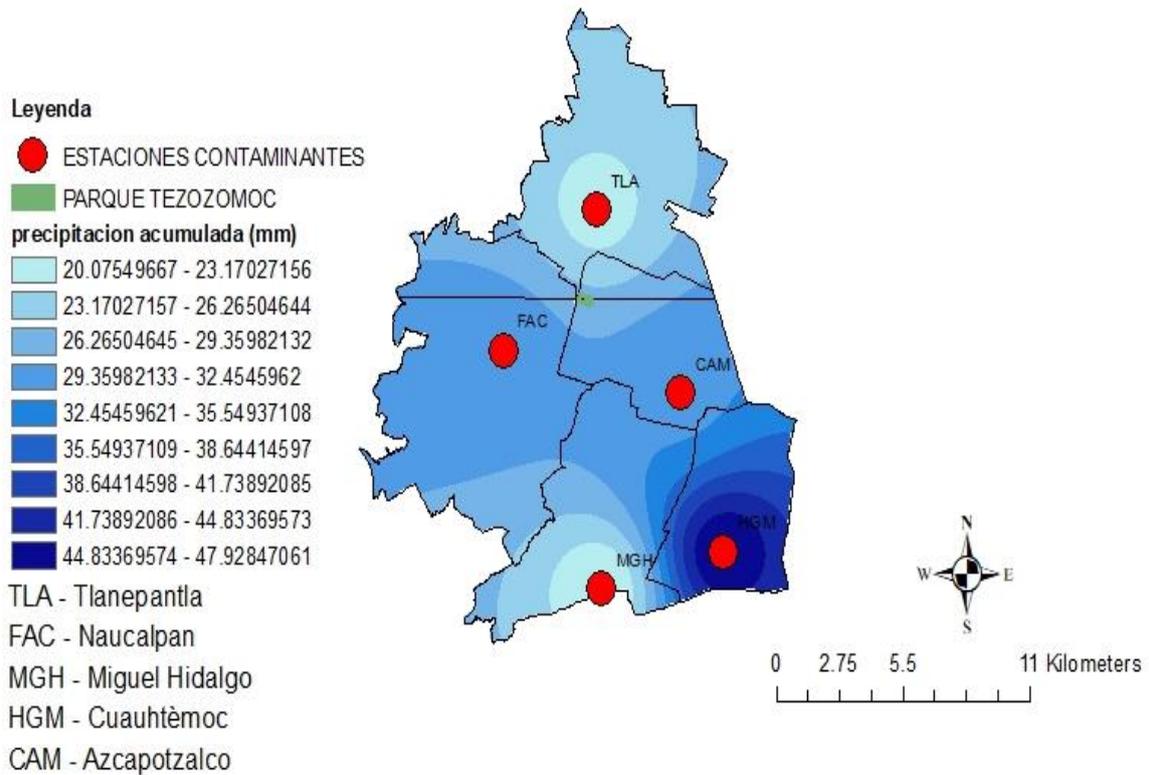


Figura 12. Distribución espacial de la precipitación acumulada (mm) de las alcaldías de la Ciudad de México: Azcapotzalco (CAM), Miguel Hidalgo (MGH), Cuauhtémoc (HGM) y los municipios del Estado de México: Tlanepantla (TLA) y Naucalpan (FAC).

En la figura 13 se observa el análisis de correspondencia canónica (ACC) de los parámetros fisicoquímicos y su relación con las especies del fitoplancton presentes en el lago Tezozómoc, donde se muestra la relación en cuanto a las variables ambientales (parámetros fisicoquímicos, contaminantes atmosféricos y lluvia) y variables biológicas (especies).

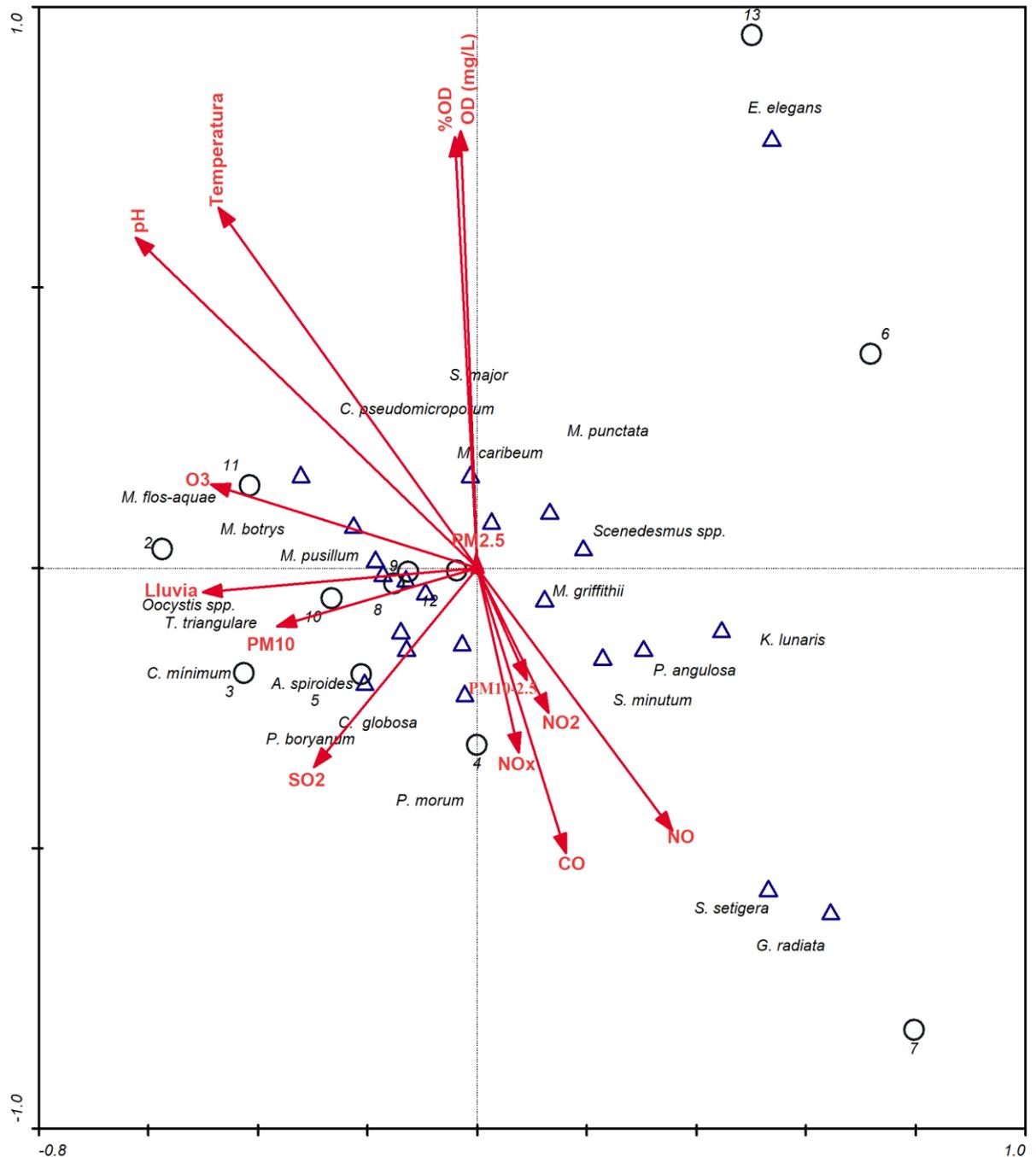


Figura 13. Análisis de correspondencia canónica (ACC) de los parámetros fisicoquímicos y su relación con las especies presentes en el lago Tezozómoc.

