



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA.



EVALUACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA a EN LOS LAGOS CRÁTER LA PRECIOSA Y ATEXCAC, EN LA CUENCA ORIENTAL, PUEBLA.

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

BIÓLOGO

PRESENTA:

JULIÁN RAMIRO CÁRCAMO CABRERA.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ AVILÉS.

LABORATORIO DE LIMNOECOLOGÍA.

CIUDAD DE MÉXICO.

DICIEMBRE, 2017.



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.

DEDICATORIAS

Va para tí madre, Eva Cabrera, la mujer más perseverante del mundo, tu apoyo incondicional jamás me dejó solo en esta culminación del presente trabajo, tus sacrificios y traspasos se verán reflejados en cada uno de mis pasos y obras en esta vida. Haz sido un gran ejemplo de lucha y perseverancia es por ello, que ahora me toca a mí llevar la batuta. Con ello espero darte una sonrisa de satisfacción y que te sientas orgullosa de mí al final del día.

Y también para tí Karla Ubaldo que me enseñaste a amar, a valorar lo que soy y a aspirar a crecer como persona, a sacar lo mejor de mí en los momentos adversos de la vida. Gracias por estar siempre apoyándome.

“En todo momento de mi vida hay una mujer que me lleva de la mano en las tinieblas de una realidad que las mujeres conocen mejor que los hombres y en las cuales se orientan mejor con menos luces”.

Gabriel García Márquez.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la máxima casa de estudios la Universidad Nacional Autónoma de México por darme una larga estadía en sus recintos de conocimiento en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

A mi Director de tesis y amigo el Dr. J. Salvador Hernández Avilés que forjó mi responsabilidad académica, trabajando con disciplina y constancia, siempre innovando. Es una persona con una actitud positiva que contagia seguir triunfando, con una conciencia social enorme, un ejemplo de vida para muchos de nosotros. Gracias por enseñarme que la ciencia no solo basta con entenderla, sino que hay que compartirla día a día.

Agradezco a mis sinodales: Biól. Angélica Elaine González Schaff, M. en C. Eloisa Adriana Guerra Hernández, M. en C. Verónica Mitsui Saito Quezada y al Biól. José Luis Guzmán Santiago por brindarme su tiempo, observaciones, sugerencias y críticas constructivas para la presente tesis, así como, las enseñanzas en sus clases durante mi paso por la universidad.

A la M. en C. Laura Soriano Peralta, una persona clave para el desarrollo en el trabajo de laboratorio, la logística, disponibilidad y uso de fluorómetro AU-10, así como, de sus instalaciones del Proyecto de Investigación en Limnología Tropical. FES Iztacala. UNAM.

Investigación realizada por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN219313 con el proyecto: Dinámica del plancton procariota en los lagos monomícticos cálidos volcánicos en la Cuenca Oriental Puebla.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mi familia:

A mi madre que estuvo presente en mis horas de desvelo durante este largo proceso, siempre preparándome un café o abrigándome en los días fríos. A mis hermanos Alberto que con su sacrificio me dio la oportunidad de estudiar y tener una carrera y a Víctor que me ayudo en algunas tareas de computadora y actualización del software. A mi abuelo Guillermo, que sé que se siente orgulloso de tener un biólogo trabajador como nieto. A mis tías: Leticia por inculcarme siempre la unión familiar el legado que dejó mi abuela al irse, Socorro, por ser una luchadora aguerrida desde muy pequeña y demostrarme que no hay imposibles en esta vida, a Chabela que apoya a la familia en todo lo que puede y Nora que apoya a la familia siempre que lo necesita y a mis primos: Daniel, Dayana y Fabiola que tendrán que superar a sus primos en cuanto a lo académico.

A la familia Ubaldo Domínguez:

Mi segunda familia que me ha cobijado como uno de ellos, a pesar de mis malos ratos y mi mal carácter. Mis agradecimientos por abrirme las puertas de su casa y apoyarme como jamás lo habrían hecho. A Karla por amarme como lo haces creo que jamás sentiré este amor tan pleno y lleno de abrigo. A La Sra. Velia mi suegrita que tantos años ha dado de comer a esta boca hambrienta, probablemente estaría más flaco y menos feliz de lo que estoy sin ella. De igual manera a Giovanni y Alberto tienen la misma sentencia de ser mejor que su hermana y yo. Por ello es que éste trabajo es también gracias a su apoyo.

A mis amigos: Gabriel, por su constante apoyo en este trayecto, por sacarme de aprietos en las prácticas de campo, por las buenas pláticas y los viajes juntos. Ángel por ser un compañero de vida y compartir los mejores años como uña y mugre (tú eres la mugre).

A mis amigos de la FESZ: Everardo, Fidel, Fer e Isabel, Paola, Pacheco, Fernando S, Andrés, Sergio, China, y Angy. A todos ustedes por hacerme pasar los mejores momentos durante la carrera, son y serán inolvidables.

A mis amigos de F.C. Kannabis: Jesus, Aquino, Ovando, Compi, Luisito, Diego, Gen, Jon, Dr, Frijol, Aarón, y Gaby, por sacarme de mis días de aburrimiento, compartir un balón y buenas horas de entretenimiento en el grupo.

A mis amigos del CIVS: Luis y Jon que los tendré presentes por siempre cada que vea a una especie silvestre y tenga que hacer lo que un biólogo haría.

A mis amigos de Laboratorio: Tanto de las viejas como las nuevas generaciones, Tadeo, Alberto, Juan y Eunice, Jesus y Lore, Ceci, chino, Chucho, Ivan, Omar, Giovas, Itza, Ulises, Vicky, y chileno, sin cada uno de ustedes, sin su procesamiento y repartición de trabajo, esto sería imposible para una sola persona.

ÍNDICE

Resumen.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Marco teórico.....	2
1.2. Antecedentes.....	7
2. HIPÓTESIS.....	10
2.1. Preguntas de investigación.....	10
2.2. Justificación.....	11
3. OBJETIVOS.....	11
3.1. General.....	11
3.2. Particulares.....	11
4. MÉTODO.....	12
4.1. Área de estudio.....	12
4.1.2. La Preciosa.....	13
4.1.3. Atexcac.....	14
4.2. Trabajo de campo.....	14
4.2.1. Parámetros físicos y químicos.....	15
4.3. Trabajo de laboratorio.....	16
4.3.1. Determinación de clorofila “a”.....	16
4.3.2. Filtración, extracción y montaje.....	16
4.3.3. Trituración de las muestras.....	16
4.3.4. Lecturas de las muestras.....	16
4.4. Nutrimentos.....	17
4.5. Trabajo de gabinete.....	17
4.5.1. Datos análisis y cálculos.....	17
4.5.2. Determinación de la clorofila “a” por fluorimetría.....	19
4.6. Análisis estadísticos.....	20
5. RESULTADOS.....	21

5.1 Parámetros físicos y químicos.....	21
5.1.1. Temperatura.....	21
5.1.2. Oxígeno disuelto (OD).....	25
5.1.3. Alcalinidad, Durezas y pH.....	29
5.1.4. Total de sólidos disueltos y conductividad.....	31
5.2. Nutrientos.....	32
5.2.1. Nitratos (NO_3^-).....	33
5.2.2. Nitritos (NO_2^-).....	35
5.2.3. Amonio (NH_4^+).....	36
5.2.4. Fósforo soluble reactivo (PO_4^{3-}).....	38
5.2.5. Fósforo Total (FT).....	40
5.2.6. Silicatos (SiO_4).....	42
5.2.7. Sulfatos (SO_4).....	44
5.3. Parámetros Biológicos.....	46
5.3.1 Productividad Primaria.....	46
5.3.2 Clorofila a.....	49
5.3.3 Valores de clorofila a y productividad primaria bruta.....	51
5.4. Análisis estadísticos.....	53
5.4.1. Análisis estadístico paramétrico.....	52
5.5. Análisis estadístico biológico.....	66
5.5.1. Productividad primaria.....	66
5.5.2. Clorofila a.....	68
5.5.3. Análisis de correlaciones pruebas paramétricas y no paramétricas.....	70
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	72
6.1. Parámetros físicos y químicos.....	72
6.1.2. Temperatura.....	72

6.1.3. Oxígeno Disuelto.....	73
6.1.4. Zona eufótica (Ze).....	74
6.1.5. Alcalinidad, Durezas y pH.....	76
6.1.6 Total de sólidos disueltos y conductividad.....	77
6.2. Nutrientos.....	78
6.2.1. Nitrógeno inorgánico disuelto ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$).....	78
6.2.2. Fósforo reactivo soluble (FRS).....	79
6.2.3. Sulfatos SO_4^{2-}	80
6.2.4. Silice reactivo soluble (SiRS).....	80
6.3. Parámetros biológicos.....	81
6.3.1 Productividad primaria.....	81
6.3.2 Clorofila a.....	83
7. CONCLUSIONES.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Flujos de convergencia de los componentes bióticos y abióticos en un ecosistema.....	2
Fig. 2. Estructura molecular de la clorofila <i>a</i>	4
Fig. 3. Todos los componentes del circuito microbiano son mostrados en color azul. En donde el picoplancton juega un rol especial en el reciclaje de nutrientes, flujo de materia y energía.....	7
Fig. 4. Localización vía satelital del Lago La Preciosa y Atexcac (escala 3 km).....	12
Fig. 5a. Batimetría del lago “La Preciosa” y localización vía satelital con forma que asemeja a un triángulo.....	13
Fig. 5b. Batimetría del lago “Atexcac” y localización vía satelital con forma que asemeja a una elipse.....	14
Fig. 6. Diagrama espacio-temporal de la temperatura (°C) en el lago La Preciosa.....	22
Fig. 7. Diagrama espacio-temporal de la temperatura en (°C) en el lago Atexcac.....	24
Fig. 8. Diagrama espacio-temporal del oxígeno disuelto en mg L^{-1} en el lago La Preciosa.....	26
Fig. 9. Diagrama espacio-temporal del oxígeno disuelto en mg L^{-1} en el lago Atexcac.....	28
Figs. 10 y 11. A B. Lago Atexcac alcalinidad de carbonatos, bicarbonatos, dureza total y de calcio.....	30

Fig. 12. Concentraciones promedio de NO_3^- en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.....	33
Fig. 13. Concentraciones promedio de NO_3^- en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.....	34
Fig. 14. Concentraciones promedio de NO_2^- en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.....	35
Fig. 15. Concentraciones promedio de NO_2^- en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.....	36
Fig. 16. Concentraciones promedio de NH_4^+ en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.....	37
Fig. 17. Concentraciones promedio de NH_4^+ en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.....	38
Fig. 18. Concentraciones promedio de PO_4^{3-} en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.....	39
Fig. 19. Concentraciones promedio de PO_4^{3-} en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.....	40
Fig. 20. Concentraciones promedio de FT en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.....	41
Fig. 21. Concentraciones promedio de FT en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.....	42
Fig. 22. Concentraciones promedio de SiO_4 en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.....	43
Fig. 23. Concentraciones promedio de SiO_4 en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.....	44
Fig. 24. Concentraciones promedio de SO_4^- en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.....	45
Fig. 25. Concentraciones promedio de SO_4^- en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.....	46
Fig. 26. Concentraciones promedio de productividad primaria bruta (PB), respiración (R), productividad neta (PN) y ubicación de la zona eufótica en el lago La Preciosa durante el ciclo anual.....	47
Fig. 27. Concentraciones promedio de productividad primaria bruta (PB), respiración (R), productividad neta (PN) y ubicación de la zona eufótica en el lago Atexcac durante el ciclo anual.....	48
Fig. 28. Distribución profundidad-tiempo 3D de la concentración de clorofila a del lago La Preciosa.....	49
Fig. 29. Distribución profundidad-tiempo 3D de la concentración de clorofila a del lago Atexcac.....	50
Fig. 30. Valores de clorofila a y productividad primaria bruta en el lago La Preciosa.....	51
Fig. 31. Valores integrados de clorofila a y productividad primaria bruta en el lago Atexcac.....	52

Fig. 32. Diagrama de caja con muesca de la concentración de pH a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	53
Fig. 33. Diagrama de caja con muesca de la concentración de C.E. a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	54
Fig. 34. Diagrama de caja con muesca de la concentración de CO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	54
Fig. 35. Diagrama de caja con muesca de la concentración HCO_3^- de a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	55
Fig. 36. Diagrama de caja con muesca de la concentración CaCO_3^- de a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	55
Fig. 37. Diagrama de caja con muesca de la concentración de PO_4^{3-} a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	56
Fig. 38. Diagrama de caja con muesca de la concentración de FT a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	56
Fig. 39. Diagrama de caja con muesca de la concentración de NO_2^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	57
Fig. 40. Diagrama de caja con muesca de la concentración de NO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	57
Fig. 41. Diagrama de caja con muesca de la concentración de NH_4^+ a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	58
Fig. 42. Diagrama de caja con bigotes de la concentración de SiO_4 a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	58
Fig. 43. Diagrama de caja con muesca de la concentración de SO_4 a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.....	59
Fig. 44. Diagrama de caja con muesca de la concentración pH a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	59
Fig. 45. Diagrama de caja con muesca de la concentración C.E. a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	60
Fig. 46. Diagrama de caja con muesca de la concentración CaCO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	60
Fig. 47. Diagrama de caja con muesca de la concentración HCO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	61
Fig. 48. Diagrama de caja con muesca de la concentración CaCO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	61
Fig. 49. Diagrama de caja con muesca de la concentración PO_4^{3-} a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	62
Fig. 50. Diagrama de caja con bigotes de la concentración FT a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	62
Fig. 51. Diagrama de caja con muesca de la concentración NO_2^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	63

Fig. 52. Diagrama de caja con muesca de la concentración NO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	63
Fig. 53. Diagrama de caja con muesca de la concentración NH_4^+ a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	64
Fig. 54. Diagrama de caja con muesca de la concentración SiO_4 a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	64
Fig. 55. Diagrama de caja con muesca de la concentración SO_4 a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.....	65
Fig. 56. Diagrama de caja con muesca (Función pseudosigma $p= 0.05$) de PB del lago La Preciosa.....	66
Fig. 57. Diagrama de caja con muesca (Función pseudosigma $p= 0.05$) de PB del lago Atexcac.....	67
Fig. 58. Diagrama de caja con muesca (función pseudosigma $p=0.05$) de la concentración de clorofila a en el lago La Preciosa.....	68
Fig. 59. Diagrama de caja con muesca (función pseudosigma $p=0.05$) de la concentración de clorofila a en el lago Atexcac.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) por estratos en la columna del lago La Preciosa.....	22
Tabla 2. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) por estratos en la columna del lago Atexcac.....	24
Tabla 3.- Oxígeno disuelto (mg L^{-1}) por estratos en la columna del lago La Preciosa.....	26
Tabla 4.- Oxígeno disuelto (mg L^{-1}) por estratos en la columna del lago Atexcac.....	27
Tablas 5. A y B. Lago La Preciosa conductividad eléctrica y del total de sólidos disueltos por etapa hidrodinámica durante un ciclo anual.....	31
Tablas 6. A y B. Lago Atexcac conductividad eléctrica y del total de sólidos disueltos hidrodinámica durante un ciclo anual.....	31
Tabla 7. Correlación de Spearman entre variables biológicas y parámetros físicos y químicos del Lago La Preciosa.....	70
Tabla 8. Correlación de Pearson entre variables biológicas y parámetros físicos y químicos del Lago La Preciosa.....	70
Tabla 9. Correlación de Spearman entre variables biológicas y parámetros físicos y químicos en el Lago Atexcac.....	71
Tabla 10. Correlación de Pearson entre variables biológicas y parámetros físicos y químicos en el Lago Atexcac.....	71
Tabla 11. Estados tróficos con respecto a las concentraciones promedio, desviaciones estándar y rangos de clorofila a , productividad primaria bruta de algunos lagos tropicales y templados.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución de los pigmentos fotosintéticos entre algas y cianobacterias. Clorofilas a , b y c en (Wetzel, 2001).....	3
--	---

Resumen

Se evaluó la biomasa clorofílica, como un indicio del potencial productivo y la productividad primaria como una medida directa del estado trófico en dos lagos sódicos, uno sub-salino La Preciosa y otro hipo-salino Atexcac, Puebla, con la finalidad de analizar su relación y variabilidad espacio temporal durante un ciclo anual. Se realizaron muestreos mensuales de agua a diferentes profundidades de la columna de agua, con respecto a la zona eufótica y los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto. Se analizaron parámetros físicos y químicos como el pH, la alcalinidad, la conductividad y los nutrientes inorgánicos. La productividad primaria se determinó usando el método de las botellas claras y oscuras con el empleo de un oxímetro con sensor luminiscente (LBO). La determinación de clorofila "a" se realizó por fluorometría. Los lagos al ser monomícticos cálidos, en la época de mezcla presentaron una mayor disponibilidad de nutrientes debido a su reincorporación a la columna de agua desde los sedimentos; lo que favoreció una productividad primaria alta en esta etapa. Una vez que lagos se estratificaron se pudo apreciar la formación de máximos profundos de clorofila "a" en el perfil vertical del lago a bajos niveles de luz. En el lago La Preciosa los valores de la productividad primaria fueron de 0.15 hasta 1.75 mg m⁻³ d⁻¹ y la concentración de clorofila "a" fluctuó entre los 0.56 a 3.53 µg L⁻¹. Mientras que en el lago Atexcac presentó concentraciones que fluctuaron entre los 0.12 mg m⁻³ d⁻¹ hasta los 3.32 mg m⁻³ d⁻¹ y la concentración de clorofila a fluctuó entre los 0.28 a 9.9 µg L⁻¹ que corresponden con condiciones de oligotróficas a mesotróficas. Las concentraciones más altas de clorofila en Atexcac se registraron durante la estratificación temprana en el que se presentó un florecimiento de la cianobacteria filamentosa (*Nodularia cf. spumigena Martens ex Bornet & Flahault (1886-1888)*) lo que también representó una alta productividad primaria de 7.68 mg m⁻³ d⁻¹. Asimismo, en la estratificación bien establecida para ambos lagos se dio un proceso de emblanquecimiento producido por la captura de bicarbonatos del picoplancton autotrófico a través de la fijación de carbono inorgánico para realizar fotosíntesis, lo que influyó en la dinámica productiva de ambos sistemas.

Palabras clave

Productividad primaria, clorofila "a", lagos maar, evento de emblanquecimiento y máximo profundo de clorofila.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Marco teórico

El agua en esencia es vida en el planeta tierra y domina totalmente la composición química de todos los organismos. La ubicuidad de agua en la biota, como el punto de apoyo del metabolismo bioquímico se basa en sus propiedades físicas y químicas únicas (Wetzel, 2001).

Estas propiedades físicas y químicas, como también biológicas del agua que abastece a un sistema acuático regulan la dinámica de éste. La dinámica natural de las redes tróficas y ciclos biogeoquímicos en los ecosistemas acuáticos está ligada a los procesos metabólicos que implican la formación y la utilización de la materia orgánica (O'Neil, 1986 y De Angelis 1992 en Staehr *et al.*, 2010).

Una gran parte de la limnoecología trata de comprender la incorporación de recursos inorgánicos en cada una de las sucesivas etapas en la red trófica de interacciones entre los productores y consumidores.

Las comunidades ecológicas se encuentran conectadas a través de flujos de materia y energía, el flujo de materia es cíclico y el de energía es unidireccional. A través de estos flujos convergen los componentes abióticos y bióticos del ecosistema (Fig.1) ejemplo de ellos es la fotosíntesis (Lampert & Sommer, 2007).

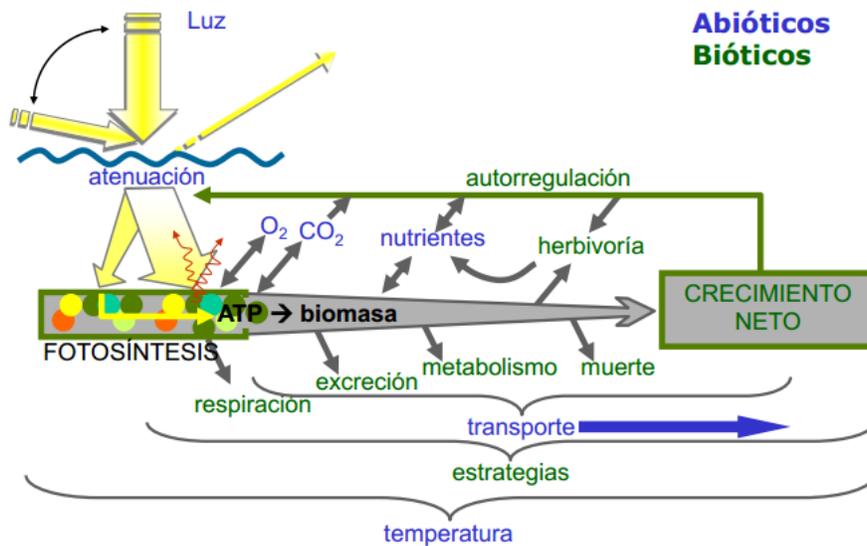


Figura 1. Flujos de convergencia de los componentes bióticos y abióticos en un ecosistema.
<https://es.slideshare.net>

La fotosíntesis es un proceso metabólico que realizan algunas células de organismos fotoautótrofos a través del cual incorporan materia inorgánica del medio ambiente y se obtiene carbono celular generalmente por la oxidación del CO₂ utilizando el agua como reductor inorgánico, la energía necesaria para poder llevar a cabo estas transformaciones proviene de la energía lumínica, este proceso se puede resumir en la siguiente reacción química:



Para poder aprovechar la energía lumínica e integrarla a la ruta metabólica de la fotosíntesis es necesaria una molécula con la capacidad de absorber la energía de la luz y emitirla como energía química estable, dicha molécula es la clorofila. Todas las células fotosintéticas poseen un número de pigmentos asociados a sus membranas tilacoidales. Estos no son los mismos en todos los organismos y se pueden separar en tres grandes grupos: clorofilas, carotenoides y ficobiliproteínas (Wetzel, 2001).

Las clorofilas son las moléculas de pigmentos clave que impulsan la fotosíntesis oxigénica y este es el proceso del cual depende la enorme diversidad de la vida en la Tierra. Las clorofilas son encontradas exclusivamente en organismos fotosintéticos oxigénicos (plantas, algas y cianobacterias), (Scheliep *et al.*, 2012).

Hasta el momento, se conocen cinco tipos de clorofilas que son nombradas a continuación en orden de su descubrimiento clorofilas: *a*, *b*, *c*, *d* y *f*, está última fue reportada en el año 2010. (Chen *et al.*, 2010) (Cuadro1).

Cuadro 1. Distribución de los pigmentos fotosintéticos entre algas y cianobacterias. Clorofilas *a*, *b* y *c*. en (Wetzel, 2001).

DIVISIÓN	Cyanophyta	Prochlorophyta	Glaucophyta	Rodophyta	Heterokontophyta/ Chrysophyceae	Heterokontophyta/ Xanthophyceae	Heterokontophyta/ Eumastigmatophyc	Bacilliarophyceae	Raphidophyceae	Haptophyta	Cryptophyta	Dinophyta I	Dinophyta II	Euglenophyta	Chlorarachniophyta	Chlorophyta
Clo-a	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Clo-b		X												X	X	X
Clo-c					X	X		X	X	X			X			

La clorofila *a* (Fig. 2) es una molécula que contiene un grupo porfirínico y un fitol. El núcleo porfirínico polar (soluble en agua) está formado por un anillo tetrapirrólico y un átomo de magnesio (Badillo *et al.*, 2010). Es la más abundante de todas las clorofilas; esta se encuentra en toda la actividad fotosintética conocida de los eucariotas y todas las cianobacterias.

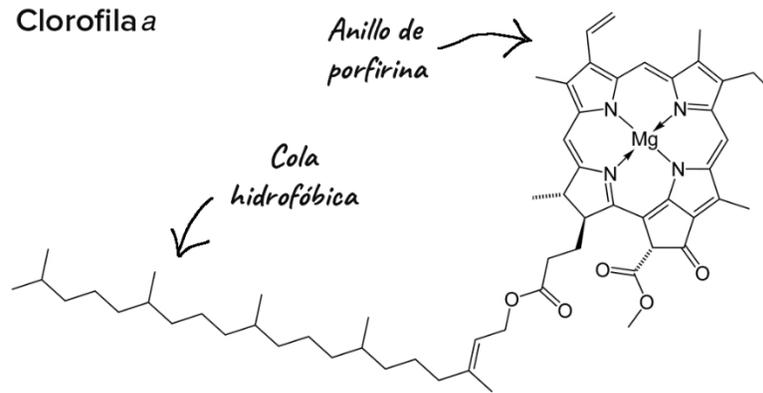


Figura 2. Estructura molecular de la clorofila *a*. Tomado <https://es.khanacademy.org>

La clorofila *a* tiene un rol especial en el uso de energía en virtud de la posición del centro de reacción dentro del aparato de transducción de luz de organismo fotosintéticos oxigénicos, esta habilidad le permite reducir la energía; así la clorofila *a* ha sido la clorofila clave en la línea de tiempo de la evolución (Scheliep *et al.*, 2012).

Cullen (1982) señala que la concentración de clorofila *a* es utilizada a menudo para estimar la biomasa del fitoplancton, y muchos investigadores se refieren a la clorofila como un indicador de la abundancia del fitoplancton. Su distribución y producción, tanto en aguas oceánicas, lacustres y costeras se vincula directamente a la hidrodinámica del sistema con características tales como la estratificación y la mezcla de la columna de agua, el espesor de la capa eufótica y la disponibilidad de los nutrientes.

La biomasa se puede definir como; la cantidad de materia orgánica que ocupa un determinado volumen o superficie, la producción es el incremento en la cantidad de biomasa en un intervalo de tiempo y la productividad primaria se refiere a la velocidad en la cual el carbono inorgánico se transforma en una forma orgánica mediante la actividad metabólica de los organismos portadores de clorofila (APHA, AWWA y WPCF 1992).

Evaluar la biomasa de los productores primarios es de especial importancia, ya que éstos representan la base de la cadena trófica y son los responsables directos de la productividad total del lago y son esenciales en cualquier tipo de análisis de poblaciones acuáticas de dinámica de poblaciones.