DISCUSIÓN

La temperatura en los cuerpos de agua es un factor importante el cual afecta distintos procesos físicos, químicos y biológicos (Degermendzhy *et al.*, 2010). En el lago de Tezozómoc se registraron distintas temperaturas, las cuales van en un rango de 17.9 – 27.1° C, correspondiente a los muestreos realizados del 01 de febrero del 2019 y el 02 de agosto del 2019 respectivamente (Gráfica 1). En comparación con los datos obtenidos por Oliva-Martínez y colaboradores en 2008 muestran temperaturas en un rango de 14.1 a 22.8° C. Los datos obtenidos en este trabajo, muestran esta misma tendencia, observándose un aumento en la temperatura del agua del lago Tezozómoc, debido a sus características morfométricas es considerado un lago somero. Este lago tiene un comportamiento térmico que corresponde al de un lago subtropical polimíctico (Verver-Vargas, 2005) en donde la temperatura de estos lagos se encuentra ligada estrechamente a la temperatura ambiental, la diferencia de la temperatura ambiental con respecto a la temperatura del agua se ve reducida en un 50% dentro de tres días, por lo que dada esta estrecha relación cualquier cambio en la temperatura ambiental resultará en un cambio en la temperatura del agua (Mooij *et al.*, 2005). Lo anterior se ha visto reflejado en los datos obtenidos en este estudio, además se ha observado que debido al aumento en la temperatura, resultado del cambio climático, se ha traducido que el ascenso de la temperatura ambiental repercute en la temperatura del cuerpo de agua.

Así mismo, los valores de pH que se registraron en el lago Tezozómoc, se encontraron en un rango de 6.15 - 9.79, los cuales corresponden a los muestreos realizados el 05 diciembre del 2018 y 12 de septiembre del 2018 respectivamente (Gráfica 2). Estos datos en su mayoría fueron alcalinos y solamente se registró un valor ácido (6.15) a lo largo de los muestreos realizados. En un estudio los valores reportados por Oliva-Martínez y colaboradores en 2008 registran valores de pH similares que van en un rango de 6.6 - 10.3 en la época cálida y lluviosa (abril-agosto) y para la época fría y seca (octubre-marzo) en un rango de 8.8 a 9.8. Estos niveles altos de pH encontrados en ambos estudios muestran una alta productividad fotosintética, producto de las altas tasas de fotosíntesis que pueden elevar los valores de pH debido a la remoción de dióxido de carbono (Lampert & Sommer, 2007). Algo a destacar en los muestreos realizados es que los descensos en el pH sucedían después de que se registraran periodos de lluvia con una precipitación acumulada ligera a moderada (Gráfica 2), además de un periodo donde las lluvias no eran tan frecuentes, de esta forma se observó que con respecto a la concentración de contaminantes atmosféricos existía una relación en el cambio del pH del lago: un ejemplo a lo antes mencionado, es el muestreo realizado el 05 de diciembre del 2018 donde los contaminantes atmosféricos en

algunos casos se registraban como los más altos en comparación a otros muestreos. Sin embargo, en los demás aunque no presentaran el nivel más alto la diferencia no era demasiada; la concentración registrada de los principales precursores de la lluvia ácida (SO_2 y NO_x) fue 4.29 $\mu\text{g/L}$ para SO_2 y 27.48 $\mu\text{g/L}$, 31.64 $\mu\text{g/L}$ y 50.22 $\mu\text{g/L}$ para NO , NO_2 y NO_x respectivamente, con los cuales se registró un pH de 6.15. Se registró una precipitación acumulada ligera de 1.12 mm, esto coincide con un trabajo realizado por Parungo y colaboradores en 1987 quienes observaron que el pH de la lluvia colectada en Colorado, Estados Unidos variaba de acuerdo a la intensidad de las precipitaciones donde las duchas conductivas (episodios donde la precipitación ocurre en una área de no más de 10 km y con un periodo de tiempo menor a media hora), presentaba valores más bajos de pH (4.0) en comparación a las lluvias prolongadas (4.91) y lloviznas (5.91); de igual manera mencionan que otro factor importante que influye en el valor de pH del agua de lluvia es la cantidad de cationes y aniones presentes, ya que la cantidad de SO_4 y NO_3 puede ser alta, sin embargo la acidez no necesariamente también sería alta debido a que pueden ser neutralizados por algunos materiales alcalinos como el Na_2CO_3 , o el CaCO_3 .

Un factor que cabe destacar en este trabajo son los niveles altos de monóxido de carbono (CO) registrados el 05 de diciembre del 2018 (Gráfica 8), en donde se presentó el nivel más bajo de pH (6.15) y se registró una concentración de 0.552 ppm (mg/L). De acuerdo a Burnet y colaboradores en 1986 observaron que las emisiones de CO producido por las estufas que utilizan como combustible madera, son ácidas con un rango de pH de 2.8 a 4.2. Así mismo mencionan que la acidez parece ser mayor por material orgánico y una menor contribución proviene de fuentes inorgánicas como pueden ser los óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre, por lo cual el CO podría ser un factor importante en la lluvia ácida, siendo uno de los principales responsables en la disminución del pH del lago Tezozómoc.

Por otra parte, en este trabajo la materia particulada (PM) podría influir en una tendencia entre las concentraciones de PM con respecto a los niveles de pH reportados en el lago Tezozómoc. Sin embargo, algunos autores como Ren y colaboradores en el 2011 mencionan la capacidad de amortiguamiento de PM sobre la acidez en el agua de lluvia, debido a que la PM puede ser ácida o alcalina dependiendo de las características de la fuente de donde se emiten estos contaminantes. De igual forma Singh y colaboradores en el 2016 mencionan el efecto de la PM sobre la neutralización de la acidez de la lluvia, esto por los altos niveles de SO_4^{2-} los cuales no reflejaban un pH bajo necesariamente siendo este un precursor ácido importante del agua, por lo que sugieren no solo usar el pH como único indicador de los eventos de lluvia ácida esto debido al efecto de la neutralización, por lo que

la composición química de la lluvia puede brindar mayor información acerca de este fenómeno.

El efecto de neutralización de los iones alcalinos también lo aborda Báez y colaboradores en el 2007 con la composición química del agua de lluvia colectada al sureste de la Ciudad de México, donde muestra que la acidez es causada por H_2SO_4 y NHO_3 y la neutralización es causada por NH_4^+ y CaCO_3 , por lo que la alta concentración de las partículas alcalinas, presentes en la atmósfera de la Ciudad de México, neutraliza una importante fracción del ion H^+ .

Finalmente, los descensos en los niveles del pH de la lluvia van a ser influenciados por los distintos precursores de la lluvia ácida, así como su composición química, el lago Tezozómoc se encuentra ubicado en una zona industrial, donde distintos contaminantes son liberados hacia la atmósfera, además del alto flujo vehicular que existe en la zona y sus alrededores que representan también una fuente más de contaminantes atmosféricos, sin embargo su composición química y sus interacciones con los contaminantes atmosféricos en ocasiones no reflejan los niveles bajos en el pH de la lluvia, por lo que puede minimizar el problema y dejarlo desapercibido.

En cuanto a los niveles encontrados de oxígeno disuelto (OD) que se registraron en el lago Tezozómoc, estos se encontraron en un rango de 9.67 a 26.62 mg/L, los cuales corresponden al 05 de diciembre del 2018 y 15 de febrero del 2019 respectivamente, por otra parte los datos registrados por Oliva-Martínez y colaboradores en el 2008 muestran niveles de OD de 5.6 a 18.6 mg/L en la época fría y seca (octubre – marzo) y niveles de 0.1 a 17.8 mg/L en la época cálida y lluviosa (abril – agosto); en comparación con los datos obtenidos en este trabajo muestran valores similares a los reportado por Oliva-Martínez en el 2008; en donde estas concentraciones de OD encontradas en ambos estudios son típicas de lagos eutróficos someros, asimismo las fluctuaciones en los niveles de OD en la superficie están determinadas fundamentalmente por la variación en la actividad fotosintética, la cual se mantiene durante la mayor parte del día en condiciones de sobresaturación de OD como se observa en la gráfica 4, siendo esto frecuente en lagos altamente productivos como es el caso del lago Tezozómoc (Verver-Vargas, 2005).

Los niveles de clorofila *a* que se reportaron en el lago Tezozómoc, que indican de una manera indirecta la biomasa algal, ubican al Tezozómoc en un estado en un estado trófico hipertrófico, de acuerdo con los criterios de la OECD en 1982, donde menciona que los lagos hipertróficos son aquellos con concentraciones de clorofila *a* iguales o mayores a 100

$\mu\text{g/L}$. En comparación con la concentración clorofila *a* obtenida en este trabajo, la cual se encontró en un rango de 184.72 a 681.38 $\mu\text{g/L}$, indica niveles ampliamente mayores de este parámetro, a los criterios establecidos por la OECD. Así mismo algo que destacar en cuanto a los niveles de clorofila *a* registrados es que se observa un aumento en las concentraciones de clorofila *a* con respecto a las precipitaciones ligeras y una disminución en periodos cuando se presentan precipitaciones más elevadas (Gráfica 5).

De acuerdo a algunos autores, mencionan que el efecto de la lluvia ácida puede estimular el crecimiento del fitoplancton, tal como lo son los experimentos realizados por Manny y colaboradores en 1987 en donde observaron un aumento en los niveles de clorofila *a* a través de agregar la lluvia acida colectada. En todos los experimentos que realizaron, la lluvia acida estimulaba el crecimiento del fitoplancton registrando un aumento en la producción de clorofila *a*, de esas observaciones se infiere que una de las posibles razones del crecimiento del fitoplancton es el fósforo liberado en parte por la acidificación, el cual podría estimular el crecimiento del fitoplancton transformando el fósforo de la lluvia hacia una forma biológicamente más disponible y de rápido consumo. Por esta razón se considera que el aumento en las concentraciones de clorofila *a* reportadas en el lago Tezozómoc se debe a que los componentes presentes en el agua de lluvia contribuyen de cierta forma en el crecimiento de la biomasa algal del cuerpo de agua.

Sin embargo, este no es el único trabajo acerca del aumento de la clorofila *a* mediante la estimulación de la lluvia ácida, también Willey y colaboradores en 1993 realizaron la comparación entre la lluvia natural contra lluvia sintética (producida en condiciones de laboratorio) sobre la mejora en la producción en los niveles de clorofila *a* usando agua de la superficie del golfo en Carolina del Norte. Ellos observaron que existe una mejora en el crecimiento con un tratamiento de agua con amonio o nitrato. Sin embargo, la lluvia natural tiene una mayor eficiencia en la estimulación de la producción primaria incluso usando concentraciones experimentales mayores o similares a las presentes en el agua de lluvia sintética; esto por la presencia de nitrógeno orgánico disuelto en el agua de lluvia, el cual estaba ausente en el agua de lluvia sintética

Jeong y colaboradores en el 2011 abordaron la variación en los niveles de clorofila *a*, ellos observaron en el río Nakdong en Corea del Sur que las disminuciones se presentaban en periodos de grandes cantidades de lluvia en verano y eran capaces de suprimir el aumento en la concentración de clorofila *a*. En el caso del lago de Tezozómoc la disminución de los niveles de clorofila *a* se presentaron por las constantes y elevadas precipitaciones, observándose el aumento de las concentraciones, principalmente en invierno y

ocasionalmente en verano, caracterizados por una precipitación muy baja. Jeong y colaboradores, en este periodo observaron principalmente organismos como diatomeas y cianobacterias. Comparando con este trabajo se encontró una tendencia similar en cuanto al comportamiento de la biomasa algal presente en el lago Tezozómoc, por lo que se observa que los contaminantes presentes en la atmósfera afectan la cantidad de biomasa algal cuando existe una limitante de nutrientes favoreciendo a determinadas comunidades. No obstante, también se puede presentar la disminución en estos niveles cuando existe una constante entrada de agua.

En el lago Tezozómoc se encontró un total de 22 especies, las cuales 17 pertenecen al grupo de las clorofíceas y 5 al de las cianobacterias. Las especies que mayor presencia tuvieron para el grupo de las cianobacterias fueron *Merismopedia punctata*, *Microcystis botrys*, *Microcystis flos-aquae* y *Anabaena spiroides*. Para el grupo de las clorofíceas reportamos *Chlamydomonas globosa*, *Scenesmus* spp., *Monoraphidium griffithii*, y *Pteromonas angulosa*. A lo largo de este trabajo se pudieron observar oscilaciones en cuanto a sus abundancias tanto en los niveles de precipitación como de los contaminantes atmosféricos. Un ejemplo claro es el muestreo del 05 de diciembre del 2018 en el cual se reportó una disminución en el número de cianobacterias y un gran aumento de clorofíceas, esto debido a la disminución en el pH del lago Tezozómoc llegando a 6.3. Siendo que el pH óptimo para el crecimiento de las cianobacterias va de neutro a levemente alcalino. Especies como *Microcystis* requieren de un pH 10 y 9 para un óptimo crecimiento, por lo que bajo condiciones inadecuadas de este parámetro el crecimiento podría verse disminuido (Nolan, 2015). Con lo antes mencionado los descensos en el pH del lago Tezozómoc tienen una afectación sobre ciertas especies como se puede observar en las gráficas 11 y 12 en donde se aprecian las variaciones entre las especies con mayor presencia en el lago.