Cierta variación de la biomasa fitoplanctónica está determinada principalmente en función de la luz, ésta se va atenuando conforme desciende en la columna de agua, de acuerdo con la razón P/R (producción-P / respiración R) y se pueden distinguir tres zonas: la primera donde $P > R$ ($P/R > 1$), se conoce como zona eufótica, la zona de compensación

es donde $P=R$ ($P/R=1$) y la zona afótica donde $P<R$ ($P/R<1$). La fotosíntesis tiene su mejor desarrollo en la zona eufótica, en donde la penetración de luz es más intensa. Sin embargo, un exceso de luz puede resultar poco conveniente (Ryther, 1956), ya que al aumentar la intensidad luminosa se llega a un punto en el cual existe una inhibición de la fotosíntesis; esta intensidad es fácilmente rebasada en un día soleado, por lo que se infiere que la mayor fotosíntesis se realiza al amanecer y al atardecer.

Al incidir la luz en la superficie al agua esta no penetra completamente, una porción significativa es reflejada y esparcida (Wetzel, 1983). Dentro del agua, la luz se ve atenuada rápidamente con el incremento de la profundidad por mecanismos de absorción y de dispersión.

La absorción es definida como la disminución de la energía de la luz con el incremento de la profundidad para la transformación hacia calor (Wetzel, 1983). La absorción está influenciada por la estructura molecular del agua misma, por partículas suspendidas y particularmente por componentes orgánicos disueltos. El resultado es una absorción selectiva y atenuación de la energía lumínica con el incremento de la profundidad influenciada por un orden de ciertas condiciones físicas, químicas y biológicas. Estas propiedades son dinámicas en los cambios estacionales y sobre el tiempo geológico para ecosistemas individuales de agua dulce (Wetzel & Likens, 2000).

En relación con el gradiente vertical la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés); que ocurre en un intervalo de aproximadamente 390 a 720 nm y es una de las variables más importantes ya que según algunos autores (Strickland, 1958; Talling, 1957; Westlake, 1965; Kirk, 1983 en Bellinger & Sigge, 2010) en ese espectro del 46 a 48% se encuentra la luz óptima del total de energía que incide en la superficie de la tierra.

Existe una confusión en cuanto los términos de producción y productividad primaria por ello es importante definirlos:

La producción es sinónimo de biomasa. La *biomasa* es el peso de toda la materia orgánica en un área determinada y un tiempo dado. Las evaluaciones de biomasa son esenciales en cualquier tipo de análisis de dinámica de poblaciones.

La producción se refiere al incremento de biomasa (cantidad de la materia orgánica) en un área determinada observada al cabo de un período de tiempo, más las pérdidas por respiración, excreción, secreción, heridas, muerte o consumo por parte de animales.

La productividad es la tasa de cambio de carbono inorgánico hacia carbono orgánico en un período de tiempo determinado. La productividad primaria es normalmente el promedio de las tasas de cambio de la productividad neta menos la respiración.

La productividad neta (aparente) es la tasa de acumulación o producción de nueva materia orgánica, o energía utilizada, menos las pérdidas y dividido por el intervalo de tiempo Wetzel, (1981).

La productividad bruta (real) se refiere al cambio de biomasa observado, la tasa de producción de nueva materia orgánica, o de utilización de energía, incluyendo la usada y perdida durante el intervalo de tiempo.

Por lo tanto, lo que la productividad primaria permite evaluar es la capacidad de captación de energía de los organismos autotróficos y, en los sistemas acuáticos, permite conocer la tasa de incorporación de carbono inorgánico durante la fotosíntesis del fitoplancton (Montoya & Aguirre, 2010).

Esta productividad primaria nos está dada por los organismos planctónicos que pueden ser subdivididos basados en criterios fisiológicos, taxonómicos (Malone, 1980; Stockner & Antia 1986) o dimensionales (Dussart, 1965; Sieburth *et al.*, 1978). Corresponden a tres órdenes de magnitud en el tamaño de los microorganismos que forman parte del plancton: el picoplancton, de 0.2-2 μm ; el nanoplancton, de 2-20 μm , y el microplancton, de 20-200 μm . Dicha clasificación se ajusta bien con los tamaños del fitoplancton que se observan en los cuerpos de agua continentales, los cuales no rebasan las 200 μm , a diferencia de las especies marinas, que pueden llegar a medir hasta algunos mm (Hoek *et al.*, 1998).

La primera fracción más pequeña del plancton es denominada picoplancton (Sieburth *et al.*, 1978).

Debido a su tamaño pequeño, el picoplancton autotrófico (PPA) tiene el área de superficie mayor al volumen relacionado con cualquier grupo de organismo vivos y esto, junto con la presencia de grupos químicos cargados en su superficie de la célula, es responsable de su potente adsorción mineral y la capacidad de nucleación heterogénea (Douglas & Beveridge, 1998).

Hay tres mecanismos que pueden ser los responsables de la mineralización de carbonato de calcio por el picoplancton:

- La precipitación inducida biológicamente debido a un cambio en el ambiente químico cerca de la pared celular quizás por la fotosíntesis.
- La bio-mineralización controlada biológicamente donde la superficie de la célula actúa como un sitio de nucleación, y;
- El proceso gobernado biológicamente donde el ion activo sufre procesos de cambio de las células hacia la formación de CaCO_3 (Kosamu & Obst., 2009).

La presencia del PPA puede tener efectos directos en el uso de los nutrientes que permiten modelar los flujos energéticos y los ciclos biogeoquímicos en el medio donde el picoplacton y bacterioplancton tiene la capacidad de utilizar el carbono inorgánico disuelto del medio e incorporarlo en carbono orgánico particulado, formando de esta manera una reserva disponible para los niveles tróficos superiores (Fig. 3). (Carlson *et al.*, 1992; Revilla *et al.*, 2000).

1.2. Antecedentes

Se ha demostrado que existe una relación entre las picocianobacterias y la precipitación de calcio; tanto en los sistemas de agua dulce y marinos (Thompson *et al.*, 1997). Las altas concentraciones de calcio se han explicado por la actividad de picoplancton autotrófico en cuerpos de aguas duras oligotróficas (Dittrich & Obst, 2004). Después de estudiar varios lagos y partes de algunos océanos Weisse, (1993) observó que PPA domina el total de la producción de fitoplancton y la biomasa en Kosamu *et al.*, (2009).

En ambientes limitantes, el picoplancton contribuye en mayor proporción a la biomasa y productividad del sistema (Steitz & Velimirov, 1999; Søndergaard, 1990).

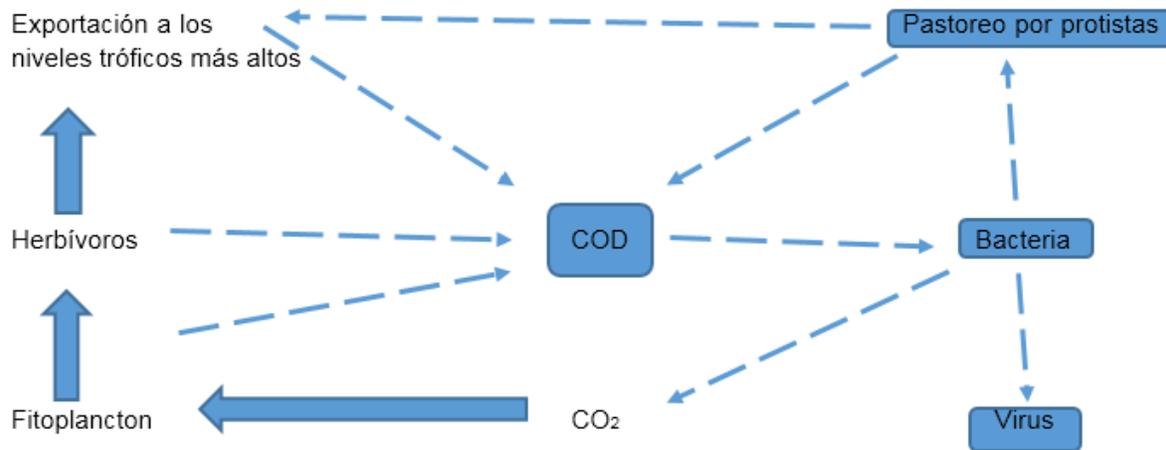


Figura 3. Todos los componentes del circuito microbiano son mostrados en color azul. En donde el picoplancton juega un rol especial en el reciclaje de nutrientes, flujo de materia y energía. (Kirchman *et al.*, 2009).

La importancia del picoplancton autotrófico a la biomasa total de fitoplancton y productividad primaria es mucho mayor que el de los niveles tróficos inferiores. El picoplancton autotrófico usualmente alcanza sus cifras más altas a finales de verano tanto en entornos marinos y de agua dulce (Stockner, 1991 en Padisák *et al.*, 1997).

Las cianobacterias constituyen un grupo de bacterias filogenéticamente diverso que puede exportar fotosíntesis oxigénica fuera del sistema. Son los principales productores primarios modernos, como se ha estudiado en dos cianobacterias marinas de los géneros *Prochlorococcus* y *Synechococcus*, que son responsables del 25% de la fotosíntesis mundial (Couradeau *et al.*, 2012).

De acuerdo con Margalef (1997b) existen cambios de la población de especies y las variaciones temporales de distribución, que son llamadas “sucesiones” que a menudo ocurre en escalas de tiempo estacionales, aunque también pueden contemplar cambios secuenciales o a más largo plazo (ontogenia de lagos); por ejemplo, las variaciones a largo plazo, que pueden estar determinadas por el clima que provocan cambios en la comunidad fitoplanctónica. Estas oscilaciones anuales son capaces de producir cambios estacionales

en la composición y productividad de las comunidades, los cuales, hasta cierto punto, pueden repetirse en años sucesivos (Reynolds, 1984).

La estructura de las poblaciones fotosintéticas en ecosistemas acuáticos tiene cambios dinámicos y constantes, tanto en composición de especies como en la distribución de la biomasa (Wetzel & Likens, 1979). Para entender la estructura de la comunidad se tiene que aprender a diferenciar entre los cambios de la población y las variaciones espacio-temporales de distribución.

Una característica importante que cabe resaltar dentro de diversos perfiles de agua tomados de diferentes regiones es la presencia de un máximo sub-superficial de clorofila (Cullen, 1982), o máximo profundo de clorofila (DCM por sus siglas en inglés). Éstos se encuentran en una gran variedad de ambientes y están integrados por diferentes especies en todos los casos, lo que indica que se originan por diversas causas, su interpretación debe ser muy cuidadosa si se pretende establecer su importancia en la red alimenticia (Padisák *et al.*, 2003).

El DCM se ha observado con mayor frecuencia en sistemas oligotróficos que térmicamente se estratifican. Con el comienzo de la estratificación, los niveles metalimnéticos de clorofila aumentan, y un DCM llega a manifestarse dentro de unos pocos días. Con el tiempo, la ubicación del pico de concentración de clorofila se profundiza, y la cantidad de clorofila que se encuentra dentro de ese pico aumenta. La profundización del pico en el DCM continúa a través del intervalo de estratificación, que potencialmente alcanza el límite meta-hipolimnético, y la naturaleza del pico de la señal se vuelve menos pronunciada. Con el avance del periodo de estratificación, la estabilidad se pierde, y la mezcla redistribuye la clorofila a través de la columna de agua (Reynolds, 1994).

Un conocimiento básico de los mecanismos generadores de estos máximos verticales es importante para la evaluación del funcionamiento de la red alimentaria pelágica y enfocada hacia la aplicación de técnicas de detección a pequeña o gran escala para inferir valores integrados verticalmente de la biomasa y de la productividad primaria (Fennel & Boss, 2003). Alcocer (2003), reporta para el lago Alchichica la formación de máximos profundos de clorofila asociados con los procesos de estratificación térmica, caracterizando a este cuerpo de agua como oligotróficos. De la misma forma (Rojas, 2017) reporta para el lago Atexcac la formación de máximos profundos de clorofila y típica al sistema como oligo-mesotrófico.

En los lagos tropicales y subtropicales se presenta un incremento de nutrientes, producto de la mezcla, que favorecen el crecimiento fitoplanctónico (Talling, 1993). En el caso de los lagos volcánicos de la Cuenca Oriental se ha reportado durante el período de mezcla florecimientos de diatomeas, como en el caso de Alchichica (Oliva *et al.*, 2001). Así como en el Lago Atexcac (López, com. personal) y en el lago La Preciosa (Morán, 2016).

Con el inicio de la estratificación en los lagos hipo-salinos Alchichica y Atexcac es común la formación de florecimientos de *Nodularia cf. spumigena* (Oliva *et al.*, 2009; Arrellano y González, 2011), que se atribuye principalmente a la limitación de nitrógeno disuelto después del florecimiento algal invernal). Mientras en el lago sub-salino La Preciosa se registra una composición dominada por diferentes especies de clorofitas (Morán 2016).

Por la disposición de las poblaciones en el perfil vertical mediatizada por la estructuración físicas y químicas del agua en dicho perfil, las aguas superficiales suelen ser, en los sistemas estratificados correspondiente a esta tipología, relativamente pobres en nutrientes, especialmente en fósforo, por lo que el crecimiento fitoplanctónico está controlado por la disponibilidad de dichos nutrientes mediada por recirculación de la columna de agua, y las concentraciones de clorofila superficial se encuentran de forma natural en el intervalo categórico de la oligo-mesotrofia (normalmente por debajo de 10 mg m^{-3}), siendo, tan sólo, en un pequeño intervalo de profundidades en torno a la interfase óxico-anóxica, donde pueden encontrarse concentraciones elevadas de clorofila y/o bacterioclorofila de incluso varios cientos de mg m^{-3} y este máximo profundo de clorofila estival puede considerarse, por tanto, como propio de este tipo de ecosistemas en condiciones de buena conservación funcional (Camacho *et al.*, 2009).

En general, cuando se presenta la estratificación térmica en lagos profundos, las picocianobacterias promovidas por la acumulación de nutrientes (nutriclina) en la termoclina, favorecerán máximas biomasas clorofílicas y productividad primaria alta epilimnética de acuerdo con el patrón típico estacional de los lagos tropicales (González *et al.*, 2015). En el lago la Preciosa durante la estratificación se registran abundancias máximas de picoplancton autotrófico en la termoclina (Marcos y Reyes, 2012; Morán 2016). Al igual que en el lago Atexcac por el florecimiento invernal (Arredondo y González 2011; Vizuet, 2015).

Un fenómeno comúnmente registrado en los lagos La Preciosa y Atexcac es el evento de emblanquecimiento, el cual puede ocurrir durante la estratificación térmica durante la estratificación temprana (Lagunas y Martínez, 2015; Benítez y Contreras, 2016) o en la bien establecida en el lago La Preciosa (Daw, 2016) o al inicio de la tardía en el Lago Atexcac (Vizuet, 2015).

2. HIPÓTESIS

De acuerdo con el promedio anual de concentración de clorofila “a” y de la productividad primaria fitoplanctónica los lagos La Preciosa y Atexcac se caracterizarán como oligotróficos.

Como resultado de la mezcla se espera una concentración homogénea de la clorofila “a” a través de la columna de agua y una productividad primaria alta hacia la zona eufótica como resultado de una mayor disponibilidad de nutrimentos. Mientras en las etapas de estratificación se registrarán máximos profundos de clorofila asociados con la termoclina, y la productividad primaria tenderá a decrecer conforme avance el año por limitación de nutrimentos en el epilimnion.

Los máximos profundos de clorofila estarán asociados con picocianobacterias en la zona de la termoclina donde se acumulan nutrimentos y existen bajas intensidades de luz, donde este grupo es capaz de realizar fotosíntesis por debajo del 1% del PAR.

2.1. Preguntas de investigación.

- 1.- ¿De acuerdo con la evaluación de clorofila “a” y la productividad primaria cuál será el estado trófico de los lagos volcánicos La Preciosa y Atexcac?
- 2.- ¿Cómo influyen las fases hidrodinámicas en la variación espacio-temporal de la productividad primaria y la concentración de clorofila “a” en los lagos?
- 3.- ¿De qué manera influyen los diferentes florecimientos algales y el evento de emblanquecimiento en los lagos con respecto a la productividad primaria y la concentración de clorofila a?
- 4.- ¿Qué determinarán la formación de los máximos profundos de clorofila en los lagos de estudio?

2.2. Justificación

Algunos estudios ecológicos tienen como objetivo evaluar, además del número de organismos de una población, la biomasa y productividad de un sistema acuático. Esto permite establecer, hipotéticamente, su potencial trófico, esto es, si un sistema tiene una mayor productividad primaria, deberá ser capaz de mantener un mayor número de niveles tróficos (Begon *et al.*, 1999). Diversos estudios han tratado de determinar la contribución del picoplancton a la productividad total del fitoplancton y la biomasa de los lagos a través de un gradiente trófico (Callieri & Stockner, 2000).

Sin embargo, para el estudio de estos lagos de origen volcánico en México;

a) A la fecha no se han evaluado de manera constante el estado trófico con relación a la concentración de clorofila *a* y/o productividad primaria.

b) Falta estimar la variación espacio-temporal de la concentración de clorofila *a* y productividad primaria asociada con la hidrodinámica a lo largo de periodos largos de estudio.

c) En ambientes de agua dulce se han observado máximos profundos de clorofila (Cullen, 1982; Djikstra, 2012; Padisák *et al.*, 1997, 2003; Reynolds, 1994) que se espera se presenten en estos ecosistemas acuáticos, siendo importante establecer los factores que los determinan y su importancia en la contribución del picoplancton autotrófico.

d) Las variables de los parámetros físicos y químicos no son en su mayoría constantes, lo que se infiere influye en los procesos hidrodinámicos, por lo tanto; resulta pertinente relacionar los parámetros con la concentración de clorofila *a* y productividad primaria en estos ambientes.

Siendo estos sistemas laboratorios naturales que permiten entender con mayor precisión los procesos biogeoquímicos asociados con los grupos fitoplanctónicos.

3. OBJETIVOS

3.1. General.

Analizar la variación espacio-temporal de la concentración de clorofila *a* y de la productividad primaria en los lagos La Preciosa y Atexcac durante un periodo anual y establecer su relación con la dinámica limnológica.

3.2. Particulares.

Evaluar la dinámica de los máximos profundos de clorofila *a* en los lagos de estudio.

Determinar el estado trófico de los lagos La Preciosa y Atexcac en función de las concentraciones de clorofila *a* y la productividad primaria.

4. MÉTODO

4.1. Área de estudio

El municipio de Guadalupe Victoria se localiza en la parte centro este, del estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son: los paralelos 19°14'54" y 19°25'42" de latitud norte. Y los meridianos 97°15'54" y 97°31'06" de longitud oeste.



Figura 4. Localización vía satelital del Lago La Preciosa y Atexcac (escala 3 km). De Google Earth (2017) NASA.

Al centro se extiende una vasta llanura con 2,380 m s.n.m. Esta zona centro-norte se le conoce como Axalapasco, (del náhuatl "vasijas de arena con agua"). Al suroeste se levantan algunos complejos montañosos, como las Derrumbadas y el cerro Pinto con áreas planas, en las que existen pequeñas zonas de matorrales desérticos rosetófilo, especies como, *Agave lechuguilla*, *Nolina parviflora*, *Dasyllirion* "sotol", (Rzedowski, 2006), *Hechtia perotensis* "guapilla", (López-Ferrari *et al.*, 2007), intercalado con izotal, yucca "palma" de matorral xerófilo. Los lagos La Preciosa y Atexcac, presentan grandes diversidades edafológicas pertenecientes a cinco grupos: andosol, fluvisol, feozem, litosol y regosol INAFED 2010©.

4.1.2. La Preciosa.

Lago de origen *maar*, cuya formación se remonta al pleistoceno superior de hace aproximadamente 0.0117 m.a. y surgió por una explosión volcánica freática triple (Armienta *et al.*, 2008). Se encuentra entre las coordenadas 19° 22' norte y 97° 23' oeste a una altitud promedio de 2,365 m s.n.m., su forma es aproximadamente triangular y la longitud máxima es de 1,344 m con orientación noreste-suroeste y alcanza una profundidad máxima de 45.5 m y con un área de 78.2 hectáreas (Arredondo *et al.*, 1983). De acuerdo con su clasificación climatológica es *Cw* (propuesta por Köppen y modificada por García E. 1990). Con una temperatura media anual entre 12° y 18°C. Su concentración de cloruros es mayor que la de carbonatos y sulfatos (Arredondo *et al.*, 1983). Presenta una fauna con endemismos por especies como *Poblana letholepis* (Díaz, 2002) una de las cuatro especies de charales que componen al género, alcanzando las mayores tallas, así como, algunas especies de cladóceros rotíferos y copépodos. Se ha reportado la introducción de la especie de *Oncorhynchus mykiss* la trucha arcoíris de uso recreativo para actividades deportivas de pesca (Alcocer *et al.*, 2004).

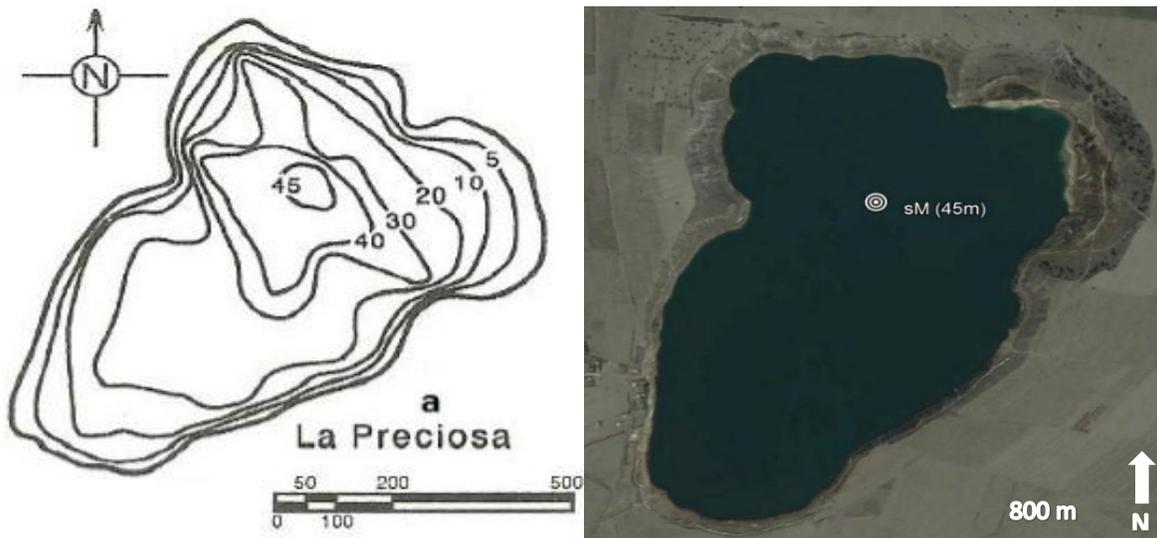


Figura 5a. Batimetría del lago “La Preciosa” (De la Lanza y García, 2002) y localización vía satelital con forma que asemeja a un triángulo. Google Earth (2017) NASA.

4.1.3. Atexcac.

Lago de origen *maar*, cuyo origen se remonta al pleistoceno superior de hace aproximadamente 0.0117 m.a. y surgió por una explosión volcánica freática simple. (Armienta *et al.*, 2008). Se encuentra entre las coordenadas 19° 20' norte y 97° 27' oeste., cuenta con una altitud promedio de 2510 m s.n.m., su forma es aproximadamente elíptica, con un longitud máxima es de 780 m con orientación suroeste-noreste y tiene una profundidad de 39.1 m y un área 29 hectáreas (Carrasco-Nuñez *et al.*, 2006); así como, unos 160 m de profundidad en total, con cerca de 60 metros de los depósitos de la erupción en su mayoría no consolidadas por encima de la superficie del suelo pre-eruptiva (Arredondo *et al.*, 1983). Presenta un pH alcalino con una predominancia de cloruro y carbonatos sobre bicarbonatos y sulfatos, así como, sodio y magnesio sobre potasio y calcio, (Macek *et al.*, 2009). Se considera un lago hipo-salino debido a su concentración de salinidad 6.086 mg L⁻¹ (Armienta *et al.*, 2008).

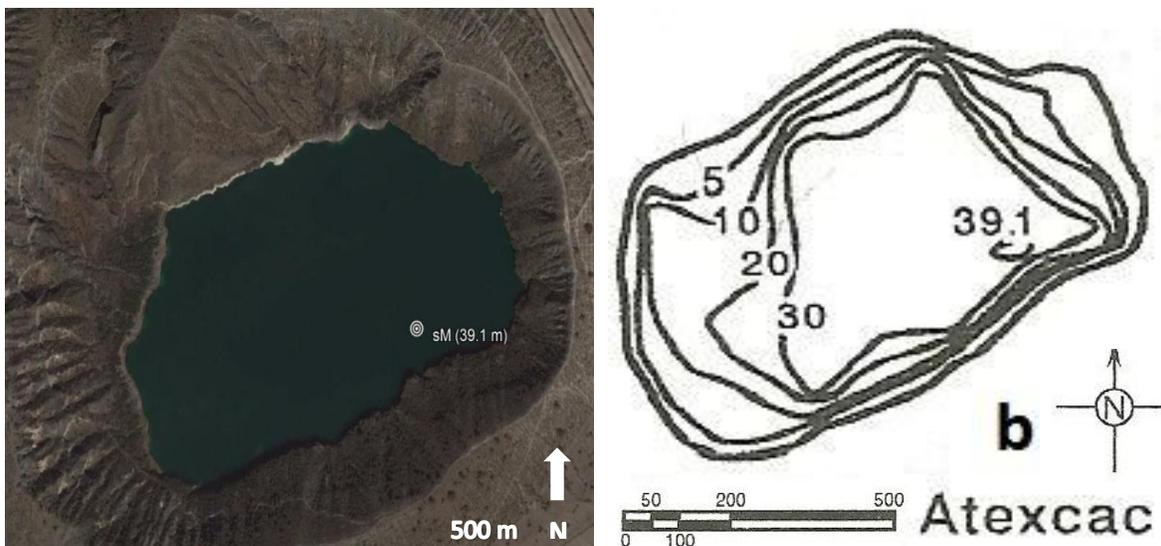


Figura 5b. Batimetría del lago “Atexcac” (De la Lanza y García., 2002) y localización vía satelital con forma que asemeja a una elipse. (Google earth, 2017) NASA.