No obstante, en la mayoría de los muestreos se presentó una dominancia por parte del grupo de las cianobacterias, debido a que son competidoras superiores contra otros grupos de fitoplancton. Así mismo, condiciones de altas temperaturas, conductividad y pH favorecen su crecimiento, además ciertos géneros como *Microcystis* poseen la capacidad de mantenerse cerca de la superficie donde son capaces de tomar luz y CO₂ o N de la atmósfera (Reichwaldt & Ghadouani, 2012). Estas condiciones estuvieron presentes en su mayoría en el lago Tezozómoc lo cual explica la dominancia de las cianobacterias en este cuerpo de agua.

La disminución de las comunidades de cianobacterias y el aumento de las comunidades de clorofíceas se presentó no solo con la disminución en los niveles de pH. La precipitación acumulada que se registró en algunos muestreos tuvo un volumen considerable, disminuyendo la densidad de cianobacterias (Gráfica 10). El crecimiento de las cianobacterias es una función compleja de interacciones entre factores físicos, químicos y biológicos, que ocurren en el cuerpo de agua, afectados por los eventos de lluvia. Las lluvias intensas pueden llevar a una baja biomasa con una alta diversidad debido a la ausencia en la dominancia de las cianobacterias (Paerl *et al.*, 2019). No obstante, también las lluvias intensas pueden mejorar el crecimiento de las cianobacterias por el incremento en la turbidez, a través de la entrada de sedimentos, la entrada de carbono orgánico disuelto y la re-suspensión de los sedimentos. Sin embargo, una baja disponibilidad de luz en combinación con la turbidez puede también llevar a la disminución de géneros con grandes volúmenes presentes, como lo es *Microcystis* (Reichwaldt & Ghadouani, 2012). En este trabajo se observó que en algunos muestreos tales como el 02 y 08 de agosto del 2019 se reportaron condiciones meteorológicas de baja intensidad solar, además de lluvias considerables, factores que llevaron a una reducción en la abundancia de cianobacterias y un aumento en la diversidad de especies de clorofíceas.

En el muestreo realizado, el 12 de septiembre del 2018, la precipitación acumulada fue de 13.5 mm, registrando la mayor acumulación en todos los muestreos. Aleatoriamente se observó el mayor número de organismos de cianobacterias, y por lo tanto una reducción en la diversidad de especies de clorofíceas. El incremento en la concentración de nutrientes en los cuerpos de agua durante y después de los periodos de lluvia, también pueden favorecer a las cianobacterias, por la cantidad de nutrientes que son agregados al cuerpo de agua. Los eventos de lluvia pueden llevar a una erosión masiva alrededor del lago Tezozómoc resultando en una alta entrada de nutrientes, como menciona Benateau *et al.* (2019) especialmente en cuerpos de agua artificiales. No obstante, esta no es la única entrada de nutrientes especialmente en lagos cerrados. La adición de nutrientes por medio de la precipitación es la principal fuente para las comunidades de fitoplancton. Un estudio de Zhai y colaboradores en el 2009 observa que las altas cargas atmosféricas de nitrógeno y fósforo ayudaron a las floraciones de cianobacterias, a pesar de que las condiciones ya eran óptimas para el crecimiento, promovieron aún más las floraciones de cianobacterias. A pesar de que el lago Tezozómoc se encuentra en estado trófico hipertrófico fue posible observar un mayor crecimiento de las cianobacterias debido a la lluvia.

Los niveles de microcistina-LR reportados oscilaron entre 0.82-14.46 µg/L a través de los muestreos, el nivel más alto de microcistina-LR fue de 14.46 µg/L con una precipitación

acumulada de 1.2 mm, por otra parte el nivel más bajo de microcistina-LR fue de 0.82 µg/L con precipitación acumulada de 1.9 mm. Sin embargo, también se presentaron en algunos otros muestreos concentraciones similares a 0.82 µg/L como se puede observar en la gráfica 13. Se encontraron dos escenarios donde la disminución de toxinas estaba muy marcada uno de ellos por la disminución en los niveles de pH en el lago Tezozómoc y el otro por la alta cantidad y frecuencia de precipitaciones en el cuerpo de agua. En este último el papel que desempeña la lluvia se relaciona a la entrada de altos volúmenes de agua que puede diluir las toxinas (Reichwaldt & Ghadouani, 2012). En cambio, la disminución en los niveles de pH en el lago puede llegar a afectar la producción de las toxinas, debido a la disminución de especies productoras como lo es *Microcystis*. Sin embargo, en este trabajo no se encontró una relación muy clara sobre la producción de toxinas con respecto a las densidades celulares altas de *Microcystis* esto porque no necesariamente hay una relación entre las abundancias de *Microcystis* y las altas concentraciones de microcistina-LR o bien pueden estar presentes integrantes del género que no necesariamente producen este tipo de cianotoxinas (Jacoby *et al.*, 2000).

En cuanto a la relación entre los principales precursores de la lluvia ácida (óxidos de azufre y nitrógeno) con la producción de microcistinas, no se encontró en este trabajo una relación muy clara. Algunos autores como Zavala (2018) y Llanas (2018) tampoco encontraron una relación muy clara sobre los precursores de la lluvia ácida con la producción de microcistina-LR. Ellos sugieren que la producción se encuentra ligada a otros componentes presentes en la atmósfera, así como de las condiciones ambientales, y fisicoquímicas del agua. En el lago Tezozómoc la disminución en los niveles de microcistina-LR se asoció más a las altas lluvias y a los niveles de pH ácidos producto de la interacción de los distintos contaminantes atmosféricos.

La distribución espacial de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos y las precipitaciones acumuladas de los municipios y alcaldías que rodean el lago Tezozómoc variaron de acuerdo a cada estación de monitoreo. Las zonas que presentaron niveles altos de contaminantes atmosféricos fueron Azcapotzalco y Tlalnepantla, siendo Azcapotzalco la zona con mayor concentración de NO, NO₂, NO_x, SO₂, O₃, PM_{10-2.5} y PM_{2.5} en tanto que el municipio de Tlalnepantla presentó concentraciones altas de ciertos contaminantes como NO, NO₂, NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{10-2.5}, PM_{2.5} y CO.