4.2. Trabajo de campo.

El trabajo “*in situ*” consistió en realizar muestreos mensuales e incubaciones en los lagos de estudio que se describen a continuación:

El muestreo fue realizado en un solo lugar, que corresponde con la zona más profunda del lago; en donde se estimó la visibilidad al disco de *Secchi* (VDS) y la profundidad eufótica (*Ze*) calculado como la VDS multiplicado por un factor de 3.5 de acuerdo con Margalef (1983). Se determinó la temperatura y el oxígeno disuelto con un oxímetro marca *Hach* con una precisión de 0.2 µg L⁻¹. Con estos datos se elaboraron los perfiles verticales de temperatura mensuales para ubicar las diferentes capas de la columna de agua durante la estratificación en el epilimnion, metalimnion (termoclina) e hipolimnion (que en algunos casos presenta anoxia) y los gradientes en la concentración de oxígeno disuelto durante la estratificación térmica.

Durante la mezcla se consideraron cinco profundidades de muestreo: una en la zona superficial, otra en la zona eufótica, dos a profundidades intermedias y una cercana al fondo. Mientras en la estratificación se tomaron seis profundidades: epilimnion, dos en la zona eufótica, dos en la termoclina, una en el hipolimnion y una más cerca del fondo para evitar el sedimento y su re-suspensión.

En campo se tomaron muestras de agua en las profundidades establecidas con una botella Van Dorn de 2.5 L de capacidad las muestras de agua se vertieron y almacenaron en botellas opacas de 1 L de capacidad, etiquetadas con los datos correspondientes de cada lago y transportadas en hieleras evitando la exposición a la luz en todo momento del procedimiento.

4.2.1. Parámetros físicos y químicos

Para la evaluación de los parámetros físicos y químicos de las muestras de agua se llevó a cabo según los métodos de APHA, AWWA & WPCF (1992).

Se efectuaron determinaciones *in situ* como: pH, oxígeno disuelto, conductividad, total de sólidos disueltos, alcalinidad, dureza total y de calcio por el método complejimétrico.

La productividad primaria también se determinó *in situ* mediante la cuantificación de la cantidad de oxígeno disuelto producido por el fitoplancton en un tiempo determinado, por medio del método de botellas claras y oscuras (Gaarder & Gran, 1927; Webber & Thurman, 1991). Esto permitió estimar la tasa de carbono fotosintético fijado y la tasa respiratoria por medio de mediciones de la capacidad de producción y consumo de oxígeno en un volumen conocido de agua en botellas DBO.

De tal manera con base en los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto se seleccionaron de cinco a seis profundidades para cada lago, de acuerdo con la presencia de la termoclina y/o oxiclina. Las muestras de agua se extrajeron con una botella Van Dorn de 2.5 L y se vertieron en botellas DBO de volúmenes conocidos (300 ml), ya que de esta forma cada sub-muestra contiene cantidades proporcionalmente iguales de zooplancton y fitoplancton del hábitat. Posteriormente se utilizaron de cinco a seis pares de botellas DBO claras y oscuras, para cada una de las profundidades. Las botellas DBO se colocaron suspendidas en la columna de agua, con una cuerda y un soporte o los que fueron necesarios para que quedaran en incubación en la columna y se asemejaran a las condiciones naturales. Una vez transcurrido el tiempo de incubación determinado (alrededor de cuatro horas), las botellas se sacaron a la superficie y se analizaron para determinar la cantidad de oxígeno disuelto en cada botella, con una sonda de oxígeno (Oxímetro con luz led y veleta de agitación marca *Hach* con precisión de $0.2 \mu\text{g L}^{-1}$).

La productividad primaria puede evaluarse mediante los cambios en la concentración de oxígeno. Se sabe que por cada molécula de oxígeno liberada en la fotosíntesis se asimila un átomo de carbono Wetzel & Likens (1979).

4.3. Trabajo de laboratorio.

El trabajo “*ex situ*” consistió en procesar clorofila “a” y nutrientes que se describen a continuación:

4.3.1. Determinación de clorofila “a”.

Las lecturas de fluorómetro se convirtieron en valores dados en $\mu\text{g L}^{-1}$ de clorofila “a” siguiendo el método 445.0 de la Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory (Arar & Collins, 1997). Método específicamente desarrollado para la marca y modelo del fluorómetro (Turner Desings 10 AU. “Determinación *in vitro* de clorofila a y feofitina a en algas marinas y de agua dulce por fluorescencia” (ANEXO 1).

4.3.2. Filtración, extracción y montaje.

Se tomaron volúmenes determinados de cada una de las profundidades de las muestras de agua y se concentraron por filtración al vacío a través de un filtro de fibra de vidrio (Wathman Gf/A 24mm). Los pigmentos se extrajeron agregando a cada tubo 5 ml de acetona al 90%, una vez que fueron filtrados los volúmenes de las muestras se retiraron del aparato de filtración y se mantuvieron contenidos en un recipiente opaco y en congelación para su posterior trituración.

4.3.3. Trituración de las muestras.

Después de la filtración parcial por los filtros, las membranas fueron llevadas a tubos de vidrio, se les agregó 5 ml de acetona al 90% y se maceraron con un triturador de varilla de acero y punta del teflón con la finalidad de garantizar la extracción mediante el rompimiento de las células fitoplanctónicas.

4.3.4. Lecturas de las muestras.

Transcurrido un tiempo de 22-24 hrs se centrifugaron las muestras a 2000 rpm durante 20 minutos. Para dar paso a la lectura de la fluorescencia del sobrenadante donde se encuentran diluidas las clorofilas en acetona, se usó un fluorómetro de la marca *Turner Designs* 10 AU por la técnica de Welschmeyer, (1994) modificado por Arar y Collins (1997).

Después de que el fluorómetro se ha calentado durante al menos 15 min, Se calibró con una solución de medición de fluorescencia microlitro *Microsense* a $2.14 \mu\text{g L}^{-1}$. Después se utilizó la lectura en el fluorómetro de solución de acetona al 90% para obtener un blanco y el instrumento en la configuración de sensibilidad de $5.14 \mu\text{g L}^{-1}$ que se utilizó para el análisis de muestras.

Se vertió la solución de cada una de las muestras en matraces que permitió saber la concentración con en mililitros de cada solución por profundidad. Después estas soluciones se tomaron alícuotas para saber las concentraciones y se registraron la medición de cada fluorescencia repitiendo este procedimiento con cada una de las muestras y sus respectivas profundidades. Esperar 90 segundos antes de medir la fluorescencia de nuevo.

4.4. Nutrientes.

La composición química de un cuerpo de agua depende de entre muchos factores de la composición edáfica y geológica de esta manera el contenido de iones inorgánicos varía de acuerdo con su naturaleza y el equilibrio químico depende en gran medida de los iones dominantes.

Las muestras de agua fueron recolectadas y refrigeradas para determinar la composición química y dinámica de los lagos al realizar una correlación e interpretación de los datos obtenidos. Utilizando un espectrofotómetro marca UNICO modelo UV2150 con precisión de absorbancia de ± 0.001 y de transmitancia $\pm 0.1\%$

Nutrientes:

- Amonio (NH_4^+), por el método del azul de indofenol.
- Fósforo reactivo soluble (FRS) (PO_4^{3-}), por el método del fosfomolibdato.
- Fósforo total (FT), por el método del fosfomolibdato con digestión
- Nitratos (NO_3^-), por el método del ácido fenoldisulfónico y columna de reducción de cadmio.
- Nitritos (NO_2^-), por el método del ácido sulfanílico.
- Silicatos (SiO_4), por el método molibdosilicato.
- Sulfatos (SO_4^-), por el método turbidimétrico.

Apoiados por el Manual Análisis de calidad de aguas naturales y residuales con aplicación a la microescala (Gómez *et al*, 2014).

4.5. Trabajo de gabinete.

4.5.1. Datos análisis y cálculos.

Cuantificación de la productividad primaria.

Como se mencionó con anterioridad la productividad primaria consta de tres elementos:

- Productividad bruta (PB).
- Productividad neta (PN).
- Respiración (R).

De donde $\text{PB} = \text{PN} + \text{R}$, PN es la productividad que se exporta a los siguientes niveles tróficos y R es la energía que utilizan los propios productores primarios para sus procesos metabólicos.

El principio del método se basa en que la cantidad de oxígeno disuelto producto de la fotosíntesis, guarda una proporción directa con la cantidad de fotosintatos producidos, por ejemplo; carbohidratos. En consecuencia, en las botellas claras, que estarán expuestas a la luz estimarán la cantidad de oxígeno producido o carbono fijado, y en las botellas oscuras

que no estarán expuestas a la luz se estimará la cantidad de oxígeno utilizado para los procesos metabólicos y a la par la cantidad de carbono biogénico desintegrado.

La tasa de respiración (R) en términos de consumo es calculada como:

$$R = (B_i - B_o) / \Delta_t$$

Donde:

B_i = Concentración inicial de O_2 en la botella clara (en $\mu g L^{-1}$)

B_o = Concentración final de O_2 en la botella oscura (en $\mu g L^{-1}$)

Δ_t = Periodo de tiempo en el cual se lleva a cabo la respiración (tiempo de incubación).

Si Δ_t es medido en días, entonces R se expresará en $mg O_2/L/día$; si se expresa en horas, entonces R se representa como $mg O_2/L/hora$. La respiración y productividad también se pueden expresar en metros cúbicos de agua, en lugar de litros. Sabiendo que un metro cúbico tiene 1000 litros, deberá multiplicarse por 1000 el resultado y se obtendrán valores en metros cúbicos (m^3).

La productividad fotosintética o bruta de oxígeno PB, en $mg O_2/L/día$, es:

$$PB = (B_c - B_o) / \Delta_t$$

Donde:

B_c = Concentración final de oxígeno en la botella clara

B_o = Concentración final de O_2 en la botella oscura

Δ_t = Periodo de tiempo en el cual se lleva a cabo la respiración.

La productividad neta de oxígeno (PN) expresada en $mg O_2/L /día$ u hora es:

$$PN = (B_c - B_i) / \Delta_t \text{ (Gaarder \& Gran, 1927)}$$

$$\text{O bien: } PN = PB - R$$

Si las muestras de agua fueron obtenidas en diferentes sitios y profundidades de un cuerpo acuático, entonces el promedio de varios valores de R, PB y PN expresará tasas promedio de respiración, productividad bruta y productividad neta.

La fotosíntesis cociente (PQ) y el oxígeno cociente (RQ) son números muy dimensionales que indican la cantidad relativa de oxígeno e implicando la cantidad relativa de oxígeno y carbono en el proceso de fotosíntesis y respiración:

Para el cálculo de la productividad primaria en términos de biomasa, las fórmulas generales son:

$$PB = (B_c - B_o) / \Delta t \times 0.375 / PQ \times 1000$$

$$PN = (B_c - B_{ic}) / \Delta t \times 0.375 / PQ \times 1000$$

$$R = \frac{[(O_2, Bio) - (O_2, Bo)](RQ)(1000)(0.375)}{(\Delta t)}$$

$$R = PB - PN$$

Donde:

PQ= 1.2 y RQ= 1.0.

Se expresan en mgC/m³/hr. Cálculos en (Badillo *et al.*, 2010).

4.5.2. Determinación de la clorofila "a" por fluorimetría.

Una vez realizado el procedimiento se hace una "corrección" de la clorofila "a" que se obtiene en toda la muestra de agua con la siguiente ecuación:

$$C_{s,c} = \frac{CE,u * volumen\ del\ extracto\ (l) * factor\ de\ dilución\ (Fd)}{volumen\ de\ la\ muestra\ (L)}$$

Donde C_{s,c} = Corrigiendo la concentración de clorofila (µg L⁻¹) S, c en el agua todo volumen simple extracto = Volumen (l) del extracto preparado antes de la disolución. Calculando la feofitina una concentración como sigue: P = F (r/r-1) (RR - R)

Donde C_{E,u} = Corrigiendo la concentración de clorofila a (µg L⁻¹) en el análisis de extracción en la solución

Volumen del extracto= Volumen (l) del extracto preparado después de la disolución.

Fd= Factor de dilución

Los resultados deben ser reportados en una base de datos *Microsoft Excel* 2013. Y continuar con el funcionamiento del método tal y como lo refiere Dufour, (1992).

De igual manera la evaluación de la productividad primaria y la concentración de clorofila "a" se relacionaron con las concentraciones de oxígeno y temperatura; así como, nutrimentos, y parámetros ambientales, ya que como se mencionó antes, estos son los factores más importantes que delimitan el rol de los lagos y, por lo tanto; influyen en la evaluación de estas hidrodinámicas.

En laboratorio para un mejor análisis e interpretación de los datos se ocuparon hojas de cálculos de *Microsoft Excel 2013*, con ayuda de gráficos bidimensionales y la utilización de Golden software *Surfer versión 11* (1997-2011), que representan diagramas de profundidad-tiempo en isothermas en ambos lagos.

4.6. Análisis estadísticos

Para las concentraciones de clorofila “a”, nutrientes y productividad primaria por periodos, y por profundidad se realizó un análisis exploratorio de datos a través de diagramas de caja y bigotes múltiples con muesca (Salgado-Ugarte, 2010). Para determinar si existen diferencias significativas para estos parámetros biológicos por periodos y profundidad se emplearon análisis no paramétricos (Marques de Cantú, 1991). Y para establecer las relaciones funcionales entre los parámetros limnológicos y biológicos de la fluorescencia de clorofila “a” se buscaron correlaciones no paramétricas o paramétricas de acuerdo con el comportamiento de los datos a través del programa estadístico *Statgraphics Centurion XVI Versión 16.1.11* (32 bits).

5. RESULTADOS

5.1 Parámetros físicos y químicos.

5.1.1 Temperatura.

La Preciosa.

El periodo de mezcla abarcó de enero a marzo con una temperatura media ambiente de 15.2° y 15.9°C en la columna de agua.

Durante el estudio correspondiente de finales de 2014 y principios del 2015. Se registró que el comportamiento en la dinámica del lago La Preciosa (Fig. 6) lo clasifica como monomítico cálido de acuerdo con los patrones de circulación de lagos profundos y trópicos adecuada por Lewis, (1996), el cual consiste en una etapa de mezcla (hemisférica invernal) de principios de enero a finales de marzo con temperaturas que oscilaron entre 13.9° a 7.3°C y lo que resta del año (aproximadamente ocho meses) el lago permanece en estratificación con oscilaciones entre 14° y 21°C.

La temperatura ambiente aumento hasta 18.8°C con una variación mínima a lo largo de la estratificación:

Durante la etapa de estratificación existieron tres subdivisiones de clasificación de acuerdo con sus diferencias de temperaturas:

- ✓ Estratificación temprana (ET). Donde la termoclina que coincide con el metalimnion se estableció por variaciones térmicas menores a 1°C que van de los 0.85° a 0.75°C por cada metro de profundidad hacia el fondo, esta estratificación comenzó de finales de marzo a principios de junio con variaciones de temperatura entre los 21.1° y los 15.3°C. El epilimnion se ubicó desde la superficie a los 6 m de profundidad, mientras que la termoclina se ubicaba hasta los 23 m, mientras el hipolimnion estuvo por debajo de la termoclina hacia el fondo.
- ✓ Estratificación bien establecida (EBE). La termoclina se definió por una diferencia térmica de 1°C por metro de profundidad, la cual comenzó a finales de junio y principios de septiembre con variaciones de temperatura que fueron de los 19.5° a 15.5°C. El epilimnion se ubicó desde la superficie a los 13 m de profundidad, mientras que la termoclina por debajo de ésta hasta los 25 m, por lo tanto; el hipolimnion se profundizó dos metros por debajo de la termoclina hacia el fondo.
- ✓ Estratificación tardía (Eta). Abarcando los meses de finales de septiembre y mediados de noviembre. El epilimnion se ubicó desde la superficie hasta los 14 m de profundidad, mientras que el metalimnion fue desde los 15 a los 30 m de profundidad. Disminuyendo el grosor del hipolimnion (entre 16 y 5 m). La termoclina se profundizó conforme avanzó la estratificación para romperse por diferencias mínimas de densidades y dar paso a una circulación en toda la columna de agua del lago. (Tabla 1).

Tabla 1.- Temperatura (°C) por estratos en la columna del lago La Preciosa. X= promedio; d.e= desviación estándar; Ze: zona eufótica.

Etapas H.	Estratos	TEMPERATURA				Ze m(z)
		X	d.e.	Máximo	Mínimo	
MEZ		15.26	1.17	17.30	13.80	13
ET	EPI	18.83	1.41	21.10	15.30	
	META	16.84	1.06	18.20	15.50	10.81
	HIPO	15.53	0.21	18.20	15.5	
EBE	EPI	19.00	0.25	19.50	18.5	
	META	17.54	0.94	18.91	14.90	9.675
	HIPO	15.34	0.90	16.30	14.00	
Eta	EPI	18.40	0.22	18.70	18.00	
	META	18.02	0.18	18.20	17.70	19.54
GLOBAL	X	17.37	0.46	21.1	14.00	

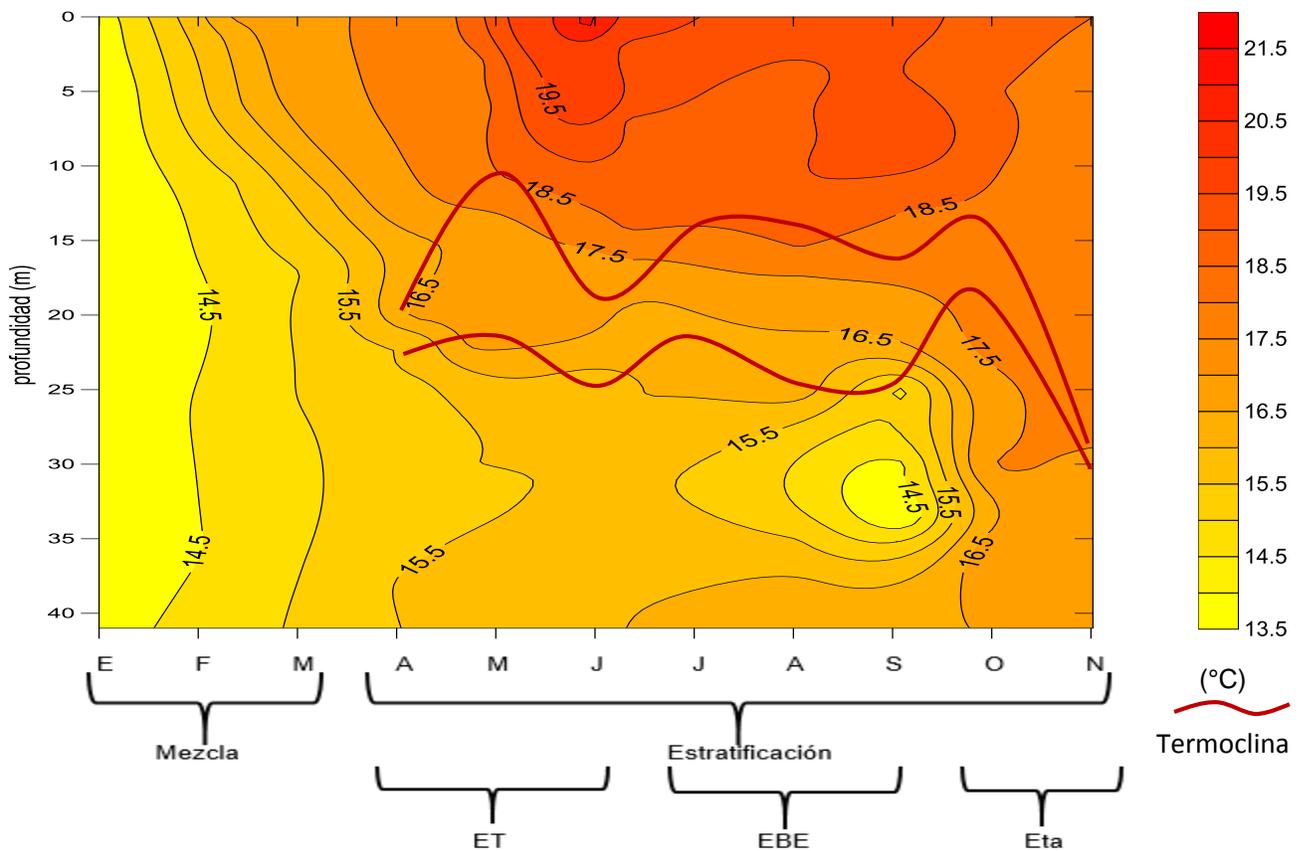


Figura 6. Diagrama espacio-temporal de la temperatura (°C) en el lago La Preciosa.

Atexcac.

De igual manera, y coincidentemente con trabajos anteriores se determinó que de acuerdo con la temperatura (Fig. 7) registrada mensualmente que el lago posee una etapa de mezcla (hemisférica invernal) de principios de enero a finales de marzo con temperaturas que oscilaron entre 20.1° a 15.4°C y lo que resta del año el lago permanece en estratificación con oscilaciones de 21.5° a 15.7°C una dinámica que lo identifica como monomítico cálido (Lewis, 1996; Arellano & González, 2011; Lagunas & Martínez, 2015).

La temperatura en el periodo de mezcla que abarcó de los meses de enero a marzo con una temperatura ambiente de 15.5°C promedio y 16.1°C en la columna de agua.

Durante la etapa de estratificación existieron tres subdivisiones de clasificación de acuerdo con sus diferencias de temperaturas:

- ✓ Estratificación temprana (ET). La termoclina se estableció por fluctuaciones térmicas menores a 1°C que van de los 0.87° a 0.57°C por cada metro de profundidad hacia el fondo cuya estratificación comenzó a finales de marzo a principios de junio con variaciones de temperatura que fueron de los 21.5° a 15.7°C. El epilimnion se ubicó hasta los 10 m de profundidad, mientras que la termoclina tuvo fluctuaciones desde este nivel hasta los 23 m de profundidad con fluctuaciones que fueron de los 19.2° a 16.1°C, por lo tanto, el hipolimnion estuvo por debajo de la termoclina hacia el fondo con fluctuaciones de 16.12° a 15.7°C.
- ✓ Estratificación bien establecida (EBE). La termoclina se definió por una diferencia térmica de 1°C por metro de profundidad, la cual comenzó a finales de junio y principios de septiembre con variaciones de temperatura que fueron de los 16.8° a 19.6°C. El epilimnion se ubicó hasta los 12 m de profundidad, mientras que la termoclina tuvo fluctuaciones desde este nivel hasta los 20 m de profundidad con variaciones de los 19.6° a 16.9°C, por lo tanto; el hipolimnion se profundizó dos metros por debajo de la termoclina hacia el fondo con fluctuaciones de 16.9° a 16.1°C.
- ✓ Estratificación tardía (Eta). Esta etapa abarcó de finales del mes de septiembre a mediados de noviembre. El epilimnion se ubicó hasta los 15 m de profundidad con fluctuaciones de 19.4° a 18.8°C. La termoclina quedó por debajo de esta con una amplitud hasta los 25 m y con fluctuaciones de temperatura que fueron de los 19.4° a 17.4°C. Disminuyendo el grosor del hipolimnion con fluctuaciones de temperatura entre 18.2° a 17.4°C. La termoclina se profundizó por diferencias de temperaturas para dar paso a una nueva circulación en el lago. (Tabla 2).

Tabla 2. Temperatura (°C) por estratos en la columna del lago Atexcac. X: promedio; d.e: desviación estándar; Ze: zona eufótica.

Etapas H.	Estratos	TEMPERATURA			Ze	
		X	d.e	Máximo	Mínimo	m(z)
MEZ		16.87	1.44	20.1	15.4	16.69
ET	EPI	19.96	0.87	21.5	19.1	
	META	17.68	1.05	19.2	16.1	8.48
	HIPO	16.12	0.57	16.9	15.7	
EBE	EPI	19.85	0.34	19.6	19.5	
	META	18.43	1.17	19.6	16.9	9.82
	HIPO	16.41	0.30	16.9	16.1	
Eta	EPI	19.00	0.22	19.4	18.8	
	META	18.42	0.69	19.4	17.4	13.54
	HIPO	17.87	0.42	18.2	17.4	
GLOBAL	X	18.19	0.63	19.0	17.4	

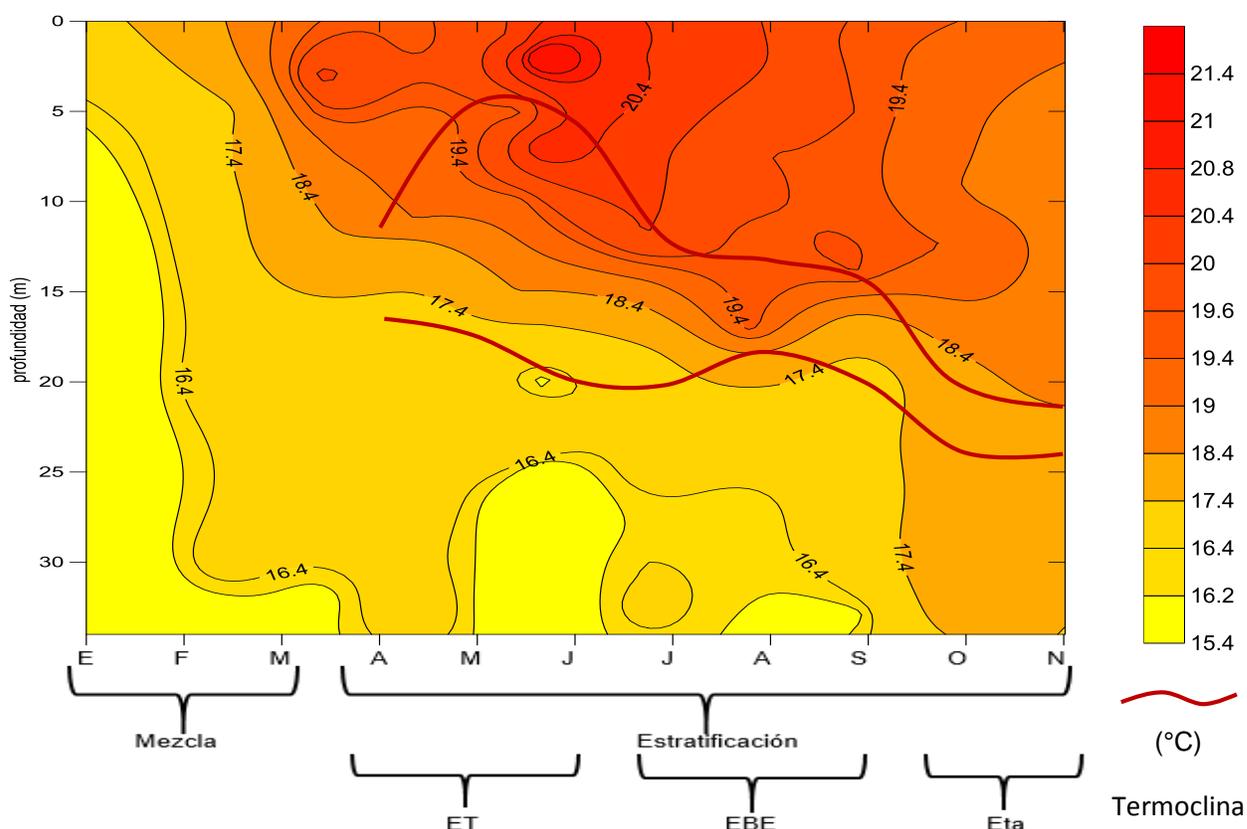


Figura 7. Diagrama espacio-temporal de la temperatura en (°C) en el lago Atexcac.