Ambas estaciones se encuentran ubicadas en zonas altamente industrializadas con un alto flujo vehicular, lo que explicaría por qué estas estaciones presentan los más altos niveles de contaminantes atmosféricos. No obstante, algo que resalta es que en la alcaldía de

Azcapotzalco los niveles de PM_{10} fueron los más bajos con respecto a las demás alcaldías y municipios. Si bien las fuentes de emisión de PM_{10} varían de acuerdo a cada fuente de origen y por lo tanto su composición es diferente de ciudad en ciudad, resultan inusuales estos bajos niveles de PM_{10} en la alcaldía de Azcapotzalco aun cuando es una zona con altas actividades antropogénicas que son las que contribuyen en gran parte a los altos niveles de PM (Sepulveda-Hirose *et al.*, 2019, Díaz-Valencia, 2017). Sin embargo, éstas no son las únicas fuentes de emisión también pueden ser las naturales como son las erosiones volcánicas, tolvánicas o incendios forestales; las fijas que producen los complejos industriales que llevan a cabo procesos de combustión, incineración, molienda o cribado y aquellas áreas en las que se realizan actividades de labranza, quema de desechos agrícolas o de residuos sólidos urbanos (Sepulveda-Hirose *et al.*, 2019, Díaz-Valencia, 2017). Las actividades mencionadas también pueden presentarse en otros puntos de monitoreo que pueden llegar a tener una mayor producción de PM_{10} que en la alcaldía de Azcapotzalco. Incluso existen factores que pueden afectar la variación de PM_{10} como lo es el tráfico vehicular generado a partir del movimiento propio de las ciudades o bien lo relacionado a los trabajos de la construcción (Johansson *et al.*, 2007, Rössli *et al.*, 2001).

Sosa-Echeverría y colaboradores en el 2019 analizaron la variación espacial y temporal de la composición química de la lluvia en la Ciudad de México de 2003 a 2014. Los valores de pH obtenidos de las distintas estaciones muestran una mayor acidez hacia el sur de la Ciudad de México ya que los vientos prevalecen de norte a sur. Además, la deposición húmeda de SO_4^{2-} fue mayor, siendo éste es el que contribuye en mayor medida que el NO_3 , a la acidificación de la lluvia.

A pesar de que el lago Tezozómoc se encuentra ubicado en una zona altamente industrializada y con alto flujo vehicular, existen otros factores que se deben tomar a consideración, los cuales favorecen el fenómeno de la lluvia ácida. Los vientos que van de norte a sur llevan los distintos contaminantes presentes en la atmósfera. Por lo que se recomendaría realizar el análisis en cuerpos de agua ubicados hacia el sur de la Ciudad de México.

El análisis de correspondencia canónica (ACC) es un método que analiza la relación entre dos variables, la primera la abundancia de diferentes especies (ausencia/presencia) en diferentes sitios, mientras que la otra describe dichos sitios por sus características ambientales (Kostov, 2008). En la figura 11 se muestra el análisis de correspondencia canónica para determinar la relación entre las especies presentes en el lago Tezozómoc con respecto a los parámetros fisicoquímicos, contaminantes atmosféricos y la precipitación

acumulada. En el triplot de ACC se observa una relación por parte de los contaminantes atmosféricos y los parámetros fisicoquímicos del lago Tezozómoc. Donde los contaminantes atmosféricos influyen en las condiciones fisicoquímicas del lago Tezozómoc, esto a través del proceso de la lluvia ácida. Sin embargo, se deben de presentar ciertas condiciones para que exista una afectación en la dinámica de las comunidades de fitoplancton. Estas condiciones son la composición química de los contaminantes que son emitidos hacia la atmósfera, ya que en algunos casos se puede presentar la neutralización de la acidificación por parte de otros componentes. En el triplot de ACC se puede observar que estos componentes influyen en los parámetros fisicoquímicos del lago Tezozómoc, además el nivel de precipitación y la frecuencia con que se presentan los eventos. Cuando estos cambios en las características fisicoquímicas ocurren, en especial el pH, algunas especies se ven beneficiadas. La reducción en la dominancia de las comunidades de cianobacterias favorece a las comunidades de clorofíceas aumentando la abundancia y riqueza de especies.

CONCLUSIONES

- Los parámetros fisicoquímicos del lago Tezozómoc se ven influenciados por los contaminantes atmosféricos. Sin embargo, la composición de la fuente de origen de estos contaminantes es un factor importante debido a la neutralización de los principales componentes de la lluvia ácida que minimizan este fenómeno. Sin embargo, cuando se presentan concentraciones elevadas, funcionarían como una entrada de nutrientes favoreciendo a las comunidades de fitoplancton.
- Dentro de los componentes a los que se les hizo un seguimiento a través de la dirección de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México el monóxido de carbono (CO) se encontró en elevadas concentraciones el 05 de diciembre del 2018 teniendo como repercusión un descenso importante en el pH del lago Tezozómoc. El CO también podría tener un papel importante en el proceso de la lluvia ácida. Por lo que se recomendaría realizar experimentos para evaluar su participación en este fenómeno.
- La riqueza y abundancia de las comunidades de clorofíceas y cianobacterias se ve afectada por el fenómeno de la lluvia ácida. Los cambios en los niveles de pH del lago Tezozómoc tienen un efecto sobre la diversidad cuando se presenta una disminución de las comunidades de cianobacterias que son grandes competidoras que reducen el crecimiento de otras comunidades.
- El fenómeno de la lluvia por si solo juega un papel importante en cuanto a la reducción de las abundancias de cianobacterias; con la disminución en el número de estos organismos se observa un aumento en la diversidad de clorofíceas.
- Con respecto a los niveles de microcistina-LR no hay una relación muy clara en cuanto a las abundancias del género *Microcystis*. No necesariamente debe existir un número alto de organismos para que exista una concentración elevada de esta toxina. El 05 de diciembre del 2018 se reportó un descenso drástico en los niveles de toxinas por la disminución del pH del lago, como consecuencia de algunas concentraciones elevadas de los contaminantes. No obstante, este no es el único factor en la disminución de microcistina-LR sino también la lluvia, que juega un papel importante en la reducción de estas toxinas debido a que durante el periodo de lluvias se registró una baja en las concentraciones de microcistina-LR.

- Con respecto a la información generada a través de los sistemas de información geográfica (SIG), se puede observar que las zonas más contaminadas son Azcapotzalco y Tlalnepantla por su alta industrialización y el gran flujo vehicular en las zonas, no obstante, las otras alcaldías y municipios alrededor del lago Tezozómoc presentan contribuciones importantes, sin embargo un factor a tomar en cuenta es la dirección del viento, los cuales soplan de norte a sur de la ciudad llevando consigo todos estos contaminantes a esa área de la Ciudad de México, por lo que se sugiere tomar como modelo otros lagos urbanos que se encuentren al sur de la ciudad y observar el impacto por parte del viento.