5.1.2. Oxígeno disuelto (OD)

La Preciosa.

Se observaron incrementos en la concentración de oxígeno disuelto en la superficie (7.44 mg L⁻¹) mientras que hacia el fondo se presentaba una marcada disminución (2.83 mg L⁻¹) (Fig. 8).

La concentración de oxígeno disuelto presentó el siguiente comportamiento para las diferentes fases de la estratificación:

- ✓ La estratificación temprana (ET): el epilimnion tuvo una concentración media de 7.33 mg L⁻¹. La zona eufótica se encontró hasta los 11 m de profundidad y por debajo se estableció la oxiclina hasta los 23 m de profundidad, concentraciones que van hasta 7.18 a 4.02 mg L⁻¹, mientras que el hipolimnion se registraron concentraciones no mayores a 3.0 mg L⁻¹.
- ✓ En la estratificación bien establecida (EBE): el epilimnion tuvo una concentración promedio máxima de 6.97 mg L⁻¹. La zona eufótica se encontró hasta los 10 m de profundidad y por debajo se estableció la oxiclina hasta los 22 m de profundidad con concentraciones que fueron de 6.94 a 2.88 mg L⁻¹. El hipolimnion se volvió anóxico.
- ✓ La estratificación tardía (Eta): el epilimnion hubo un mayor desarrollo durante toda la etapa de estratificación registrándose el valor promedio máximo de 10.90 mg L⁻¹.

La oxiclina se estableció entre los 25 m y 30 m de profundidad con concentraciones entre los 7.10 y 1 mg L⁻¹. En el hipolimnion hubo un incremento en la concentración de oxígeno disuelto de 1 mg L⁻¹ hasta 5 mg L⁻¹ conforme avanzaron los meses en esta etapa. Estos comportamientos de la temperatura y el OD se ven asociados con un comportamiento de monomixis cálida (Tabla 3).

Tabla 3.- Oxígeno disuelto (mg L⁻¹) por estratos en la columna del lago La Preciosa. X: promedio; d.e: desviación estándar; Ze: zona eufótica.

Etapas H.	Estratos	OXÍGENO				Ze m(z)
		X	d.e	Máximo	Mínimo	
MEZ		7.15	1.34	7.44	2.83	13
ET	EPI	7.33	0.22	7.62	6.75	
	META	4.02	2.41	7.18	0.26	10.81
	HIPO	1.71	1.13	2.70	0.29	
EBE	EPI	6.97	0.36	7.27	6.02	
	META	2.88	2.76	6.94	0.28	9.675
	HIPO	0.25	0.04	0.30	0.20	
Eta	EPI	6.86	2.31	10.90	4.50	
	META	5.16	2.23	7.10	1.78	19.54
	HIPO	1.07	0.43	1.50	0.60	
GLOBAL	X	4.03	1.32	5.72	2.30	

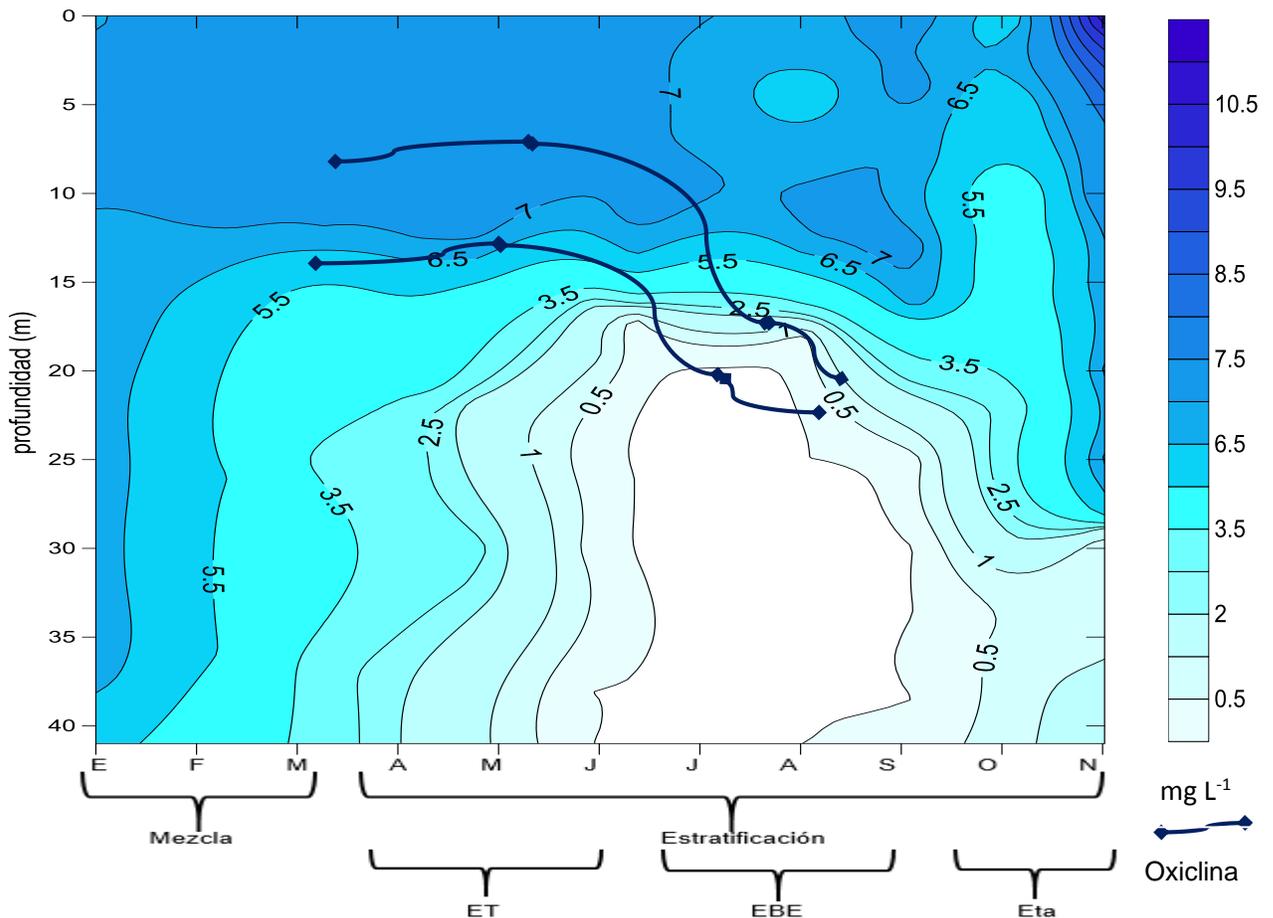


Figura 8. Diagrama espacio-temporal del oxígeno disuelto en mg L^{-1} en el lago La Preciosa.

Atexcac.

Durante el periodo de mezcla que abarcó de los meses de enero a marzo se registraron incrementos en la concentración de oxígeno disuelto en la superficie de 6 a 8.25 mg L^{-1} mientras que hacia el fondo se presentó una marcada disminución 2.62 mg L^{-1}

La concentración de oxígeno disuelto al igual que la temperatura del agua presentó variabilidad con respecto a la columna de agua en las diferentes etapas de la estratificación térmica:

- ✓ Estratificación temprana (ET): el epilimnion se situó hasta los 10 m de profundidad y tuvo una concentración máxima de 7.54 mg L^{-1} . La zona eufótica se encontró a los 10 m de profundidad, mientras que la oxiclina hasta los 23 m de profundidad con fluctuaciones que van desde los 7.81 a 1.69 mg L^{-1} , el hipolimnion registró concentraciones no mayores a 1.72 y mínimas de 0.27 mg L^{-1} .
- ✓ Estratificación bien establecida (ETE): el epilimnion se situó hasta los 7 m de profundidad y tuvo una concentración de 7.36 mg L^{-1} . La zona eufótica se encontró a los 9.82 m de profundidad, mientras que la oxiclina hasta los 20 m de profundidad

con fluctuaciones que van desde los 7.50 a 1.99 mg L⁻¹, el hipolimnion tendió a ser anóxico desde los 22 m.

- ✓ Estratificación tardía (Eta): el epilimnion se encontró hasta los 15 m de profundidad y tuvo una concentración máxima de 8.40 mg L⁻¹. La zona eufótica se encontró a los 13 m, mientras que la oxiclina tuvo una amplitud de 12 a 22 m con concentraciones que fluctuaron desde los 7.10 a 0.24 mg L⁻¹, en el hipolimnion hubo un incremento en la concentración de oxígeno disuelto de 0.5 a 4 mg L⁻¹.

Tabla 4.- Oxígeno disuelto (mg L⁻¹) por estratos en la columna del lago Atexcac. X: promedio; d.e: desviación estándar; Ze: zona eufótica.

Etapas H.	Estratos	OXÍGENO				Ze
		X	d.e	Máximo	Mínimo	m(z)
MEZ		6.24	1.45	8.25	2.62	16.69
ET	EPI	7.54	0.25	7.76	7.13	
	META	5.76	2.18	7.81	1.69	8.48
	HIPO	0.94	0.57	1.72	0.27	
EBE	EPI	7.19	0.10	7.36	7.10	
	META	5.93	1.97	7.50	1.99	9.82
	HIPO	0.34	0.17	0.74	0.21	
Eta	EPI	7.16	0.55	8.40	6.88	
	META	4.85	2.59	7.10	0.24	13.54
	HIPO	0.39	0.27	0.70	0.21	
GLOBAL	X	4.46	0.96	5.45	2.86	

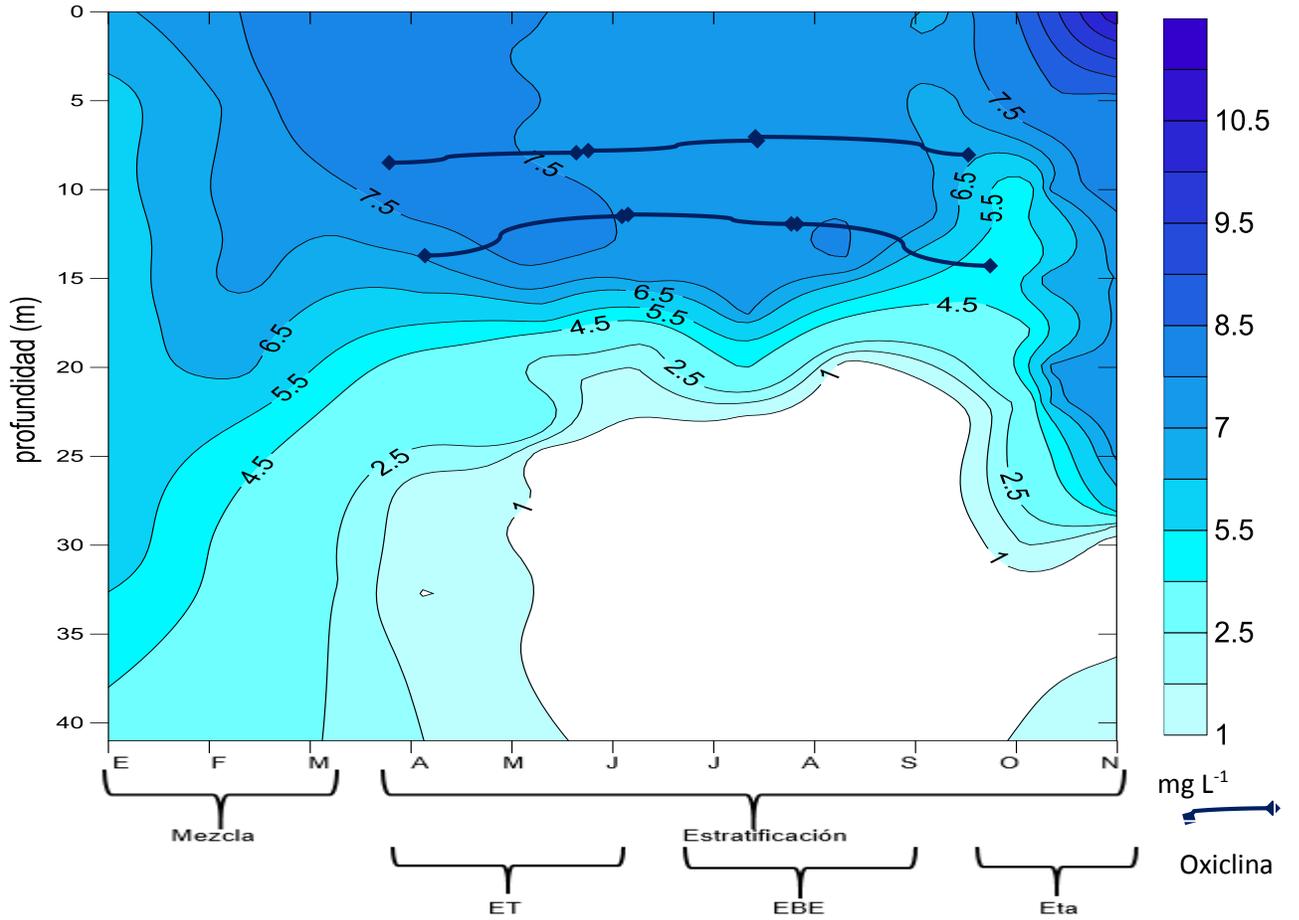


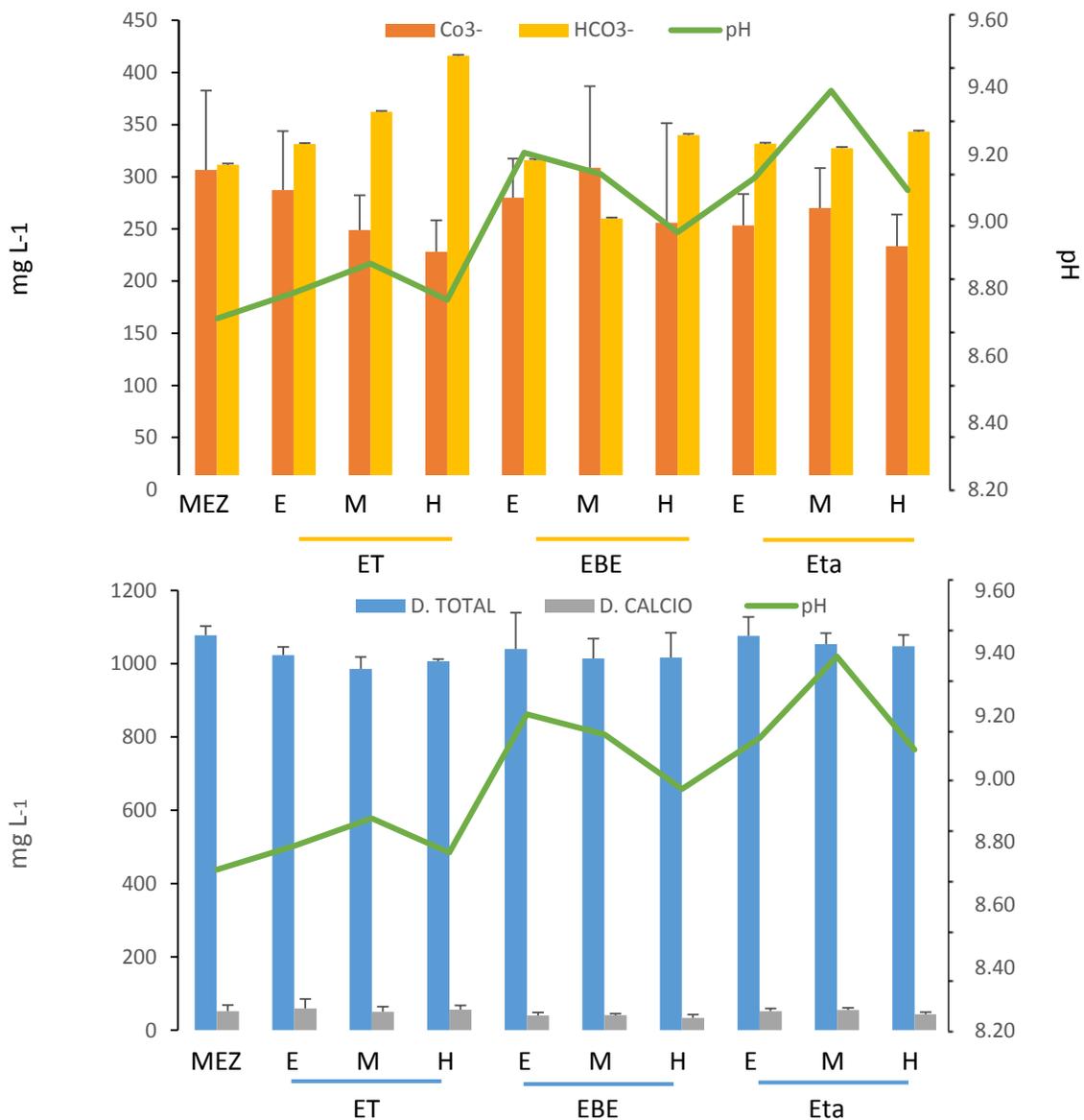
Figura 9. Diagrama espacio-temporal del oxígeno disuelto en mg L⁻¹ en el lago Atexcac.

5.1.3. Alcalinidad, Durezas y pH.

La alcalinidad es un parámetro que representa la capacidad del agua que tiene para neutralizar ácidos o aceptar protones y está determinada por carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. La dureza total se refiere a la concentración de cationes divalentes iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} formadas con asociaciones aniónicas.

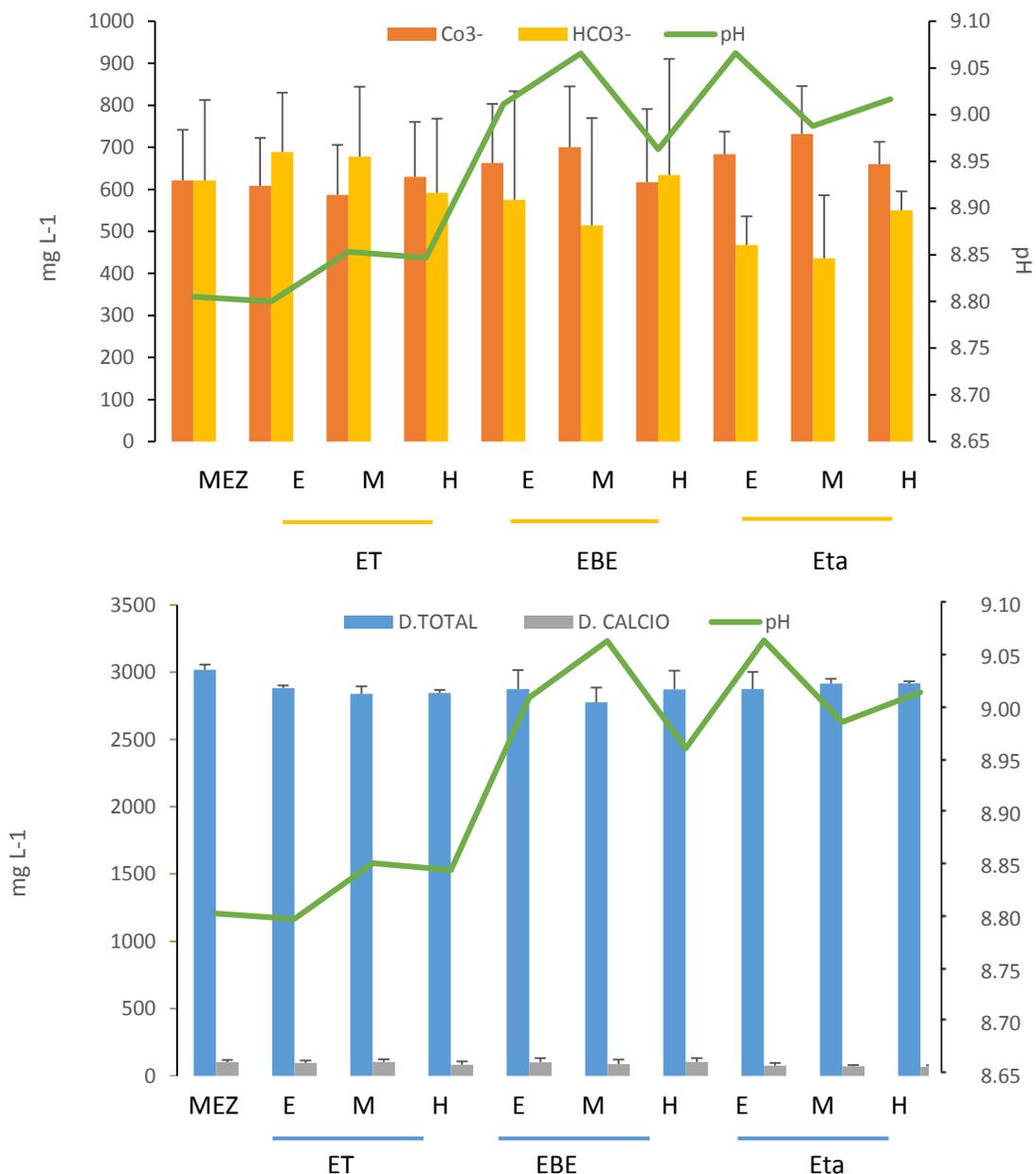
La Preciosa

El lago presentó un pH alcalino entre 8.8 y 9 predominando los bicarbonatos sobre los carbonatos con concentraciones promedio que fluctuaron entre 416 a 260 mg de $\text{HCO}_3^- \text{L}^{-1}$ y 308 a 228 mg de $\text{CO}_3^{2-} \text{L}^{-1}$. La dureza total tuvo concentraciones que fueron de 1077 a 985 mg de $\text{CaCO}_3 \text{L}^{-1}$ lo que lo caracteriza como un sistema de agua dura (Boyd, 1990). (Figs. 9 A y B).



Atexcac.

El lago presentó un pH alcalino entre 8.8 y 9.07 predominando los bicarbonatos sobre los carbonatos con concentraciones promedio que oscilaron de 688 a 436 mg de $\text{HCO}_3^- \text{ L}^{-1}$ y 732 a 586 mg de $\text{CO}_3^{2-} \text{ L}^{-1}$ respectivamente. La dureza total tuvo concentraciones que fluctuaron de 3016 a 2844 mg de $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ lo que lo caracteriza como un sistema de agua muy duras (Boyd, 1990). (Figs. 10 A y B).



Figuras 10 y 11. A. Alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos. B. Dureza total y de calcio ambas gráficas muestran la variación de pH y están hechas con concentraciones promedio, desviaciones estándar y se fraccionaron en fases (E=epilimnion, M=metalimnion e H=hipolimnion) y por etapas hidrodinámicas (MEZ=mezcla, ET=estratificación temprana, EBE=estratificación bien establecida y Eta=estratificación tardía) a través del año de muestreo.

5.1.4. Total de sólidos disueltos y conductividad

La Preciosa

Se observaron variaciones mínimas de conductividad eléctrica con concentraciones promedio de 2.22 y 2.02 mS cm⁻¹ y TSD con concentraciones promedio de 1.10±0.01 g L⁻¹, estos últimos obtenidos teniendo como referencia la conductividad eléctrica. Por su salinidad se encuentra en el límite entre agua dulce y salina, considerándolo como un ambiente sub-salino (Martínez, 2010).

Tablas 5. A y B. Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de la conductividad eléctrica y del total de sólidos disueltos por etapa hidrodinámica durante un ciclo anual.

ETAPA	CONDUCTIVIDAD (mS cm ⁻¹)			
	X	d.e.	Máximo	Mínimo
MEZ	2.22	0.11	2.46	2.15
ET	2.16	0.03	2.46	2.04
EBE	2.14	0.01	2.23	2.02
Eta	2.11	0.01	2.22	2.02
Global	2.16	0.04	2.34	2.06

Atexcac

La conductividad eléctrica promedio en el lago fue de 12.11±0.12 mS cm⁻¹ y el TSD promedio fue de 6.11±5.65 g/L⁻¹. Por su salinidad se considera como hipo-salino (Armenta *et al.*, 2008).

Tablas 6. A y B. Promedio, desviación estándar, máximo y mínimo de la conductividad eléctrica y del total de sólidos disueltos por etapa hidrodinámica durante un ciclo anual.

ETAPA	CONDUCTIVIDAD (mS cm ⁻¹)			
	X	d.e.	Máximo	Mínimo
MEZ	11.88	0.43	12.24	11.05
ET	12.11	0.12	12.43	11.05
EBE	11.98	0.07	12.34	11.35
Eta	12.22	0.04	12.55	11.96
Global	12.05	0.16	12.39	11.35

5.2. Nutrimientos

Nutrientes inorgánicos; nitrógeno, fósforo y otros nutrientes.

Los componentes de nitrógeno, y especialmente aquellos con fósforo son los mejores componentes celulares del organismo. Desde la habilidad de estos elementos pueden ser menos que la demanda biológica, los factores ambientales pueden regular un limitante de la productividad de los organismos en los ecosistemas de agua dulce. Otros elementos como el hierro y el azufre son constituyentes celulares esenciales, pero son requeridos en concentraciones relativamente bajas en relación con su disponibilidad.

Los mejores cationes básicos, como el calcio, magnesio, sodio y potasio, usualmente son requeridos en bajas cantidades; pero estas pueden influenciar en la osmorregulación de los organismos.

Las concentraciones de nitrógeno y fósforo son altamente dinámicas porque ellas pueden ser almacenadas, utilizadas, transformadas y excretadas rápidamente por varios organismos acuáticos.

Nitrógeno-Amonio

Excepto bajo condiciones muy alcalinas ($\text{pH} > 9.0$), el amonio se encuentra en agua dulce en su forma iónica (NH_4^+). Es un importante recurso de nitrógeno para bacterias, algas y plantas en los lagos, arroyos y ríos, las concentraciones son comúnmente bajas y estas pueden cambiar rápida y drásticamente.

Nitrógeno-Nitrato-Nitrito

Quizás el mejor método para el análisis de $\text{NO}_3^- \text{N}$ en agua es hacer reducir el nitrato en una solución de buffer alcalino hacia nitrito pasando una muestra de agua a través de una columna "coperizada" por limaduras de metal de cadmio (Wood *et al.*, 1967). El nitrato es leído por un método de diazotación sensitivo que resulta en un color estable rosa cuya absorbancia obedece a la ley de Beer's hasta cerca de $500 \mu\text{g L}^{-1} \text{NO}_3^- \text{N}$ o $\text{NO}_2^- \text{N} \mu\text{g L}^{-1}$. Las concentraciones de nitrato de una muestra original pueden ser determinadas muy exactamente (S.D. \pm ca. $0.5 \mu\text{g L}^{-1} \text{NO}_2^- \text{N} \mu\text{g L}^{-1}$) antes de la reducción de NO_3^- a NO_2^- por la misma técnica de diazotación.

Nitrógeno orgánico

Una gran fracción del total del nitrógeno en agua dulce puede ocurrir como nitrógeno orgánico en partículas, y especialmente en forma disuelta. Mientras este componente de nitrógeno orgánico ocurre en gran parte del nitrito orgánico particulado y orgánico disuelto y que generalmente no están disponibles hacia organismos fotosintéticos, ellos representan una mejor reserva de nitrógeno en ecosistemas acuáticos.

Fósforo

El fósforo es el menos abundante de los nutrientes y comúnmente limita la productividad primaria en ecosistemas acuáticos. Sus componentes de bajo peso molecular son secretados en diversos tamaños como: ya sea en fracción coloidal, o una porción particulada, éstos se sedimentan hacia el hipolimnion y son hidrolizados a formas más simples de ortofosfatos solubles; que con la mezcla invernal se redistribuye hacia la zona metalimnética de los ecosistemas acuáticos, contribuyendo así, a la asimilación por los productores primarios. (Wetzel & Likens 1990).

5.2.1. Nitratos (NO_3^-)

La Preciosa

Las concentraciones promedio de NO_3^- en la columna de agua durante la mezcla fueron de ($0.0140 \pm 0.011 \text{ mg L}^{-1}$), siendo las mayores durante las diferentes etapas hidrodinámicas.

En la estratificación temprana se presentó la máxima concentración de NO_3^- en el hipolimnion ($0.053 \pm 0.022 \text{ mg L}^{-1}$) con una tendencia a disminuir a la mitad hacia los estratos superiores.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de NO_3^- siguieron un patrón inverso a la fase hidrodinámica anterior, siendo mayores en el epilimnion ($0.0084 \pm 0.011 \text{ mg L}^{-1}$) y menores en el hipolimnion ($0.003 \pm 0.0027 \text{ mg L}^{-1}$).

Mientras para la estratificación tardía las concentraciones en todos los estratos fueron las más bajas registradas durante este período con concentraciones menores a ($0.0019 \pm 0.0011 \text{ mg L}^{-1}$) (Fig. 12).

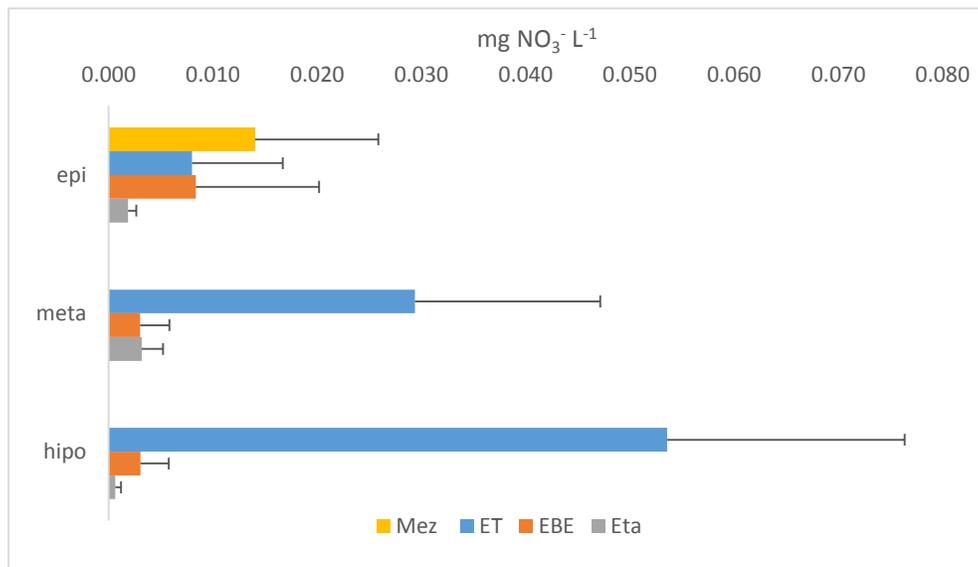


Figura 12. Concentraciones promedio de NO_3^- en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.

Atexcac

Las concentraciones promedio de NO_3^- en la columna de agua durante la mezcla fue de $(0.006 \pm 0.004 \text{ mg L}^{-1})$, siendo las más altas de las diferentes etapas hidrodinámicas.

La estratificación temprana presentó una concentración promedio de NO_3^- $(0.002 \pm 0.005 \text{ mg L}^{-1})$ y disminuyendo del epilimnion hacia el hipolimnion $(0.0054-0.0068 \text{ mg L}^{-1})$ respectivamente, a través de la columna de agua.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio $(0.0026 \pm 0.0054 \text{ mg L}^{-1})$; disminuyendo ligeramente del epilimnion hacia el hipolimnion a través de la columna de agua.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio de NO_3^- $(0.0008 \pm 0.0004 \text{ mg L}^{-1})$, que se mantuvo oscilando constantemente a través de los estratos de la columna de agua (Fig. 13).

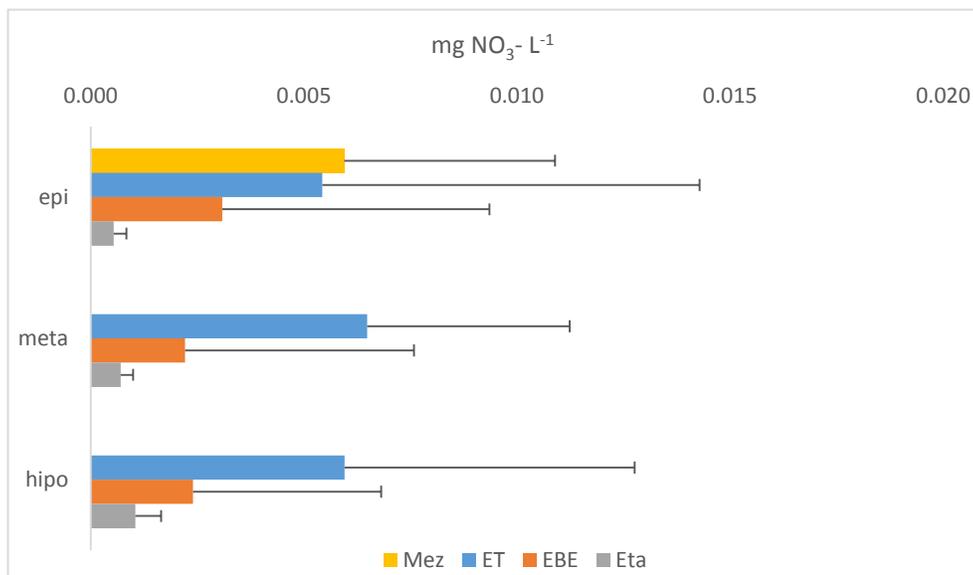


Figura 13. Concentraciones promedio de NO_3^- en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.

5.2.2. Nitritos (NO₂⁻)

La Preciosa

Las concentraciones promedio de NO₂⁻ en la columna de agua durante el periodo de mezcla fueron de (0.0009±0.0018 mg L⁻¹) con oscilaciones constantes a través de toda la columna de agua.

La estratificación temprana presentó una concentración promedio de NO₂⁻ (0.0002±0.0002 mg L⁻¹), manteniéndose homogéneo a través de la columna de agua y siendo los valores menores que en las diferentes etapas del periodo de estudio.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de NO₂⁻ (0.0010±0.0007 mg L⁻¹), aumentaron hacia el hipolimnion significativamente con respecto a la etapa anterior.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio de NO₂⁻ (0.0013±0.0008 mg L⁻¹), siendo las mayores concentraciones durante el periodo de estudio (Fig. 14).

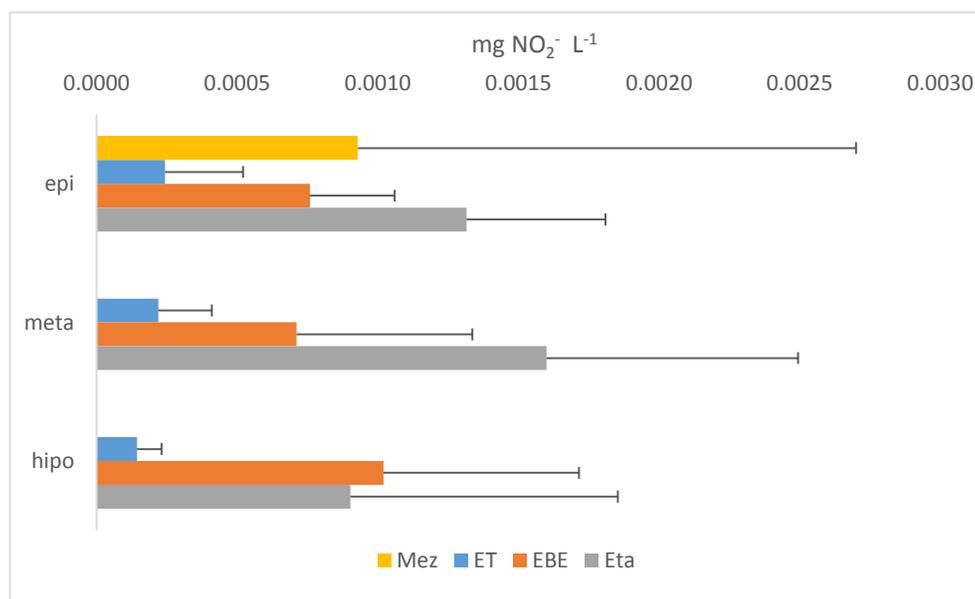


Figura 14. Concentraciones promedio de NO₂⁻ en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.

Atexcac

La concentración promedio de NO₂⁻ presentó valores durante la mezcla de (0.0006±0.0004 mg L⁻¹), que se mantuvieron homogéneos a través de los diferentes estratos de la columna de agua.

La estratificación temprana presentó una concentración promedio de NO_2^- ($0.0005 \pm 0.0006 \text{ mg L}^{-1}$), con valores menores a las diferentes etapas del periodo de estudio.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de NO_2^- ($0.0015 \pm 0.0009 \text{ mg L}^{-1}$); siendo el metalimnion (0.0018 mg L^{-1}) con las mayores concentraciones durante el periodo de estudio.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio de NO_2^- ($0.0010 \pm 0.0011 \text{ mg L}^{-1}$); disminuyendo ligeramente con respecto a la etapa anterior (Fig. 15)

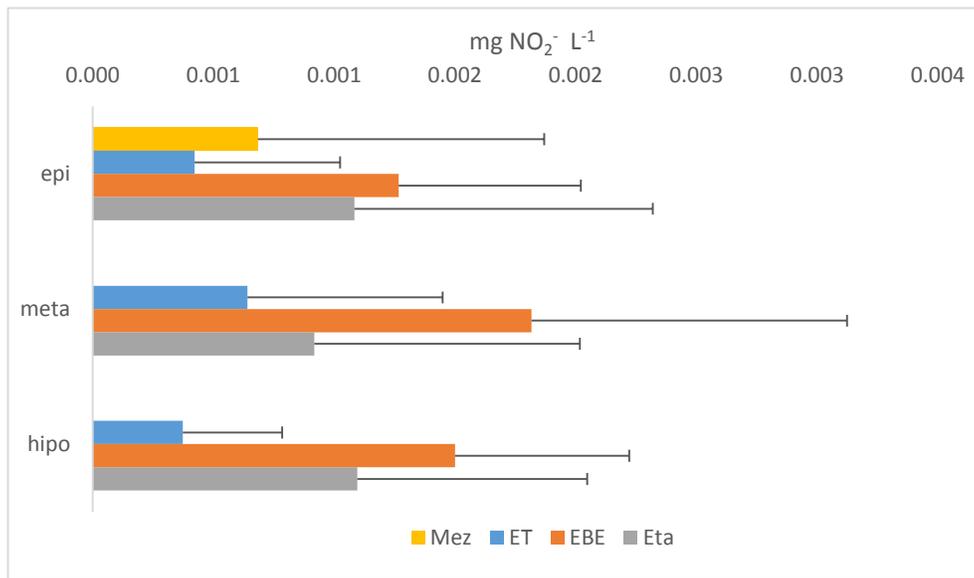


Figura 15. Concentraciones promedio de NO_2^- en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.

5.2.3. Amonio (NH_4^+)

La Preciosa

La concentración promedio de NH_4^+ durante la etapa de mezcla fue de ($0.0575 \pm 0.0389 \text{ mg L}^{-1}$).

La estratificación temprana presenta una concentración promedio de NH_4^+ ($0.0558 \pm 0.0500 \text{ mg L}^{-1}$) la cual se mantuvo homogénea a través de los diferentes estratos de la columna de agua.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de NH_4^+ ($0.0683 \pm 0.0759 \text{ mg L}^{-1}$), fueron aumentando del epilimnion hacia el hipolimnion a través de la columna de agua.

La estratificación tardía presenta una concentración promedio de NH_4^+ ($0.0746 \pm 0.0192 \text{ mg L}^{-1}$); donde el hipolimnion fue la más alta registrada durante este período con concentraciones menores a 0.15 mg L^{-1} (Fig. 16).

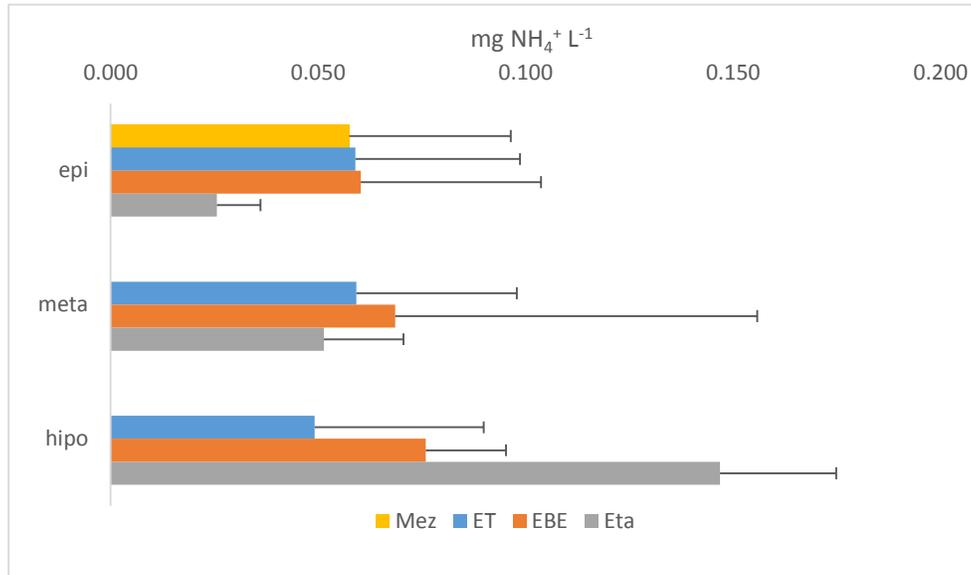


Figura 16. Concentraciones promedio de NH_4^+ en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.

Atexcac

Las concentraciones promedio de NH_4^+ en la etapa de mezcla con valores ($0.0594 \pm 0.0508 \text{ mg L}^{-1}$) siendo la etapa con mayor concentración ligeramente por arriba que la EBE.

La estratificación temprana presentó concentraciones promedio de NH_4^+ ($0.0245 \pm 0.0166 \text{ mg L}^{-1}$), fueron menores a las diferentes etapas del periodo de estudio.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de NH_4^+ ($0.0543 \pm 0.0411 \text{ mg L}^{-1}$); fueron aumentando del epilimnion hacia el hipolimnion a través de la columna de agua.

La estratificación tardía presenta una concentración promedio de NH_4^+ ($0.0384 \pm 0.0144 \text{ mg L}^{-1}$); siguiendo el mismo comportamiento de profundizarse a través de la columna de agua (Fig. 17).

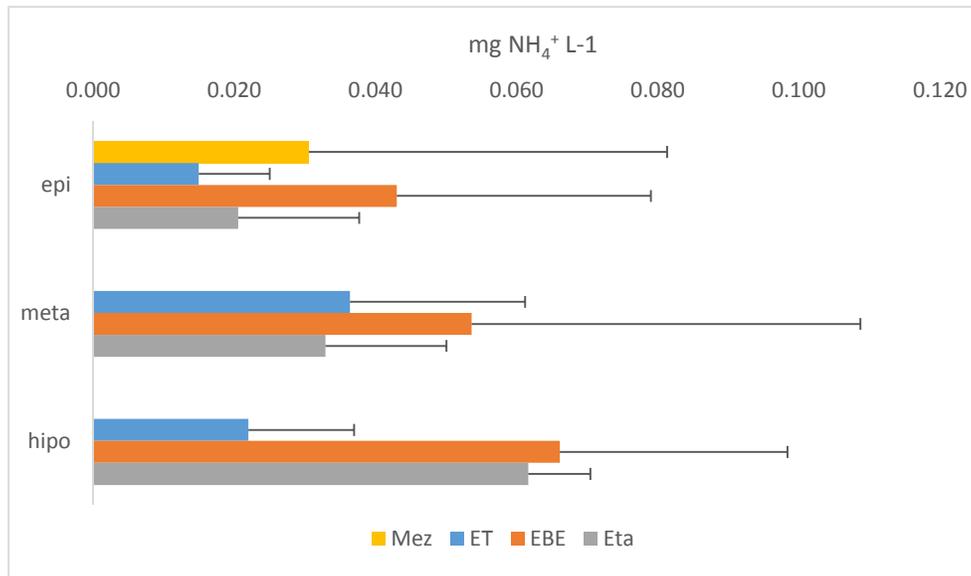


Figura 17. Concentraciones promedio de NH₄⁺ en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.

5.2.4. Fósforo soluble reactivo (PO₄³⁻)

La Preciosa

Las concentraciones promedio de PO₄³⁻ con valores mezcla (0.0030±0.0027 mg L⁻¹) siendo las homogénea a través de la columna de agua.

La estratificación temprana presentó una concentración promedio de PO₄³⁻ (0.0023±0.0008 mg L⁻¹), la cual se mantuvo homogénea y fue menor que los diferentes estratos de la columna de agua con una máxima de 0.0043 mg L⁻¹ en el hipolimnion.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de PO₄³⁻ (0.0079±0.0082 mg L⁻¹); siendo las mayores concentraciones durante el periodo de estudio.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio de PO₄³⁻ (0.0049±0.0027 mg L⁻¹); disminuyendo medianamente con respecto a la etapa anterior (Fig. 18).

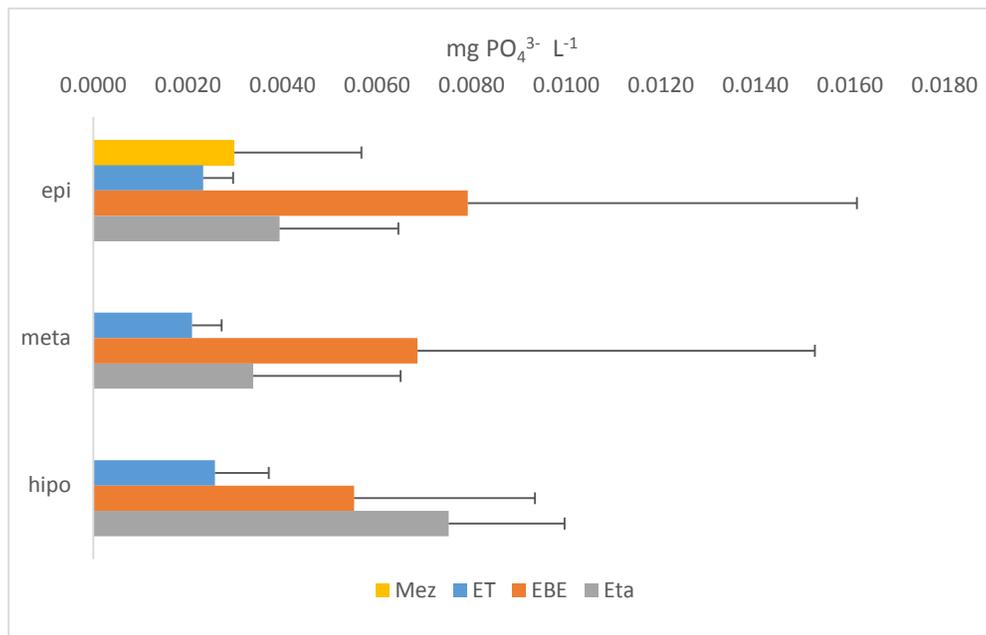


Figura 18. Concentraciones promedio de PO₄³⁻ en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.

Atexcac

Las concentraciones promedio de PO₄³⁻ durante la etapa de mezcla fueron (0.003±0.002 mg L⁻¹), que se mantuvo oscilando constantemente a través de la columna de agua.

La estratificación temprana presentó una concentración promedio de PO₄³⁻ (0.003±0.002 mg L⁻¹), constantes en los diferentes estratos de la columna de agua.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de PO₄³⁻ (0.009±0.003 mg L⁻¹); siendo las mayores con respecto a las diferentes etapas durante el periodo de estudio.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio de PO₄³⁻ (0.006±0.002 mg L⁻¹); disminuyendo considerablemente con respecto al valor más alto de la etapa anterior. (Fig. 19).

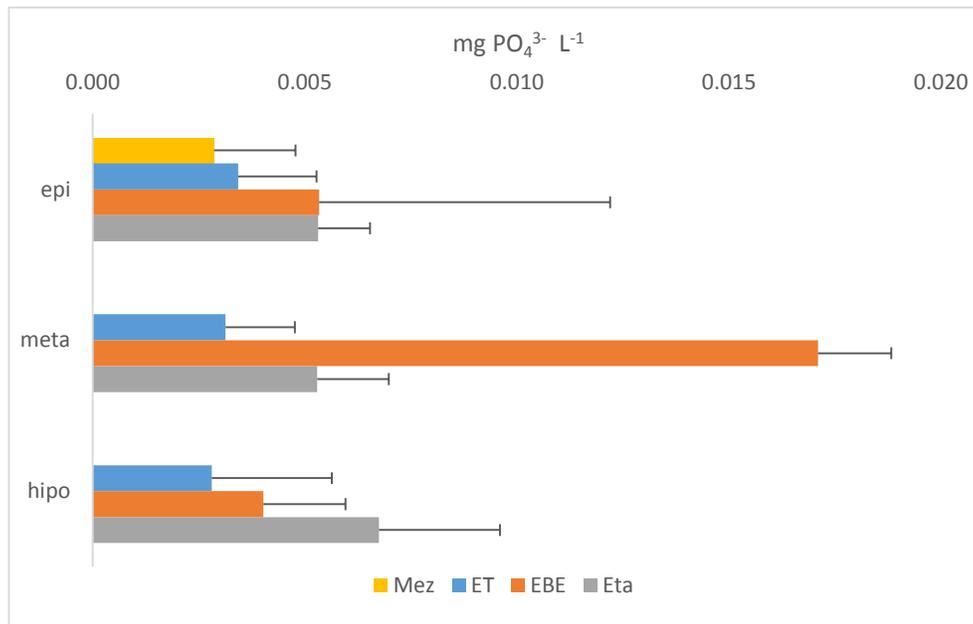


Figura 19. Concentraciones promedio de PO₄³⁻ en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.

5.2.5. Fósforo Total (FT)

La Preciosa

El periodo de mezcla presentó concentraciones de FT promedio (0.0499 ± 0.0325 mg L⁻¹) que se mantuvieron por arriba de las diferentes etapas hidrodinámicas del periodo de estudio y sobre pasa la escala de la gráfica.