LITERATURA CITADA

- Almanza, V., Parra, O., Bicudo, C. E. D. M., Sant'Anna, C. L., Baeza, C., & González, (2016), Guía Para El Estudio de Cianobacterias en el sistema lacustre del Gran Concepción: aspectos ecológicos, toxicológicos de control-vigilancia y taxonómicos, Centro de Ciencias Ambientales, EULA-Chile, Universidad de Concepción. Trama Impresores, 99.
- Argumedo, C. J. D., & Castillo, J. R. F. (2017). Caracterización Química de material particulado fracción respirable pm 10 en la atmósfera de Rioacha la Guajira Colombia. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 17(1), 5-16.
- Baez A., Belmont R., Garcia R., Padilla H., & Torres M.D.C, (2007), composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico, *Atmospheric research*, 86(1), 81-75
- Bravo, H., Soto, R., Sosa, R., & Sánchez, P. (2003). Efecto de la lluvia ácida en el material constructivo de los monumentos mayas mexicanos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 4, 195–205.
- Benateau, S., Gaudard, A., Stamm, C., Altermatt, F., (2019). Climate Change and Freshwater Ecosystems: Impacts on Water Quality and Ecological Status. Federal Office for the Environment (FOEN) & Eawag, Bern
- Burnet, P. G., Edmisten, N. G., Tiegs, P. E., Houck, J. E., & Yoder, R. A. (1986). Particulate, carbon monoxide, and acid emission factors for residential wood burning stoves. *Journal of the air pollution control association*, 36(9), 1012-1018.
- Campos V., Lisperguer S., Weckesser J, Vera A, Muñoz D., (2005), cianobacterias y riesgos potenciales de toxicidad en aguas continentales de Chile, *Boletín micológico*, 20, 73-81
- Cantoral Uriza, Enrique Arturo, & Asencio Martínez, Antonia Dolores, & Aboal Sanjurjo, Marina (2017). Cianotoxinas: efectos ambientales y sanitarios. Medidas de prevención. *Hidrobiológica*, 27(2),241-251.
- Contreras-Rivero, G.; Camarillo-de la Rosa, G.; Navarrete-Salgado, N. A.; Elías-Fernández, G. (2005), Corixidae (Hemiptera: Heteroptera) en el lago urbano del parque Tezozómoc, Azcapotzalco, México D.F.*Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11(2), 93-97
- Degermendzhy A.G., Zadereev Y.S., Rogozin D.Y., Prokopkin I.G., Barkhatov Y.V., Tolomeev A.P., Khromechek E.B., Janse J.P., Mooij W.M. and Gulati R.D. (2010) Vertical stratification of physical, chemical and biological components in two saline lakes Shira and Shunet (South Siberia, Russia). *Aquatic Ecology* 44(3): 619-632.

- Díaz Valencia, S. E. (2017). Estudio del comportamiento de las concentraciones de partículas PM10 en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez durante la temporada de estiaje (Doctoral dissertation, Instituto de Ciencias Básicas y aplicadas-Licenciatura en Ciencias de la Tierra-UNICACH).
- Estévez Haro, M. A. (2019). Análisis de tolerancia a diferentes niveles de pH en renacuajos de *Gastrotheca riobambae* (Anura: Hemiphractidae), Tesis de licenciatura (ciencias biológicas y ambientales), universidad central de Ecuador, Ecuador.
- EPA. Acid rain. 2011. Disponible en: www.epa.gov/acidrain/index.html. Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2019.
- Fahnestiel G. L. & Gardner W. S., (1987), acid rain stimulation of Lake Michigan phytoplankton growth, *Journal great lakes res.* 13(2), 218-223.
- Garcés G., L. F., & Hernández Á., M. L. (2004). La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2), 66–72.
- Guevara Mayorga, Á. J., & Calix Martínez, L. L. (2018). Dinámica de los grupos de fitoplancton Clorofitas y Cianofitas, y su relación con los parámetros físico-químicos en las pilas de estabilización San Isidro. Marzo-agosto 2015, Tesis de licenciatura (Biología), universidad de nacional autónoma de Nicaragua (UNAN), Nicaragua
- Granados S., D., López R., G. F., & Hernández García, M. Á. (2010). La Lluvia Ácida Y Los Ecosistemas Forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 16(2), 187–206.
- Haines, T. A. (1981). Acidic precipitation and its consequences for aquatic ecosystems: a review. *Transactions of the American Fisheries Society*, 110(6), 669-707.
- Hernández Becerril David U., (2014) Biodiversidad de algas planctónicas marinas (Cyanobacteria, Prasinophyceae, Euglenophyta, Chrysophyceae, Dictyochophyceae, Eustigmatophyceae, Parmophyceae, Raphidophyceae, Bacillariophyta, Cryptophyta, Haptophyta, Dinoflagellata) en México, *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 44-53.
- IQair air visual, (2018), 2018 world air quality report, disponible en: <https://www.airvisual.com> › world-most-polluted-cities consultado: 19 de noviembre del 2019.
- Inzunza Bustos. Juan, (2019), Capítulo 6: nubes y precipitación en meteorología descriptiva, Universidad de Concepción, Chile, 149-190.
- Jacoby, J. M., Collier, D. C., Welch, E. B., Hardy, F. J., & Crayton, M. (2000). Environmental factors associated with a toxic bloom of *Microcystis aeruginosa*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(1), 231-240.

- Jeong, K. S., Kim, D. K., Shin, H. S., Yoon, J. D., Kim, H. W., & Joo, G. J. (2011). Impact of summer rainfall on the seasonal water quality variation (chlorophyll a) in the regulated Nakdong River. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(6), 983-994.
- Johansson, C., Norman, M., & Gidhagen, L. (2007). Spatial & temporal variations of PM10 and particle number concentrations in urban air. *Environmental Monitoring and assessment*, 127(1-3), 477-487.
- Kostov, B. A. (2008). Aportación del análisis canónico de correspondencias al análisis textual.
- Kwiatkowski, R. E., & Roff, J. C., 1(1976), Effects of acidity on the phytoplankton and primary productivity of selected northern Ontario lakes. *Canadian Journal of Botany*, 54(22), 2546-2561.
- Lampert, W & Sommer, U, (2007), *limnoecology-the ecology of lakes and streams*, 2^a Ed. Londres, oxford university press, 66 pp
- Llanas V. R. S., (2018), evaluación del ácido sulfúrico como componente de la lluvia ácida sobre *Scenedesmus* sp. (clorofícea) y *Microcystis panniformis* (cianobacteria), (tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Lee, R. E. (2008). Cyanobacteria en *Phycology*, Cambridge: Cambridge University Press. 4th ed., pp.33–80.
- Mancini M., Crichigno S., Ortiz M., Haro J. G., (2012), Lagos Urbanos: importancia, dinamismo y multiplicidad de usos, el caso del lago villa Dalcar (Córdoba, Argentina), *Instituto de Limnología "Dr. R. A. Ringuelet"* Biología Acuática 27. 175-189.
- Manny B.A., Fahnenstiel G.L., Gardner W.S. (1987), Acid rain stimulation of Lake Michigan phytoplankton growth, *J. Great Lakes Res.* 13: 218-223.
- Menz, F. C. and Seip, H. M. (2004) Acid rain in Europe and the United States: an update, *Environ. Sci. Policy*, 7(4), 253–265.
- Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J., García, E., Neria, M., & Jiménez, J. (2015). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(5), 59-74.
- Mooij, Wolf M., et al. "The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review." *Aquatic Ecology* 39.4 (2005): 381-400
- Nolan M. 2015. Diversity of algae slows growth of *Microcystis*. MSc thesis. University of Michigan, Ann Arbor, MI
- Oliva-Martínez, M.G., Rodríguez R. A., Lugo V. A., Sanchez R. M. R.,(2008). Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrófico, *hidrobiológica*, 18(1 suplemento): 1-13.