La estratificación temprana presentó concentraciones promedio de FT (0.0038 ± 0.0040 mg L⁻¹), y se mantuvo oscilando constante a través de los diferentes estratos de la columna de agua.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de FT fueron de (0.0040 ± 0.0025 mg L⁻¹), y que aumentaron (0.0016 - 0.0079 mg L⁻¹) del epilimnion hacia el hipolimnion respectivamente.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio de FT (0.0024 mg L⁻¹) en el epilimnion, con una ligera disminución en el metalimnion (0.0019 mg L⁻¹) y aumentando considerablemente hacia el hipolimnion (0.0075 mg L⁻¹) a través de la columna de agua (Fig. 20).

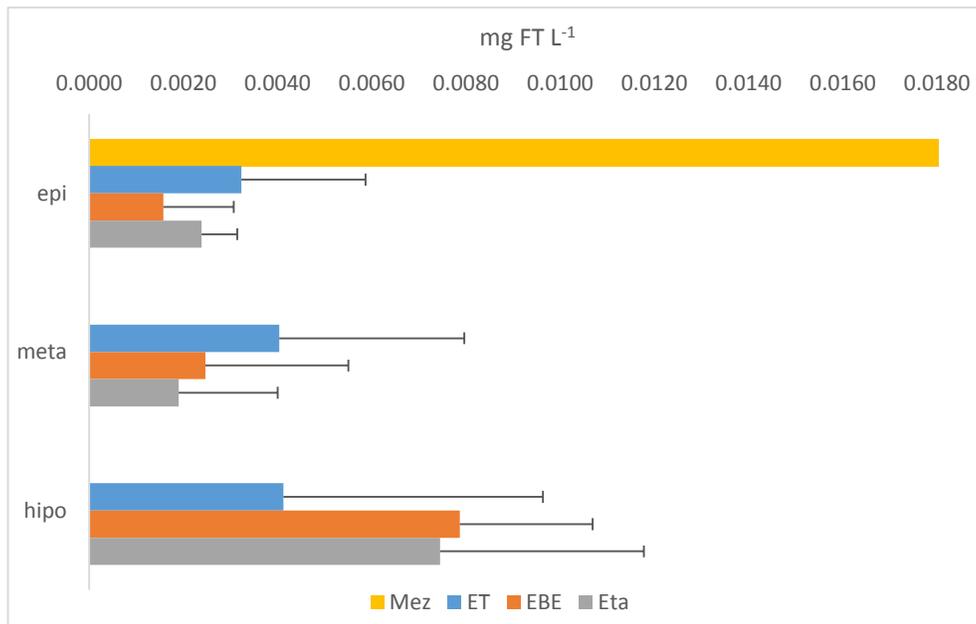


Figura 20. Concentraciones promedio de FT en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.

Atexcac

Las concentraciones promedio de FT durante la etapa de mezcla fue de $(0.032 \pm 0.022 \text{ mg L}^{-1})$ que se mantuvieron homogéneas a través de la columna de agua.

La estratificación temprana presentó concentraciones promedio de FT $(0.0453 \pm 0.0420 \text{ mg L}^{-1})$, con un ligero aumento en el epilimnion $(0.033 \text{ mg L}^{-1})$ y aumentando hacia el hipolimnion $(0.073 \text{ mg L}^{-1})$; siendo la etapa con mayores valores del periodo de estudio.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de FT $(0.0334 \pm 0.0797 \text{ mg L}^{-1})$, fueron aumentando del epilimnion hacia el hipolimnion a través de la columna de agua.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio de $(0.022 \pm 0.0135 \text{ mg L}^{-1})$ a través de la columna de agua, siendo la más baja de los diferentes estratos de la etapa hidrodinámica (Fig. 21).

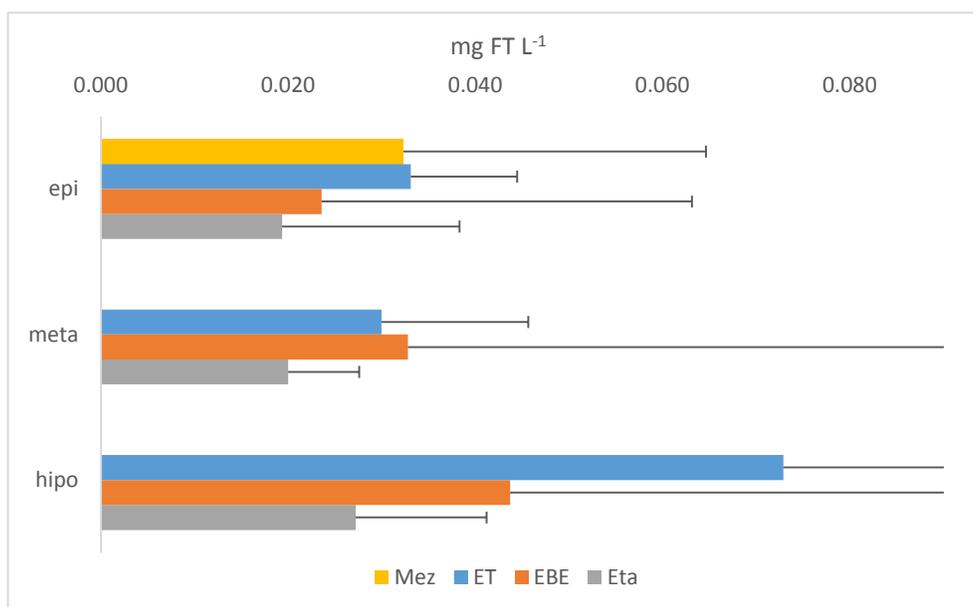


Figura 21. Concentraciones promedio de FT en mg L⁻¹ en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.

5.2.6. Silicatos (SiO₄)

La Preciosa

Las concentraciones promedio de la mezcla el SiO₄ presentó concentraciones promedio (22.078±3.140 mg L⁻¹) a través de la columna de agua.

La estratificación temprana presentó concentraciones promedio de SiO₄ (29.620±21.196 mg L⁻¹) con una concentración máxima de 67.90 mg L⁻¹ en el hipolimnion y un mínimo de 5.90 mg L⁻¹ en el epilimnion.

Durante la estratificación bien establecida las concentraciones promedio de SiO₄ (26.845±20.979 mg L⁻¹) con un máximo de 87.38 mg L⁻¹ y un mínimo de 0.90 mg L⁻¹ ambos en el hipolimnion.

En la estratificación tardía la concentración promedio de SiO₄ (34.192±21.196 mg L⁻¹) con un máximo de 35.42 mg L⁻¹ en el hipolimnion y un mínimo de 31.40 mg L⁻¹ en el epilimnion. (Fig. 22).

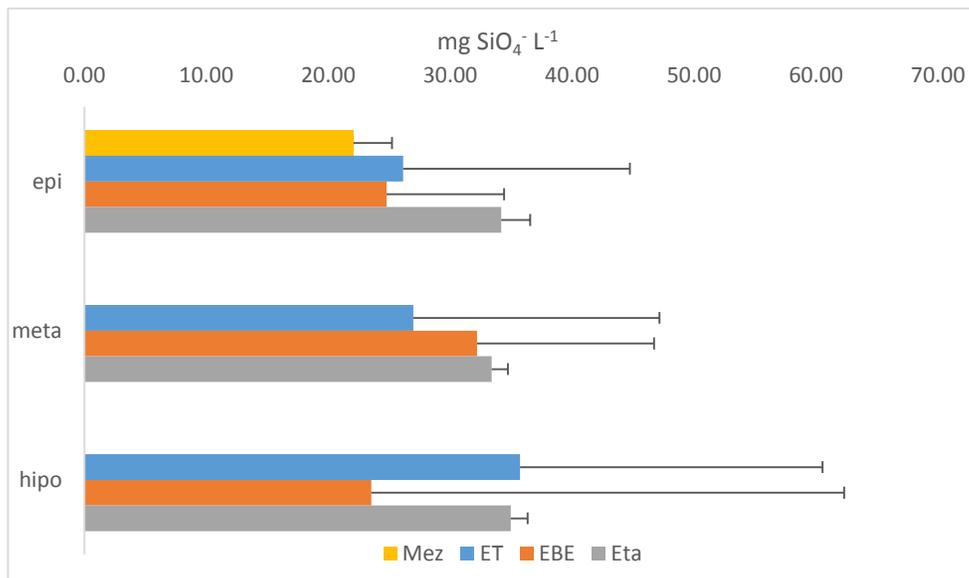


Figura 22. Concentraciones promedio de SiO₄ en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.

Atexcac

En el periodo de mezcla las concentraciones promedio fueron (55.592±6.469 mg L⁻¹) siendo homogéneas a través de la columna de agua.

Durante la estratificación temprana la concentración promedio de SiO₄ fue (30.851±16.925 mg L⁻¹) con un máximo de 49.50 mg L⁻¹ en el hipolimnion y un mínimo de 7.00 mg L⁻¹ en el epilimnion.

En la estratificación bien establecida la concentración promedio fue (38.386±13.395 mg L⁻¹) con un máximo de 52.21 mg L⁻¹ y un mínimo de 2.00 mg L⁻¹ ambos en el metalimnion.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio (60.345±3.555 mg L⁻¹) con un máximo de 68.38 mg L⁻¹ en el epilimnion y un mínimo de 55.93 mg L⁻¹ en el hipolimnion. (Fig. 23).

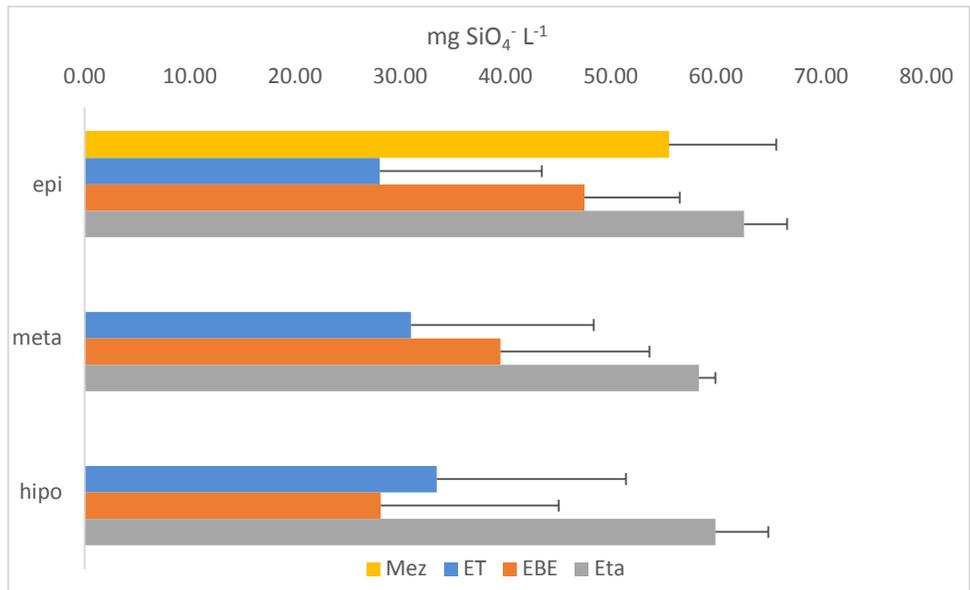


Figura 23. Concentraciones promedio de SiO_4 en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.

5.2.7. Sulfatos (SO_4)

La Preciosa

En la etapa de mezcla las concentraciones promedio fueron ($60.853 \pm 5.294 \text{ mg L}^{-1}$) con un máximo de 77.90 mg L^{-1} y un mínimo de 56.09 mg L^{-1} .

Durante la estratificación temprana la concentración promedio fue ($39.598 \pm 12.227 \text{ mg L}^{-1}$) con un máximo de 61.37 mg L^{-1} y un mínimo de 25.24 mg L^{-1} ambos en el metalimnion.

En la estratificación bien establecida la concentración promedio fue de ($37.024 \pm 3.908 \text{ mg L}^{-1}$) con un máximo de 45.95 mg L^{-1} en el epilimnion y un mínimo de 30.92 mg L^{-1} en el metalimnion.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio de ($42.102 \pm 4.306 \text{ mg L}^{-1}$) con un máximo de 47.81 mg L^{-1} en el epilimnion y un mínimo 24.81 mg L^{-1} en el hipolimnion. (Fig. 24).

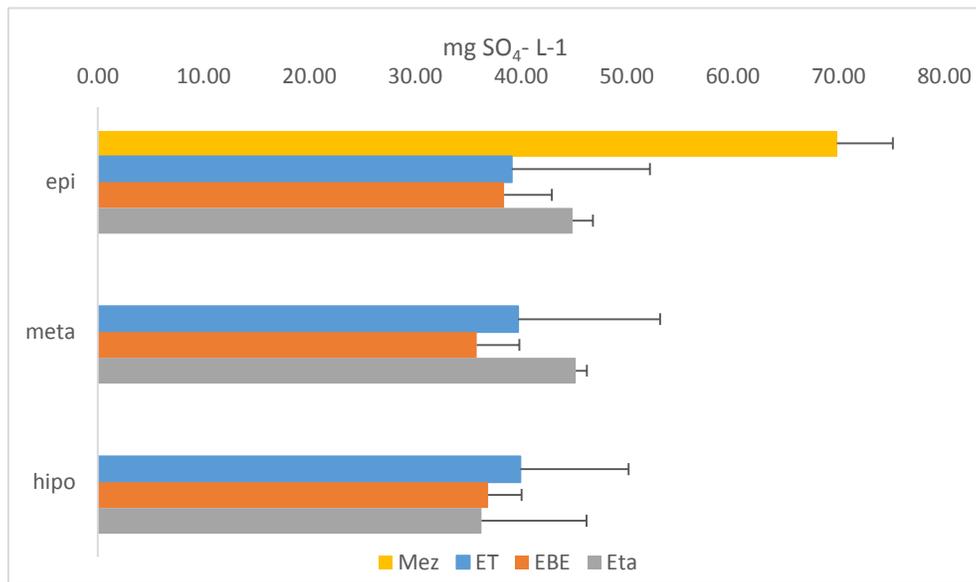


Figura 24. Concentraciones promedio de SO₄ en el lago La Preciosa durante las fases hidrodinámicas.

Atexcac

En el periodo de mezcla las concentraciones promedio fueron de (84.667±15.861 mg L⁻¹) con un máximo de 111.92 mg L⁻¹ y un mínimo de 60.25 mg L⁻¹ a través de la columna de agua.

Durante la estratificación temprana la concentración promedio fue (90.640±16.417 mg L⁻¹) con un máximo de 116.08 mg L⁻¹ y un mínimo de 58.02 mg L⁻¹ ambos en el epilimnion.

La estratificación bien establecida presentó una concentración promedio (96.858±14.135 mg L⁻¹) con un máximo de 137.26 mg L⁻¹ en el hipolimnion y un mínimo de 66.52 mg L⁻¹ en el metalimnion.

La estratificación tardía presentó una concentración promedio (108.693±7.666 mg L⁻¹) y un máximo de 128.00 mg L⁻¹ en el epilimnion y un mínimo de 97.16 mg L⁻¹ en el hipolimnion. (Fig. 25).

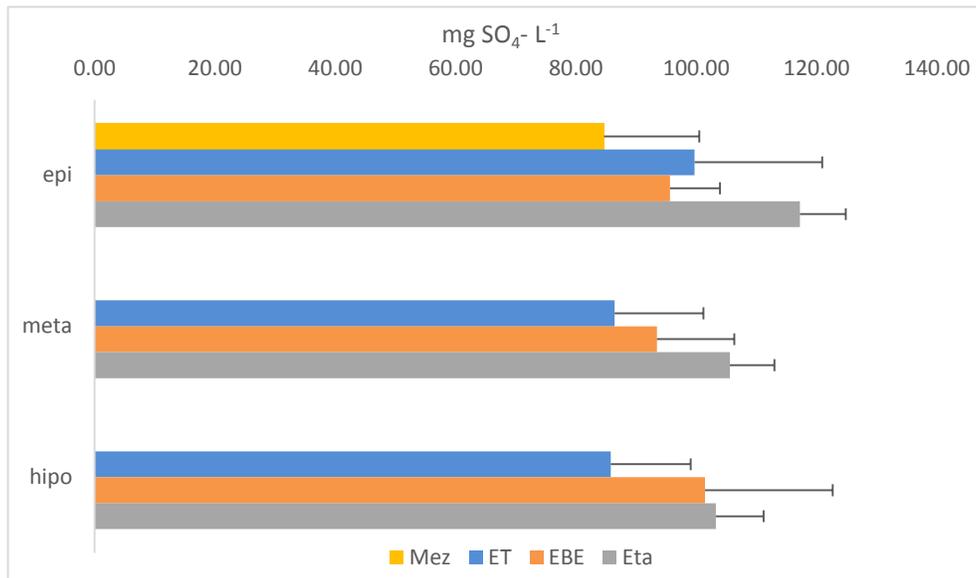


Figura 25. Concentraciones promedio de SO₄⁻ en el lago Atexcac durante las fases hidrodinámicas.

5.3. Parámetros Biológicos.

5.3.1 Productividad Primaria.

Las diferentes fases de la columna de agua se asocian a través de la penetración de la luz para la producción de fotosíntesis; esto genera tres partes bien delimitadas. La zona eufótica (Zeuf); donde hay una mayor fotosíntesis y sobra oxígeno, siendo el límite superior, la zona de compensación (Zcomp); donde hay una producción de oxígeno igual a su consumo inferior a los 15 m de profundidad aproximadamente y la zona afótica (Zafo); donde la respiración supera a la fotosíntesis elemento que se limita conforme avanza la profundidad en los lagos respectivamente.

Los cálculos de productividad primaria bruta (PB), respiración (R) y productividad neta (PN) fueron realizados de acuerdo con Badillo *et al.*, (2010).

La Preciosa

Durante el periodo de mezcla que abarca los meses de principios de enero a finales de marzo la zona eufótica se encontró hasta los 15 m de profundidad (Tabla. 1). Los valores promedio de PB oscilaron entre $89.55 \pm 55.72 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ doblemente mayor que la R promedio con valores que fueron de $44.60 \pm 11.53 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ fluctuando ligeramente a través de la columna de agua y la PN promedio $71.16 \pm 76.67 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ su comportamiento fue similar a la PB, ambas fueron disminuyendo hacia la zona afótica de la columna de agua.

En el periodo de estratificación temprana que abarca los meses de principios de abril a finales de junio la Zeuf se encontró hasta los 13 m de profundidad. La PB promedio fue de

49.05±28.86 mg m⁻³ d⁻¹ menor casi una tercera parte que la R promedio con valores que oscilan de 162.56±200.80 mg m⁻³ d⁻¹ y la PN promedio entre 57.36±52.04 mg m⁻³ d⁻¹ con valores constantes a través de la columna de agua.

En la estratificación bien establecida que abarca los meses de principios de julio a finales de septiembre la Zeuf se encontró hasta los 15 m de profundidad. La PB promedio tuvo valores de 41.88±10.79 mg m⁻³ d⁻¹ mientras que la R promedio oscilo en los valores de 44.08±15.34 mg m⁻³ d⁻¹ y la PN promedio fue entre de 54.36±20.41 mg m⁻³ d⁻¹ con bajas diferencias entre los estratos de la columna de agua.

La estratificación tardía que abarca los meses de principios de octubre a finales de noviembre la Zeuf se encontró hasta los 23 m de profundidad. La PB promedio van de 69.09±30.04 mg m⁻³ d⁻¹ mientras que la R promedio fue menor con valores que oscilan de 29.34±10.34 mg m⁻³ d⁻¹ y la PN promedio fue de 55.27±27.82 mg m⁻³ d⁻¹ (Fig. 26).

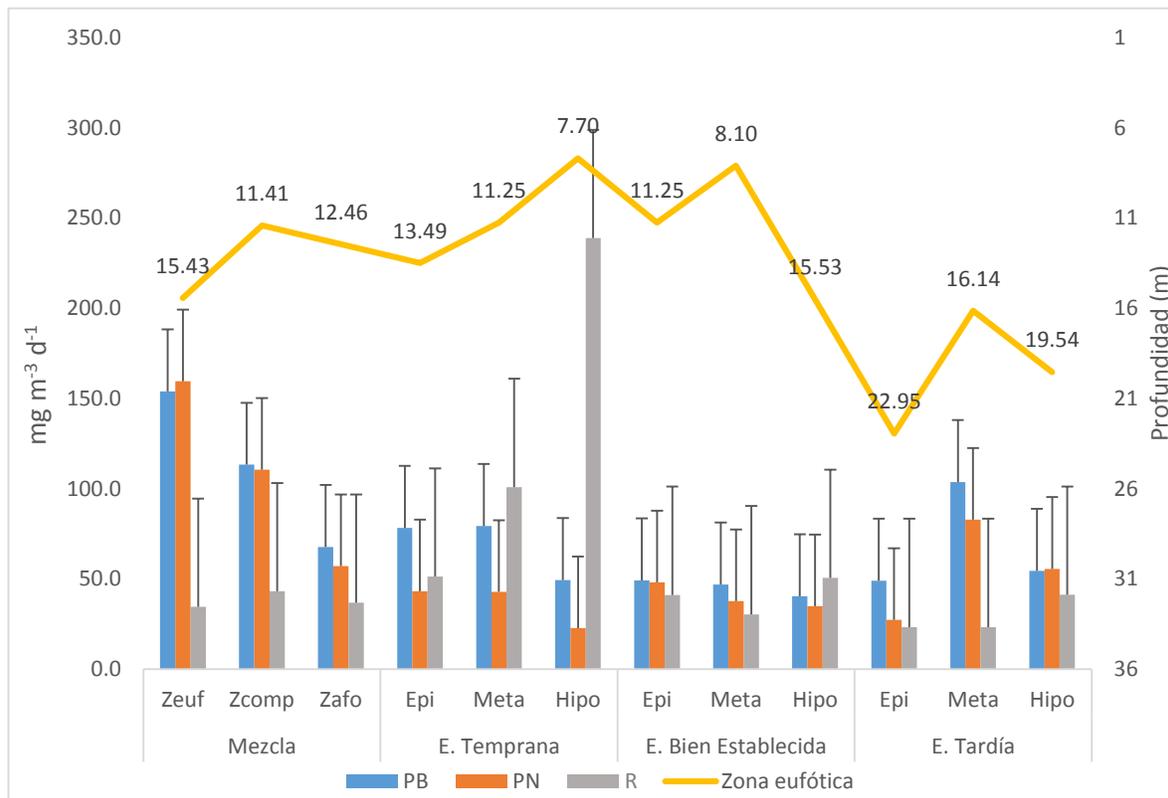


Figura 26. Concentraciones promedio de productividad primaria bruta (PB), respiración (R) y productividad neta (PN) en mg m³ d⁻¹ y ubicación de la zona eufótica en el lago La Preciosa durante el ciclo anual.

Atexcac

Durante el periodo de mezcla que abarca los meses de principios de enero a finales de marzo (Tabla. 2), la Zeuf se encontró hasta los 20 m de profundidad. La PB promedio de $83.18 \pm 72.11 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mayor a la R promedio de $69.94 \pm 86.88 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ en la PN promedio $16.93 \pm 14.75 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ a través de la columna de agua.

En el periodo de la estratificación temprana que abarca los meses de principios de abril a finales de junio la zona eufótica se encontró hasta los 10 m de profundidad. La PB promedio fue de $105 \pm 28.52 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mientras que la R promedio fue de $45 \pm 25.35 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ y la PN promedio con valores de $39.53 \pm 12.66 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

La estratificación bien establecida que va de principios de julio a finales de septiembre la zona eufótica se encontró hasta los 15 m de profundidad. La PB promedio fluctuó $41.93 \pm 15.93 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mayor en los estratos que la R promedio que osciló entre $35.92 \pm 10.82 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ y la PN promedio con valores de $30.54 \pm 13.77 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

La estratificación tardía que abarca los meses de principios de octubre a finales de noviembre la zona eufótica se encontró hasta los 13 m de profundidad. La PB promedio va de $210 \pm 192 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mientras que en la R promedio osciló entre $230 \pm 232 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ y la PN con valores que van de $73.31 \pm 56.91 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ siendo el metalimnion con los niveles más bajos de la columna de agua. (Fig. 27).

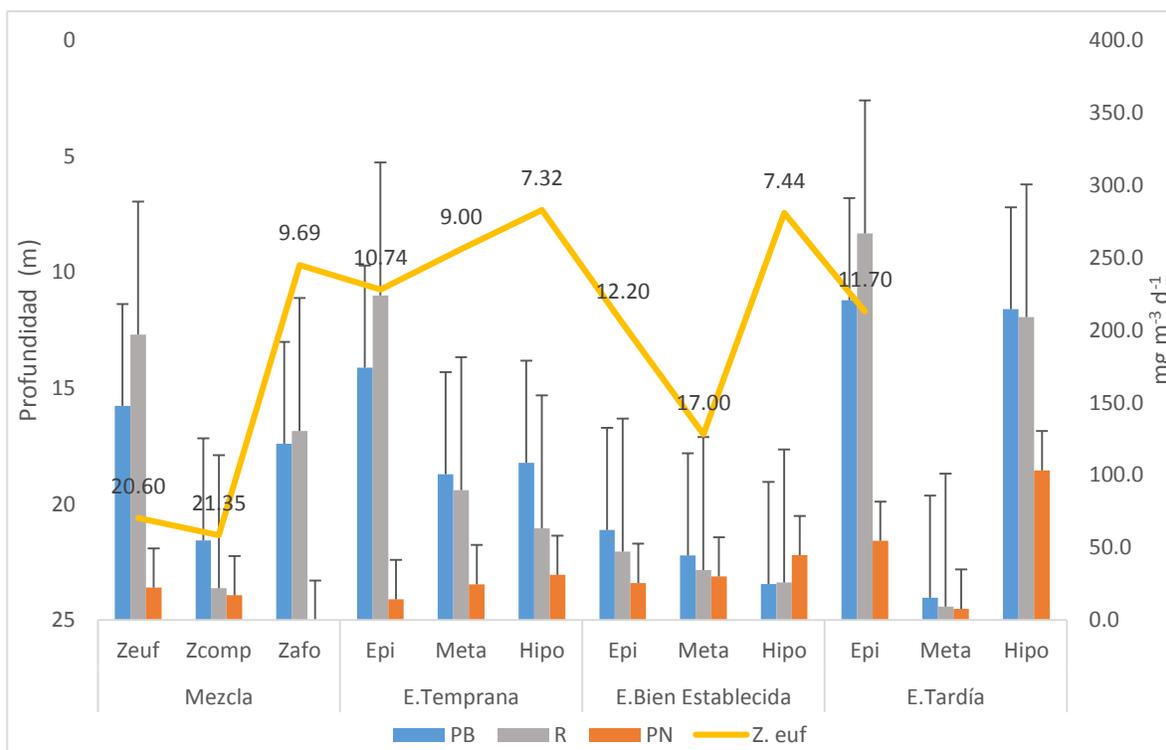


Figura 27. Concentraciones promedio de productividad primaria bruta (PB), respiración (R) y productividad neta (PN) en $\text{mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ubicación de la zona eufótica en el lago Atexcac durante el ciclo anual

5.3.2 Clorofila a

Se realizaron diagramas de profundidad-tiempo de isopletas para la concentración de clorofila a calculado en $\mu\text{g L}^{-1}$ (método 44.0 Arar & Collins, 1997) el promedio de cada uno de los periodos y en cada estrato (epilimnion, metalimnion e hipolimnion) de la columna de agua abarcando la mezcla del año siguiente para completar el ciclo anual para ambos lagos (Figs. 28 y 29).

La Preciosa

En el periodo de mezcla la concentración mínima de chl a fue de $0.35 \mu\text{g L}^{-1}$, mientras que el valor máximo fue de $2.51 \mu\text{g L}^{-1}$ y el valor promedio del periodo fue de $1.18 \pm 0.68 \mu\text{g L}^{-1}$.

Durante la estratificación temprana la concentración de chl a mínima fue de $0.27 \mu\text{g L}^{-1}$ en el hipolimnion, mientras que el valor máximo fue de $2.12 \mu\text{g L}^{-1}$ y los valores promedio del periodo fueron de $0.86 \mu\text{g L}^{-1}$ en el hipolimnion hacia el epilimnion de $1.05 \pm 0.58 \mu\text{g L}^{-1}$.

En la estratificación bien establecida la concentración de chl a mínima fue de $0.41 \mu\text{g L}^{-1}$ en el metalimnion, mientras que el valor máximo fue de $3.53 \mu\text{g L}^{-1}$ en el hipolimnion y los valores promedio de éstos fueron de 0.56 a $2.15 \pm 0.31 \mu\text{g L}^{-1}$.

La estratificación tardía registró una concentración de chl a mínima de $0.87 \mu\text{g L}^{-1}$ en el metalimnion, mientras que el valor máximo fue de $3.09 \mu\text{g L}^{-1}$ epilimnion y los valores promedio de éstos fueron de 1.09 a $1.84 \pm 0.84 \mu\text{g L}^{-1}$. (Fig. 28).

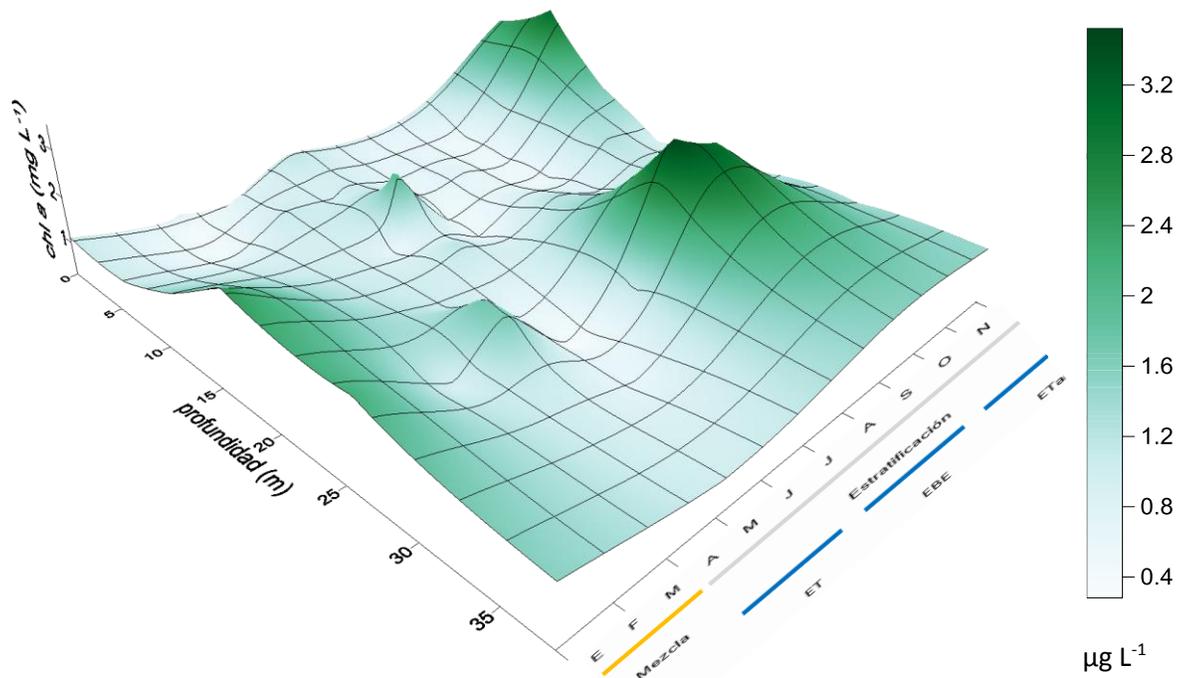


Figura 28. Distribución profundidad-tiempo 3D de la concentración de clorofila a en $\mu\text{g L}^{-1}$ del lago La Preciosa.

Atexcac

En el periodo de mezcla la concentración mínima de chl *a* fue de $0.28 \mu\text{g L}^{-1}$, mientras que el valor máximo fue de $5.54 \mu\text{g L}^{-1}$ y el valor promedio fue de $1.29 \pm 1.32 \mu\text{g L}^{-1}$.

Durante la estratificación temprana la concentración de chl *a* mínima fue de $0.48 \mu\text{g L}^{-1}$ en el metalimnion del mes de junio, mientras que el valor máximo fue de $1.97 \mu\text{g L}^{-1}$ en el metalimnion del mes de mayo y los valores promedio fueron de 0.69 a $1.29 \pm 0.47 \mu\text{g L}^{-1}$.

En la estratificación bien establecida la concentración de chl *a* mínima fue de $0.35 \mu\text{g L}^{-1}$ en el epilimnion, mientras que el valor máximo fue de $1.79 \mu\text{g L}^{-1}$ en el metalimnion y los valores promedio fueron de 0.39 a $1.03 \pm 0.55 \mu\text{g L}^{-1}$.

La estratificación tardía registró una concentración de chl *a* mínima de $0.33 \mu\text{g L}^{-1}$ en el epilimnion, mientras que el valor máximo fue de $9.9 \mu\text{g L}^{-1}$ en el hipolimnion y los valores promedio fueron de $0.47 \pm 0.135 \mu\text{g L}^{-1}$. (Fig. 29).

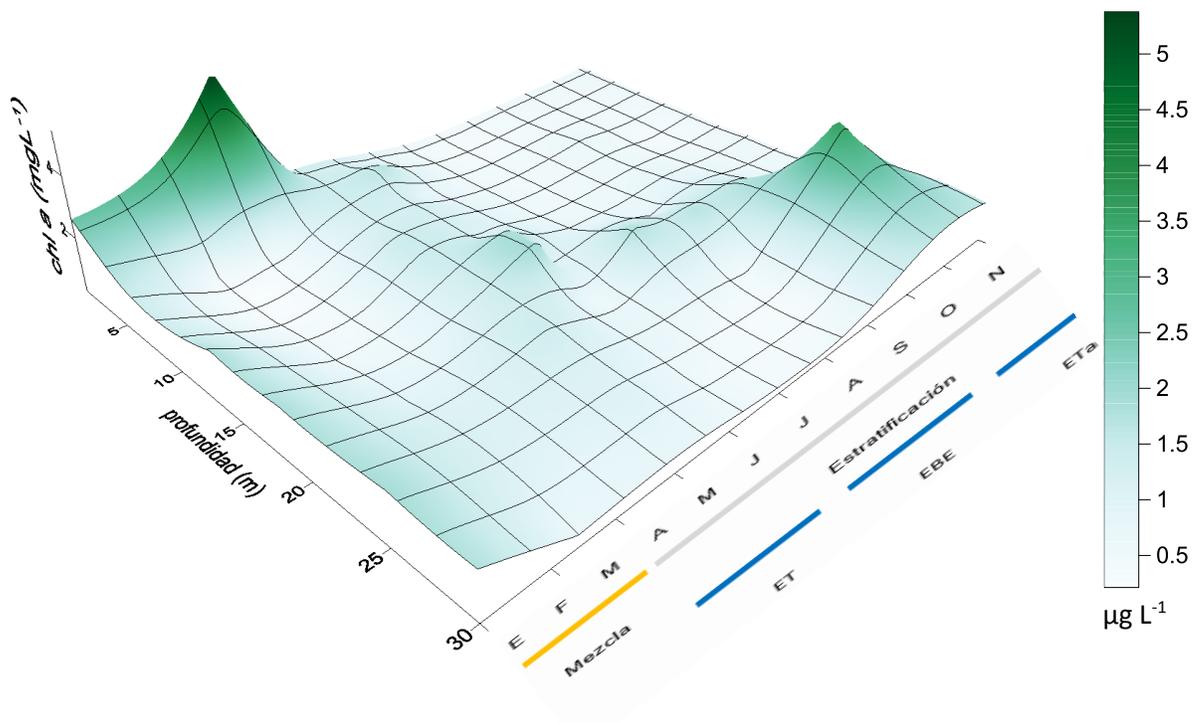


Figura 29. Distribución profundidad-tiempo 3D de la concentración de clorofila *a* en $\mu\text{g L}^{-1}$ del lago Atexcac.

5.3.3 Valores de clorofila a y productividad primaria bruta.

Al graficar los valores de chl a comparados con la productividad primaria bruta, los valores variaron ampliamente uno con respecto al otro parámetro, ya que las unidades de medición son diferentes, que pueden dar interpretaciones y patrones del comportamiento de la variación hidrodinámica durante el periodo de estudio para ambos lagos.

La fotosíntesis bruta se refiere a la verdadera síntesis bruta de la materia orgánica desde que es expuesta hacia la luz. Ésta es igual a la productividad neta O_2 en desarrollo + O_2 usado en la respiración.

La comparación de ambos parámetros permite hacer una mejor interpretación de ambos parámetros asociados con la dinámica de los productores primarios.

La Preciosa

Se registraron concentraciones más altas de chl a en los periodos de mezcla, estratificación temprana teniendo valores de 8.46 a 8.40 $\mu\text{g chl a m}^{-2}$ respectivamente ésta última asociada al metalimnion.

Los valores de productividad bruta (PB) durante la mezcla la concentración más alta fue de 2.22 $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$ y durante la estratificación bien establecida se presentó el valor más bajo 0.49 $\text{mg C m}^{-3} \text{d}^{-1}$ fluctuando poco a lo largo del periodo de estudio. (Fig. 30)

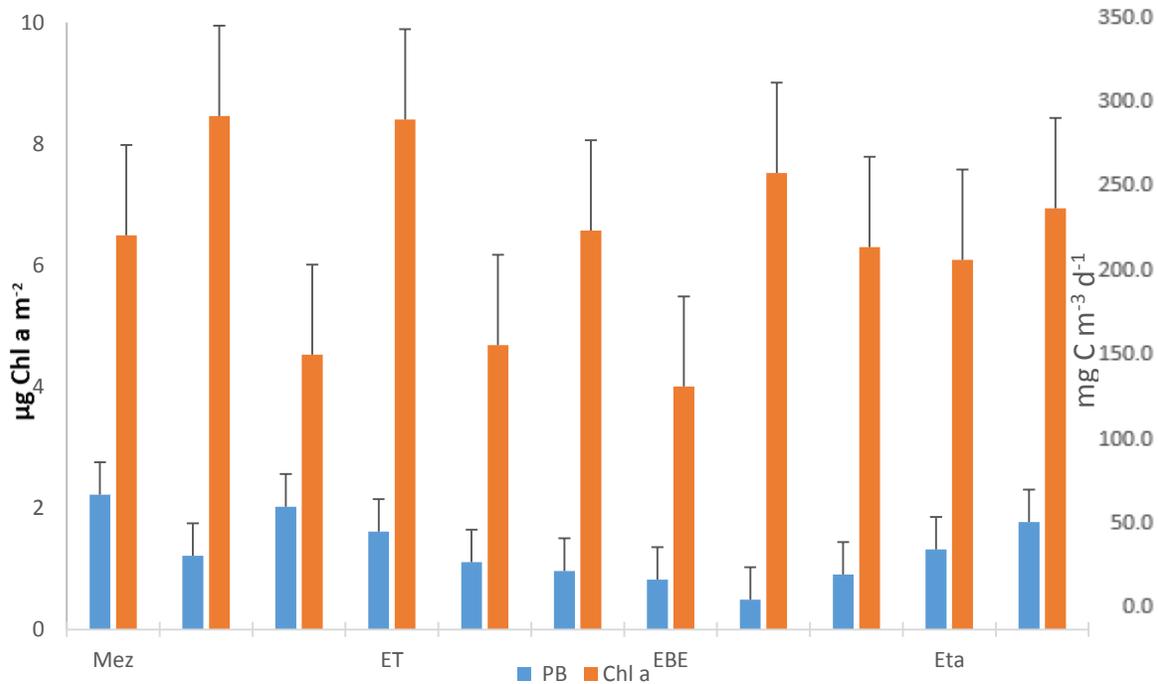


Figura 30. Valores de clorofila a y productividad primaria bruta en el lago La Preciosa.

Atexcac

Se registraron concentraciones más altas de Chl a en el periodo de mezcla y la estratificación temprana teniendo valores de $44.96 \pm 33.27 \mu\text{g chl a m}^{-2}$ respectivamente, ésta última asociada al metalimnion.

Los valores de productividad bruta (PB) durante la estratificación temprana y la estratificación tardía registraron las concentraciones más altas $2.77 \pm 4.16 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ y durante la estratificación bien establecida se presentó el valor más bajo $0.57 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. (Fig. 31).

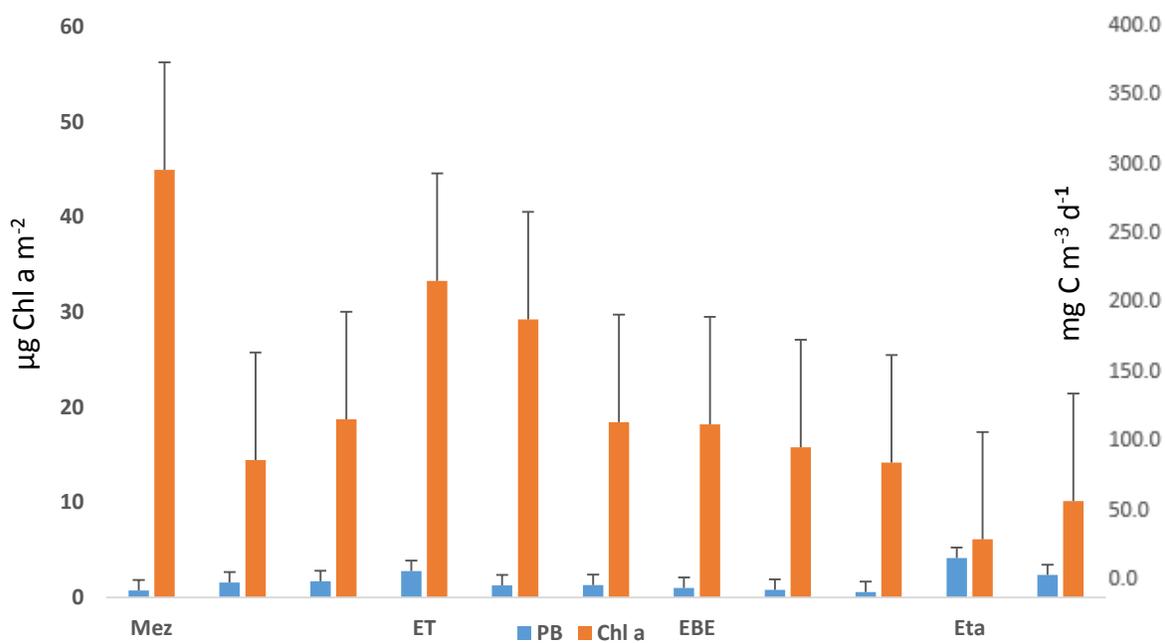


Figura 31. Valores integrados de clorofila a y productividad primaria bruta en el lago Atexcac.

5.4. Análisis estadísticos

5.4.1. Análisis estadístico paramétrico

Los parámetros físicos y químicos como: el pH, la conductividad eléctrica, la alcalinidad total, durezas y los nutrientes, así como: parámetros biológicos: clorofila a y productividad se analizaron con pruebas de ANOVA con ayuda del programa *Statgraphic's Centurion* X.V.I. 2009. Versión 16.1.11 con la finalidad de analizar su relación y variabilidad espacio-temporal durante un ciclo anual.

La Preciosa

En el pH se encontraron diferencias significativas entre las diferentes etapas hidrodinámicas ($F_{(3,69)} = 23,15$, $p < 0.05$) de acuerdo con la prueba estadística de Tukey entre las etapas hidrodinámicas, EBE-MEZ, EBE-Eta y ET-MEZ (Fig. 32).

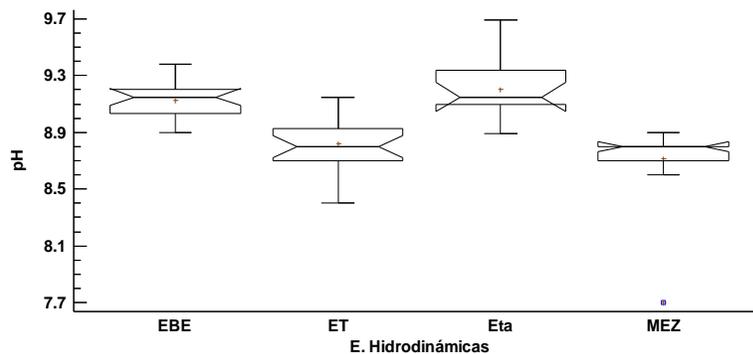


Figura 32. Diagrama de caja con muesca de la concentración de pH a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

Por otra parte, la conductividad eléctrica no presentó diferencias significativas entre las etapas hidrodinámicas ($F_{(3,69)} = 2.08$, $p \geq 0.05$) (Fig. 33).

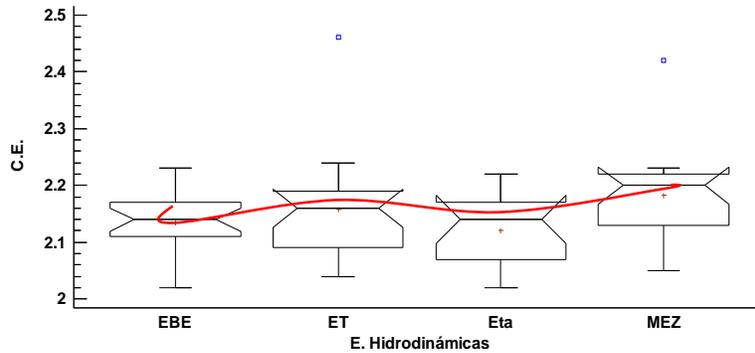


Figura 33. Diagrama de caja con muesca de la concentración de C.E. a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

Para la alcalinidad de carbonato (CO_3^{2-}) se encontraron diferencias significativas ($F_{(3,73)} = 2.61$, $p \geq 0.05$), de acuerdo con el análisis estadístico de Tukey entre las etapas hidrodinámicas de EBE-Eta, EBE-ET, ET-Eta y Eta-MEZ (Fig. 34).

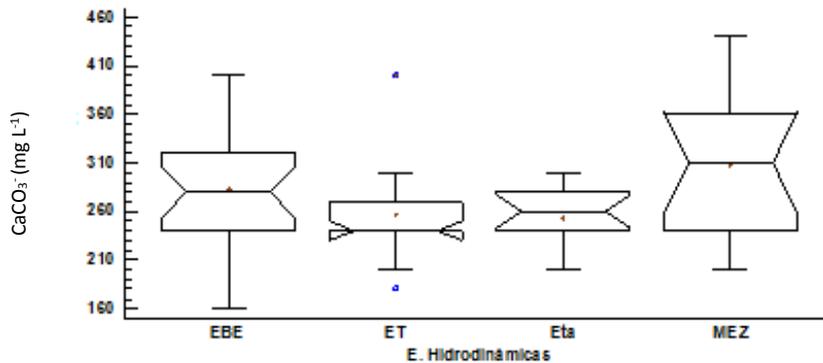


Figura 34. Diagrama de caja con muesca de la concentración de CO_3^{2-} a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

La alcalinidad de bicarbonatos (HCO_3^-) presentaron diferencias significativas ($F_{(3,73)} = 2.02, p \geq 0.05$) entre las etapas hidrodinámicas EBE-ET, Eta-MEZ y ET-MEZ, con un nivel de confianza del 95% (Fig. 35).

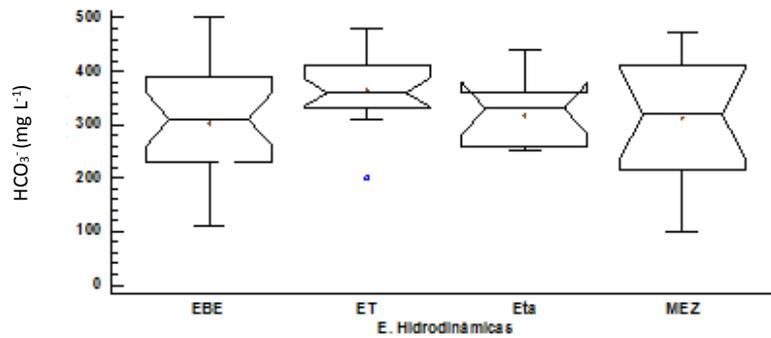


Figura 35. Diagrama de caja con muesca de la concentración HCO_3^- de a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

La dureza de calcio (CaCO_3) presentó diferencias significativas ($F_{(3,73)} = 4.98, p < 0.05$). De acuerdo con la prueba de Tukey en tres de las etapas hidrodinámicas ET-Eta, Eta-MEZ y EBE-MEZ con un nivel de confianza del 95% durante el periodo de estudio (Fig. 36).

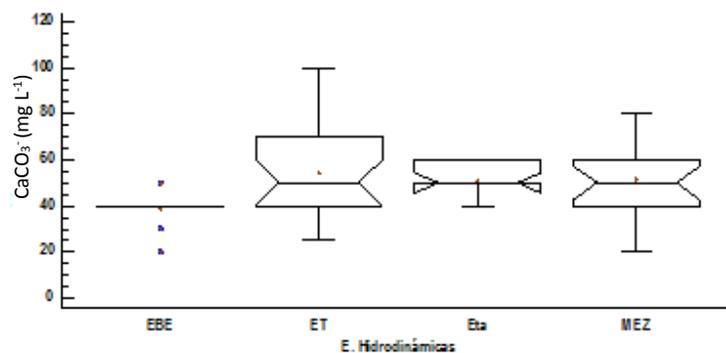


Figura 36. Diagrama de caja con muesca de la concentración CaCO_3 de a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

El fósforo reactivo soluble (PO_4^{3-}) no presentó diferencias significativas ($F_{(3,83)} = 0.88$, $p \leq 0.05$) entre las concentraciones y las diferentes etapas hidrodinámicas (Fig. 37).

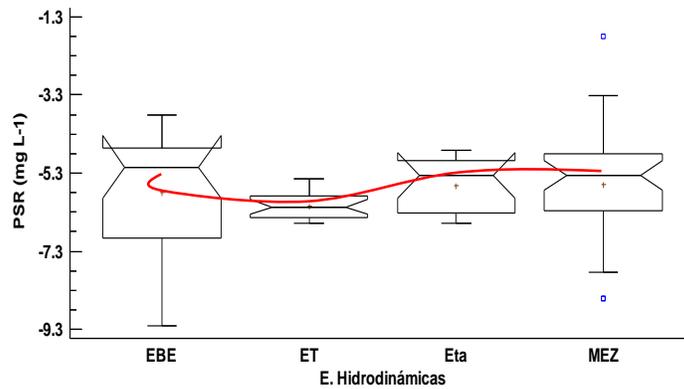


Figura 37. Diagrama de caja con muesca de la concentración de (PO_4^{3-}) a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

Para el fósforo total (FT) la prueba de ANOVA no encontró diferencias significativas ($F_{(3,77)} = 64.45$, $p < 0.05$) y de acuerdo con la prueba de Tukey si hubo diferencias entre las etapas hidrodinámicas EBE-MEZ, ET-MEZ, EBE-ET, EBE-Eta y ET-Eta, lo cual; rechaza la idea de que la dinámica de las concentraciones de FT provengan de una distribución normal con un nivel de confianza del 95% (Fig. 38).

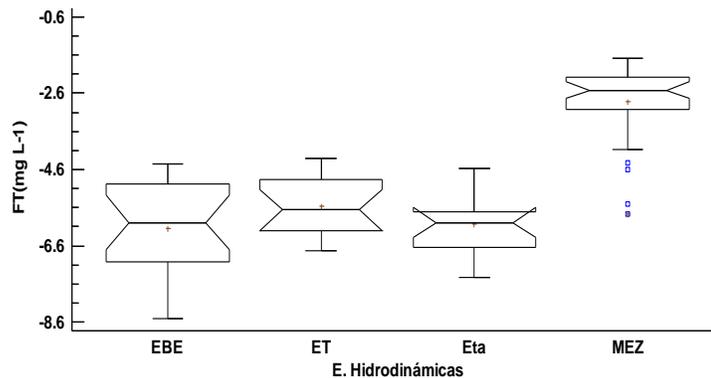


Figura 38. Diagrama de caja con muesca de la concentración de FT a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

En las concentraciones de los nitritos (NO_2^-) se observaron diferencias significativas ($F_{(3,75)} = 6.9$, $p < 0.05$). De acuerdo con la prueba de Tukey éstas se encontraron en las etapas hidrodinámicas EBE-MEZ, ET-Eta y ET-MEZ con un nivel de confianza del 95% (Fig. 39).