- Oliva-Martínez, M. G., Godínez-Ortega, J. L., & Zuñiga-Ramos, C. A. (2014). Biodiversidad del fitoplancton de aguas continentales en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, 54-61.
- Paerl, H. W. (1991). Ecophysiological and trophic implications of light-stimulated amino acid utilization in marine picoplankton. *Appl. envirl Microbiol.* 57:473-479.
- Paerl Hans W., Karl. E. Havens, Nathan. S Hall, Timothy G. Otten, Mengyuan Zhu, Hai Xu, Guangwei Zhu and Boqiang Qin, 2019, Mitigating a global expansion of toxic cyanobacterial blooms: confounding effects and challenges posed by climate change
- Parungo F., Nagamoto T. C. and Madel R. (1987), A study of the mechanism of acid rain formation. *Atmospheric Environment* 44, 3162 3174.
- Pineda-Mendoza, Rosa María, Olvera-Ramírez, Roxana, & Martínez-Jerónimo, Fernando. (2012). Microcistinas producidas por cianobacterias filamentosas en lagos urbanos. Un estudio de caso en la Ciudad de México. *Hidrobiológica*, 22(3), 290-298.
- Ramírez R. R., Olmos C. I. H., (2008), efectos al ambiente de la lluvia ácida, *revista enlace químico*, 1(10), 15-19.
- Reichwaldt E. S., Ghadouani A., (2012), Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: Between simplistic scenarios and complex dynamics, *water research*, 1372-1393.
- Ren, L., Wang, W., Wang, Q., Yang, X., Tang, D., (2011). Comparison and trend study on acidity and acidic buffering capacity of particulate matter in China. *Atmos. Environ.* 45 (39), 7503–7519.
- Rodríguez M. A, Sánchez S. C., (2005), Lluvia ácida y sus efectos. *Lluvia Ácida*, Universidad Mayor de San Simón, Bolivia, 1–14.
- Rodríguez, M. I., Bustamante, M. A., Ruibal, A. L., Ruiz, M. A., y Busso, F., (2008). Estudio del fitoplancton en el marco de monitoreo del Embalse San Roque, Córdoba. IV Congreso Argentino de Limnología.
- Rööslí, M., Theis, G., Künzli, N., Staehelin, J., Mathys, P., Oglesby, L. & Braun-Fahrländer, C. (2001). Temporal and spatial variation of the chemical composition of PM10 at urban and rural sites in the Basel area, Switzerland. *Atmospheric Environment*, 35(21), 3701-3713.
- Schueler T., Simpson j., (2001), why urban lakes are different *Wat. Prot. Techniques.* 3(4): 747-750.
- Sepúlveda-Hirose, r. t., Carrera-Aguilar, a. n. a. b., Martinez-Rivera, m. g., Angeles-Salto, p. d. j., & Herrera-Ventosa, c. a. . (2019). estimating concentrations of suspended particulate matter over the metropolitan area of Mexico city using satellite and geospatial imagery: preliminary results. *wit transactions on ecology and the environment*, 236, 119-128.

- Singh, A., Agrawal, M., (2008) Acid rain and its ecological consequences. *J. Environ.Biol.* 29, 15–24
- Singh, S., Elumalai, S. P., & Pal, A. K. (2016). Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study. *Science of the total environment*, 563, 293-301.
- Sosa-Echeverría, R., Alarcón-Jiménez, A. L., Torres-Barrera, M. D. C., Jaimes-Palomera, M., Retama-Hernández, A., Sánchez-Álvarez, P., & Bravo-Álvarez, H. (2019). Spatial and temporal variation of acid rain in the Mexico City Metropolitan Zone. *Atmósfera*, 32(1), 55-69.
- Verver-Vargas, G. J. (2005). Dinámica espacio–temporal de los parámetros físicos y químicos y su relación con la clorofila a en un lago urbano eutrófico. Tesis de Licenciatura (Biología), FES Iztacala. UNAM, México. 55 p.
- Willey, J. D., & Paerl, H. W. (1993). Enhancement of chlorophyll a production in Gulf Stream surface seawater by synthetic versus natural rain. *Marine Biology*, 116(2), 329-334.
- Zavala T. N. G., (2018), efecto del óxido de nitrógeno contenido en la lluvia ácida sobre los ecosistemas acuáticos de la Ciudad de México: una evaluación de microalgas y cianobacterias, (tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Zhai, S.J., Yang, L.Y., Hu, W.P., (2009). Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in northern Lake Taihu, China. *Environmental Management* 44 (3), 542e551

ANEXOS

Anexo 1. Procedimiento para la detección de microcistinas mediante el Kit Envirologix™ Quantiplate™ Kit for Microcystins

Material

- Kit Envirologix™ Quantiplate™ Kit for Microcystins.
- Micropipetas 20-200 µL
- Recipiente de desechos
- Parafilm
- Cronometro
- Muestras previamente tratadas

Procedimiento

1.- Agregar rápidamente 50 µl del **diluyente (Microcystin assay diluent)** en cada pozo a utilizar

2.- Inmediatamente agregar 50 µl del **control negativo (negative control)**, 50 µl de cada **calibrador (calibrator)** (C1-C3) y 50 µl de cada muestra

****IMPORTANTE: NO AGREGAR LA ENZIMA CONJUGADA DE MICROCISTINA EN ESTE PASO

3.- Colocar parafilm, para poder mezclar el contenido de los pozos de manera circular por 20-30 segundos y dejar incubar por 30 minutos a Temperatura ambiente.

4.- Agregar 50 µl de la **enzima conjugada de microcistina (microcystin-enzyme conjugate)** en cada pozo

5.- Cubrir de nuevo con parafilm y mezclar, dejar el parafilm e incubar por 30 minutos

6.- Después de la incubación retirar cuidadosamente el parafilm y agitar vigorosa el contenido de los pozos

7.- Inundar los pozos completamente con **solución limpiadora (Wash solution)** y agitar para vaciar, repetir el lavado 4 veces, golpear la placa en una toalla de papel para remover mas **solución limpiadora (Wash solution)**

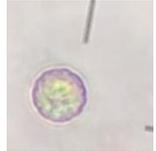
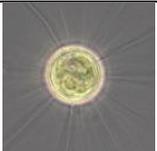
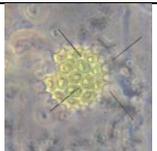
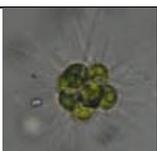
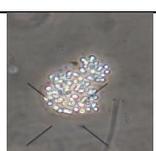
8.- Agregar 100 µL de **sustrato** en cada celda

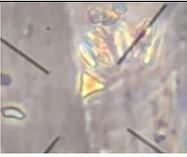
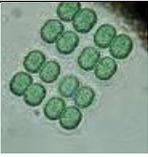
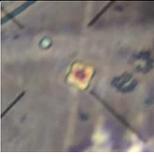
9.- Cubrir con parafilm y realizar una mezcla agitando circularmente e incubar por 30 minutos

10.- Agregar 100 µL de la **solución stop** y agitar un poco

11.- Leer en el espectrofotómetro antes de 30 minutos

Anexo 2. Listado de especies registradas en el lago Tezozómoc

División: Chlorophyta		Orden: Volvocales	
Clase: Chlorophyceae		<i>Chlorogonium mínimum</i>	
Orden: Chlorococcales		<i>Chlamydomonas globosa</i>	
<i>Golenkinia radiata</i>		<i>Pteromonas angulosa</i>	
<i>Pediastrum boryanum</i>		<i>Eudorina elegans</i>	
<i>Schroederia setigera</i>		<i>Pandorina morum</i>	
<i>Micractinium pusillum</i>		División: Cyanobacteria	
<i>Oocystis</i> spp.		Clase: Cyanophyceae	
<i>Kirchneriella lunaris</i>		Orden: Chroococcales	
<i>Scenedesmus</i> spp.		<i>Microcystis botrys</i>	
<i>Monoraphidium caribeum</i>		<i>Microcystis flos-aquae</i>	

<i>Monoraphidium griffithii</i>		<i>Spirulina major</i>	
<i>Selenastrum minutum</i>		<i>Anabaena spiroides</i>	
<i>Tetraedron triangulare</i>		<i>Merismopedia punctata</i>	
<i>Coelastrum pseudomicroporum</i>			

Anexo 3. Conteos celulares (org/mL) de las especies presentes en el lago Tezozómoc

Especie	12/09/2018	19/09/2018	03/10/2018	19/10/2018	25/10/2018	05/12/2018	01/02/2019	15/02/2019	22/02/2019	01/03/2019	08/03/2019
<i>Schroederia setigera</i>	0	0	0	0	70	2580	260	600	400	530	200
<i>Golenkinia radiata</i>	0	0	0	0	270	3130	400	200	330	130	130
<i>Pediastrum boyanum</i>	0	1020	330	1580	0	160	0	270	400	270	200
<i>Micractinium pusillum</i>	0	0	0	0	0	0	0	270	330	270	200
<i>Oocystis</i> spp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
<i>Kirchneriella lunaris</i>	0	0	0	0	0	550	130	130	70	330	530
<i>Monoraphidium caribeum</i>	0	0	0	0	0	360	600	470	270	130	200
<i>Monoraphidium griffithii</i>	0	690	800	270	0	1100	130	130	530	530	600
<i>Selenastrum minutum</i>	100	0	130	0	730	1100	60	530	870	730	870
<i>Tetraedron triangulare</i>	0	180	200	180	130	0	0	200	130	400	200
<i>Coelastrum pseudomicroporum</i>	500	0	0	0	0	0	130	130	70	70	0
<i>Scenedesmus</i> spp.	1000	660	730	890	930	5910	3530	2130	1730	1600	1730
<i>Chlamydomonas globosa</i>	0	1620	2470	2670	460	730	860	1130	1200	530	550
<i>Chlorogonium minimum</i>	0	0	530	470	0	0	600	1070	670	870	530
<i>Pteromonas angulosa</i>	0	0	4000	3560	4270	4800	530	1000	270	70	400
<i>Eudorina elegans</i>	0	0	0	0	2600	0	0	130	70	130	150
<i>Pandorina morum</i>	0	0	1750	0	0	0	0	270	70	470	270
<i>Merismopedia punctata</i>	100	280	400	360	1200	360	0	930	200	670	1200
<i>Microcystis botrys</i>	15700	6240	4930	5860	2870	2760	6060	4400	4600	8320	4070
<i>Microcystis flos-aquae</i>	3400	1500	600	4600	0	0	800	2200	1330	1400	670
<i>Spitulina major</i>	0	0	1500	0	0	0	0	930	130	270	200
<i>Anabaena spiroides</i>	2400	2230	1600	0	0	1660	470	1470	200	270	130

Anexo 3. Censos celulares (org/mL) de las especies presentes en el lago Tezozómoc (continuación)

Especie	22/03/2019	29/03/2019	05/04/2019	29/04/2019	03/06/2019	14/06/2019	02/08/2019	08/08/2019	16/08/2019	25/08/2019	06/09/2019
<i>Schroederia setigera</i>	330	140	100	200	200	330	130	590	66	0	0
<i>Golenkinia radiata</i>	200	470	130	0	0	30	0	0	133	0	0
<i>Pediastrum boyanum</i>	130	130	100	200	0	30	0	70	0	0	0
<i>Micractinium pusillum</i>	400	730	200	70	70	0	0	260	66	0	0
<i>Oocystis</i> spp.	0	130	0	0	0	30	200	260	133	333	0
<i>Kirchneriella lunaris</i>	470	70	100	70	0	130	200	110	466	0	166
<i>Monoraphidium caribaeu</i>	530	1130	930	70	400	870	1130	1440	866	666	333
<i>Monoraphidium griffithii</i>	730	140	130	200	430	1070	870	1260	266	0	500
<i>Selenastrum minutum</i>	730	600	430	470	330	170	670	1000	400	0	0
<i>Tetraedron triangulare</i>	200	270	200	70	100	400	730	330	400	166	0
<i>Coelastrum pseudomici</i>	270	200	400	130	3130	100	270	560	400	0	166
<i>Scenedesmus</i> spp.	1400	2200	2560	1400	2200	2830	5200	6000	2533	2000	3000
<i>Chlamydomonas globosa</i>	670	530	130	330	170	270	130	220	200	666	333
<i>Chlorogonium minimum</i>	470	600	230	130	130	170	270	220	533	0	0
<i>Pteromonas argulosa</i>	930	330	400	270	770	870	1000	1560	2533	500	600
<i>Eudorina elegans</i>	200	270	0	0	0	70	70	370	533	0	3333
<i>Pandorina morum</i>	0	0	0	70	30	570	130	190	0	0	0
<i>Merismopedia punctata</i>	1330	1000	700	200	370	200	670	560	466	700	333
<i>Microcystis botrys</i>	3130	8130	5870	6530	10600	4630	2000	2440	3200	3500	2333
<i>Microcystis flos-aquae</i>	530	1400	700	870	4170	1370	270	440	1200	2666	1166
<i>Spirulina major</i>	70	0	30	400	1730	2870	1070	1330	300	500	833
<i>Arabaena spiroides</i>	200	470	430	400	1030	1530	3270	850	800	0	166