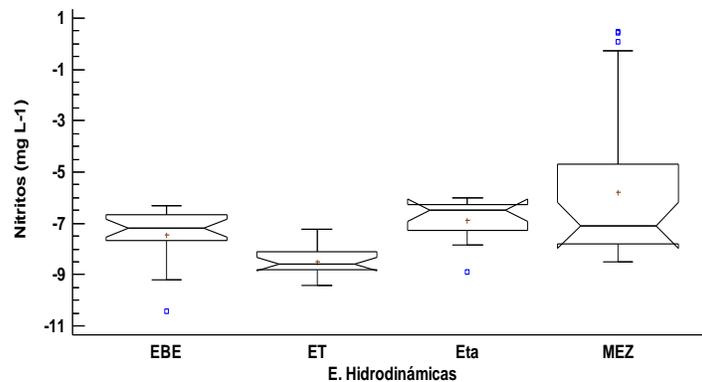


Figura 39. Diagrama de caja con muesca de la concentración de NO_2^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

Para los nitratos (NO_3^-) presentan diferencias significativas ($F_{(3,73)} = 19.94$, $p < 0.05$). De acuerdo con la prueba de Tukey, y se encontraron en las etapas hidrodinámicas EBE-Eta y ET-MEZ, con un nivel de confianza del 95% (Fig. 40).

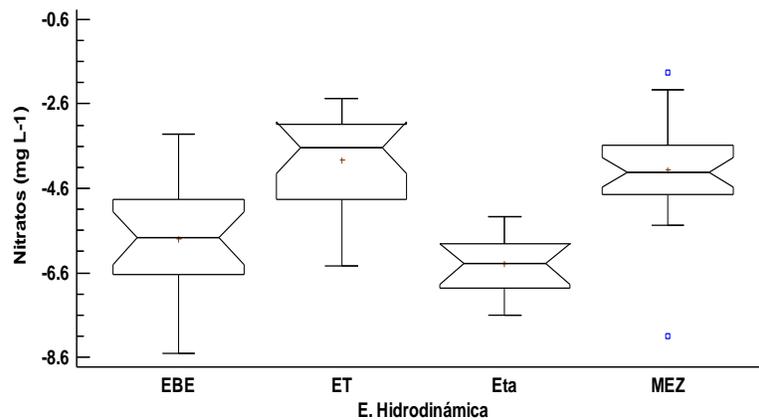


Figura 40. Diagrama de caja con muesca de la concentración de NO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

En el Amonio (NH_4^+) no mostró diferencias estadísticamente significativas ($F_{(3,83)} = 0.09$, $p \geq 0.05$) entre sus concentraciones y las etapas hidrodinámicas, por lo tanto; provienen de una distribución normal, con un nivel de confianza del 95% (Fig. 41).

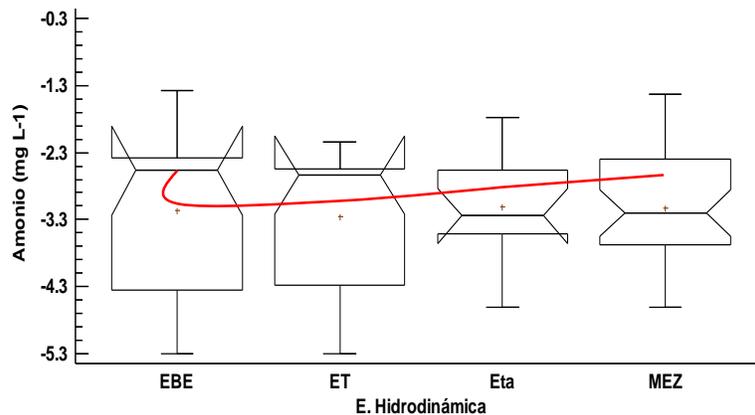


Figura 41. Diagrama de caja con muesca de la concentración de NH_4^+ a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

Los Silicatos (SiO_4) no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($F_{(3,85)} = 1.37$, $p \geq 0.05$) entre la concentración de SiO_4 y las etapas hidrodinámicas, por lo que provienen de una distribución normal con un nivel de confianza del 95% (Fig. 42).

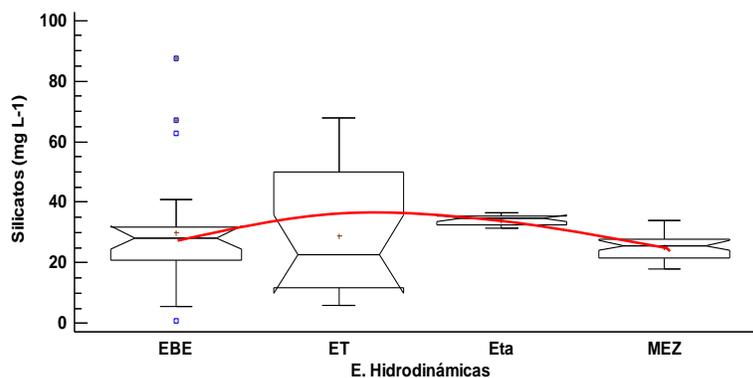


Figura 42. Diagrama de caja con muesca de la concentración de SiO_4 a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

En los sulfatos (SO_4) no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($F_{(3,79)} = 2.67, p \geq 0.05$) entre la concentración de SO_4 y las etapas hidrodinámicas, por lo que provienen de una distribución normal con un nivel de confianza del 95% (Fig. 43).

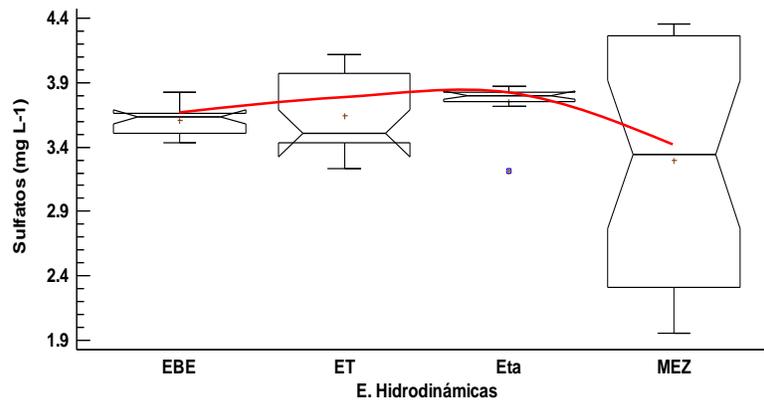


Figura 43. Diagrama de caja con muesca de la concentración de SO_4 a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa.

Atexcac

En el pH se encontraron diferencias significativas entre las diferentes etapas hidrodinámicas ($F_{(3,75)} = 12.17, p < 0.05$) de acuerdo con la prueba estadística de Tukey entre las etapas hidrodinámicas EBE-ET, EBE-MEZ y EBE-Eta con un nivel de confianza del 95% (Fig. 44).

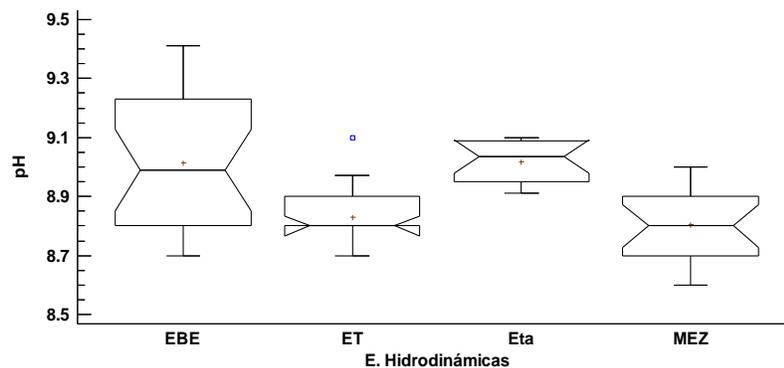


Figura 44. Diagrama de caja con muesca de la concentración pH a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

En la conductividad eléctrica, se encontraron diferencias significativas entre las etapas hidrodinámicas ($F_{(3,75)} = 7.60, p < 0.05$) de acuerdo con la prueba estadística de Tukey entre las etapas hidrodinámicas ET-MEZ con un nivel de confianza del 95% (Fig. 45).

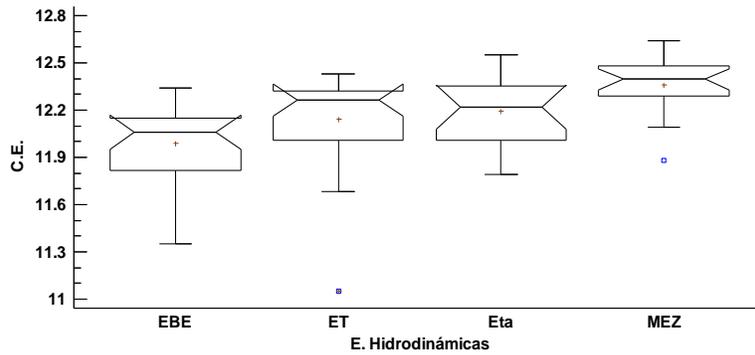


Figura 45. Diagrama de caja con muesca de la concentración C.E. a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

En la alcalinidad de carbonato (CaCO_3^-) se encontraron diferencias significativas ($F_{(3,75)} = 2.33, p > 0.05$), de acuerdo con la prueba estadística de Tukey entre EBE-Eta con un nivel de confianza del 95% (Fig. 46).

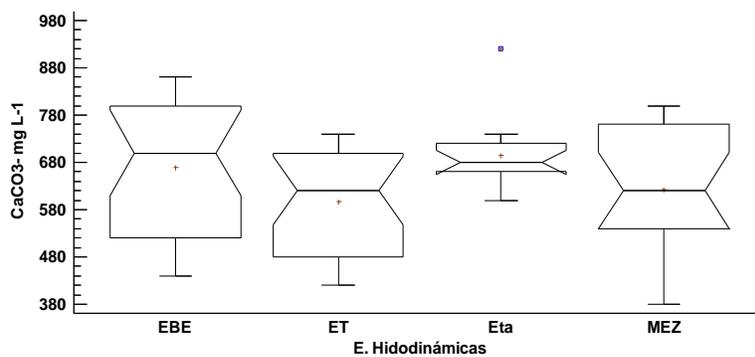


Figura 46. Diagrama de caja con muesca de la concentración CaCO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

Por otra parte, la alcalinidad de bicarbonatos (HCO_3^-), presentó diferencias significativas ($F_{(3,75)} = 3.02, p \leq 0.05$) de acuerdo con la prueba estadística de Tukey las diferencias se encontraron entre EBE-ET, EBE-Eta y Eta-MEZ con un nivel de confianza del 95% (Fig. 47).

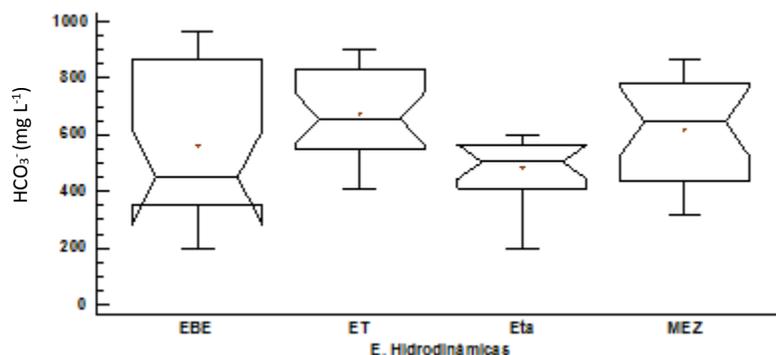


Figura 47. Diagrama de caja con muesca de la concentración HCO_3^- a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

La dureza de calcio (CaCO_3) presentó diferencias significativas ($F_{(3,75)} = 6.13, p < 0.05$). De acuerdo con el análisis de Tukey entre las etapas hidrodinámicas EBE-Eta, ET-MEZ y EBE-MEZ con un nivel de confianza del 95% (Fig. 48).

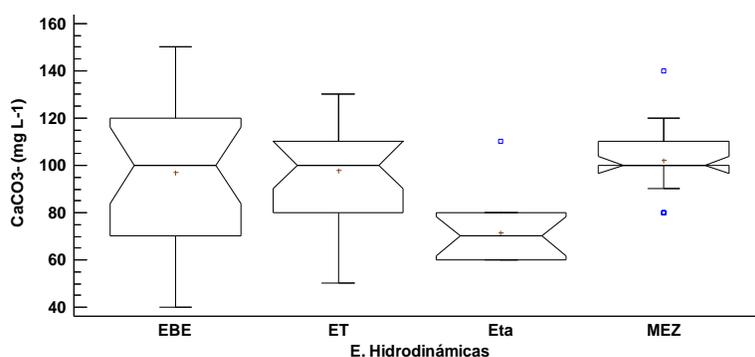


Figura 48. Diagrama de caja con muesca de la concentración CaCO_3 a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

El fósforo reactivo soluble (PO_4^{3-}) no presentó diferencias significativas ($F_{(3,75)} = 3.04$, $p \leq 0.05$) entre las concentraciones de PO_4^{3-} y las diferentes etapas hidrodinámicas (Fig. 49).

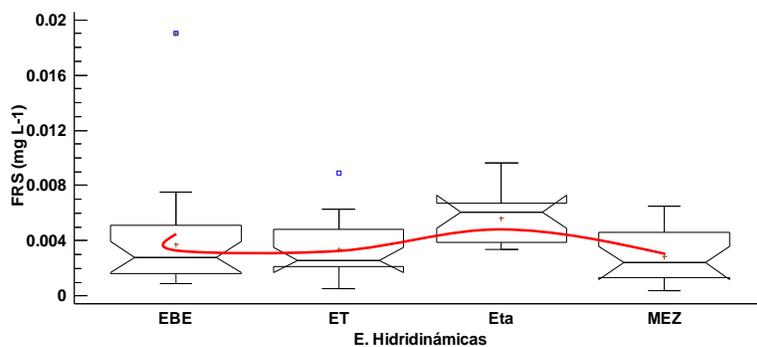


Figura 49. Diagrama de caja con muesca de la concentración PO_4^{3-} a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

En el fósforo total (FT) existieron diferencias significativas ($F_{(3,75)} = 5.18$, $p < 0.05$). Se utilizó la prueba de Tukey para corroborar en donde se encontraban las diferencias, por lo que la Eta-MEZ, ET-Eta y ET-MEZ eran diferentes con un nivel de confianza de 95% (Fig. 50).

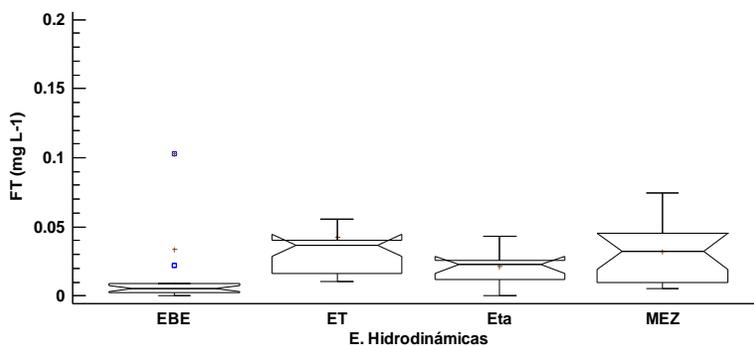


Figura 50. Diagrama de caja con bigotes de la concentración FT a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

Los nitritos (NO_2^-) muestran diferencias significativas entre las medias y las etapas hidrodinámicas ($F_{(3,75)} = 5.59$, $p < 0.05$) con un nivel de confianza del 95%. Se utilizó el análisis de Tukey para corroborar en donde se encontraban, lo cual; resultó entre las etapas hidrodinámicas Eta-ET, EBE-Eta y ET-MEZ con un nivel de confianza del 95% (Fig. 51).

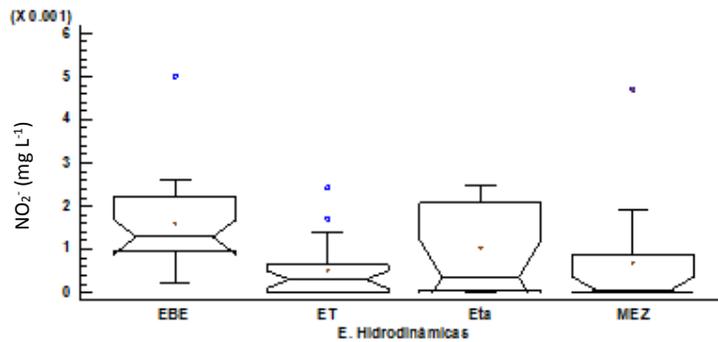


Figura 51. Diagrama de caja con muesca de la concentración (NO_2^-) a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

Para los nitratos (NO_3^-) hubo diferencias significativas ($F_{(3,75)} = 6.92$, $p < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey y éstas estuvieron en las etapas hidrodinámicas EBE-ET y ET-Eta que resultaron estadísticamente diferentes con un nivel de confianza del 95% (Fig. 52).

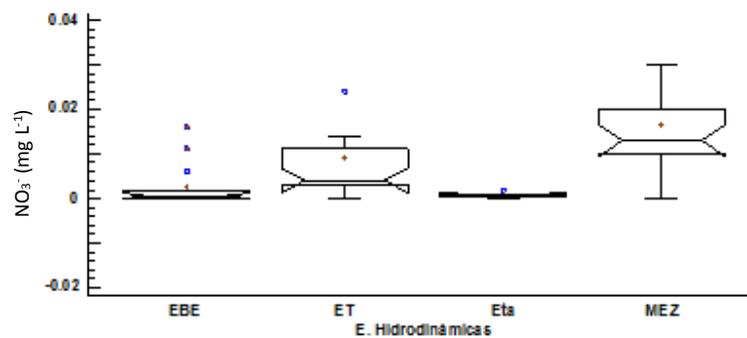


Figura 52. Diagrama de caja con muesca de la concentración (NO_3^-) a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

El amonio (NH_4^+) presentó diferencias estadísticamente significativas ($F_{(3,75)} = 3.21$, $p < 0.05$) entre las concentraciones de NH_4^+ en las diferentes etapas hidrodinámicas EBE-ET, EBE-Eta y ET-MEZ con un nivel de confianza del 95%. (Fig. 53).

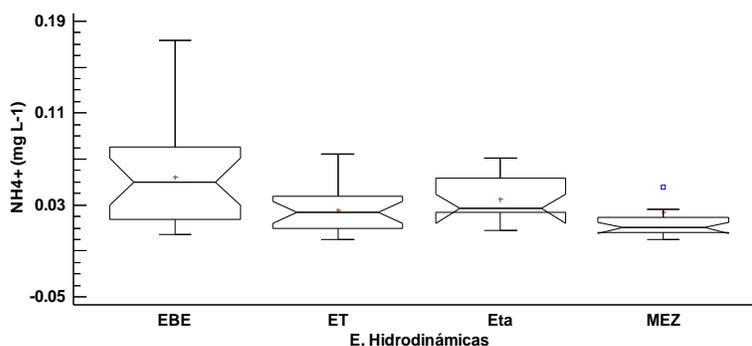


Figura 53. Diagrama de caja con muesca de la concentración (NH_4^+) a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

Los Silicatos (SiO_4) mostraron diferencias estadísticamente significativas ($F_{(3,75)} = 20.05$, $p < 0.05$) entre la concentración de SiO_4 y las etapas hidrodinámicas con un nivel de confianza del 95%. Se realizó la prueba de Tukey para saber dónde se encontraban las diferencias y éstas fueron entre EBE-ET y Eta-MEZ con un nivel de confianza del 95% (Fig. 54).

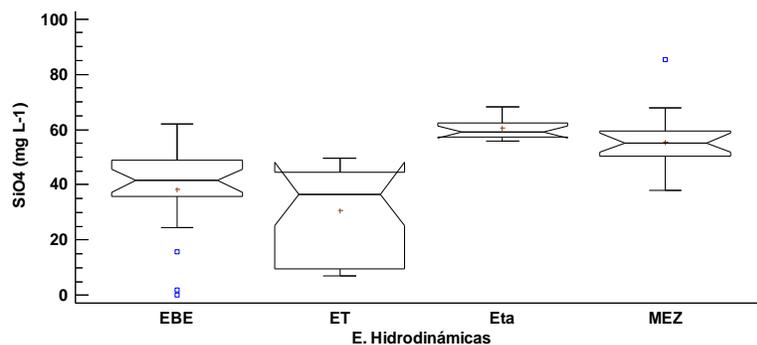


Figura 54. Diagrama de caja con muesca de la concentración (SiO_4) a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

En los sulfatos (SO_4) se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las medias ($F_{(3,75)} = 7.52, p < 0.05$), por lo tanto; la idea de una distribución normal. Con el análisis de Tukey mostró que las diferencias se presentaron en EBE-ET, ET-Eta, EBE-MEZ, ET-MEZ y ET-Eta, con un nivel de confianza del 95% (Fig. 55).

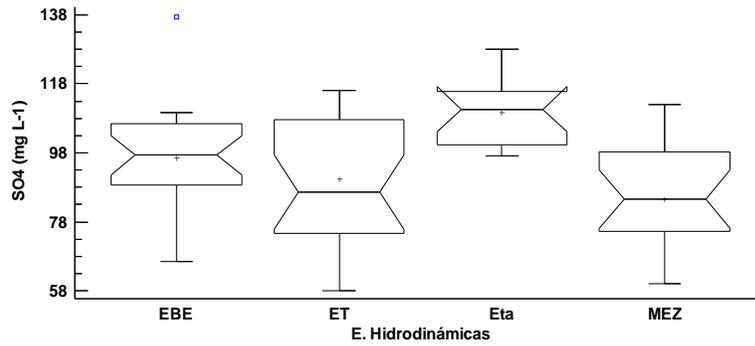


Figura 55. Diagrama de caja con muesca de la concentración (SO_4) a través de las diferentes etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

5.5. Análisis estadístico biológico.

5.5.1. Productividad primaria

La Preciosa

Para el análisis de la productividad primaria bruta (PB) no se encontraron diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($F_{(3,43)} = 0.0724$ $p \geq 0.05$) con un nivel de confianza del 95% entre las diferentes etapas hidrodinámicas del lago. De acuerdo con el diagrama de caja múltiples con muesca, no se observaron diferencias significativas ($p \geq 0.05$) entre la PB y las etapas hidrodinámicas con un nivel de confianza del 95% (Fig. 56).

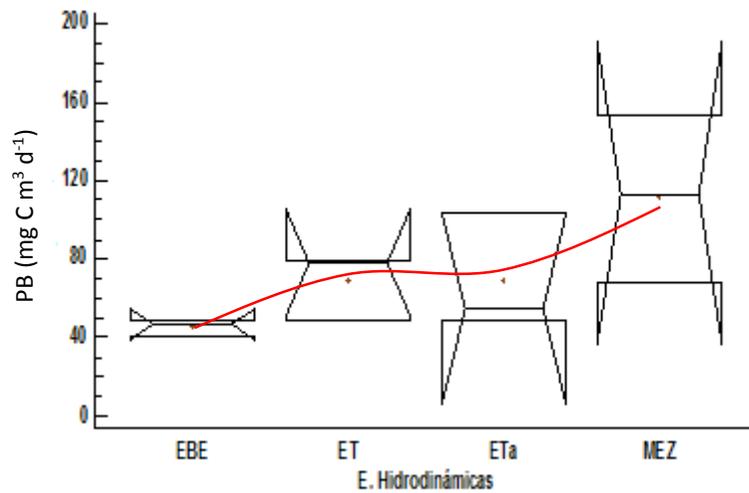


Figura 56. Diagrama de caja con muesca (Función pseudosigma $p=0.05$) de PB del lago La Preciosa.

Atexcac

La productividad primaria bruta (PB) se encontraron diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($F_{(3,48)} = 0.0856$, $p < 0.05$) con un nivel de confianza del 95%. De acuerdo con el diagrama de caja múltiple con muesca, se presentó dos diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre ET-MEZ y EBE-Eta con un nivel de significación de 5%. El resto de la estratificación térmica permanece sin diferencias (Fig. 57).

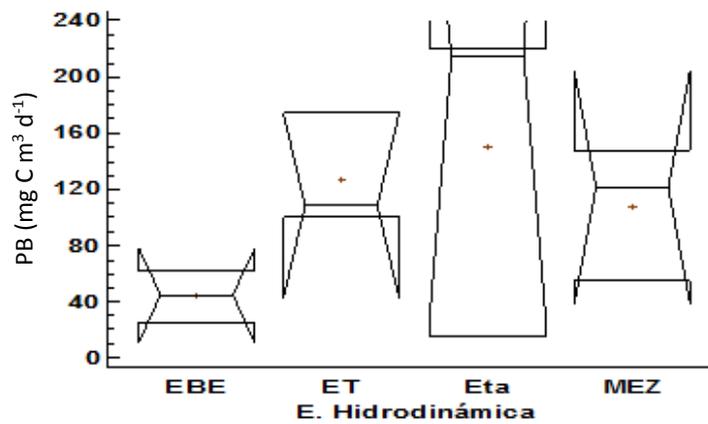


Figura 57. Diagrama de caja con muesca (Función pseudosigma $p=0.05$) de PB del lago Atexcac.

5.5.2. Clorofila a

La Preciosa

En las concentraciones de clorofila a se encontró que el valor de P-value 0.0835273 es $p \geq 0.05$; por lo tanto, no existe diferencia significativa entre las desviaciones estándar de la concentración promedio de clorofila a y las etapas hidrodinámicas, con un nivel de confianza del 95%, pero los diagramas de caja con muesca ($F_{(3,86)} = 0.012$, $p < 0.05$) muestran dos diferencias significativas entre las medianas ($p < 0.05$) entre EBE-ET y EBE-MEZ con un nivel de confianza del 95% (Fig. 58).

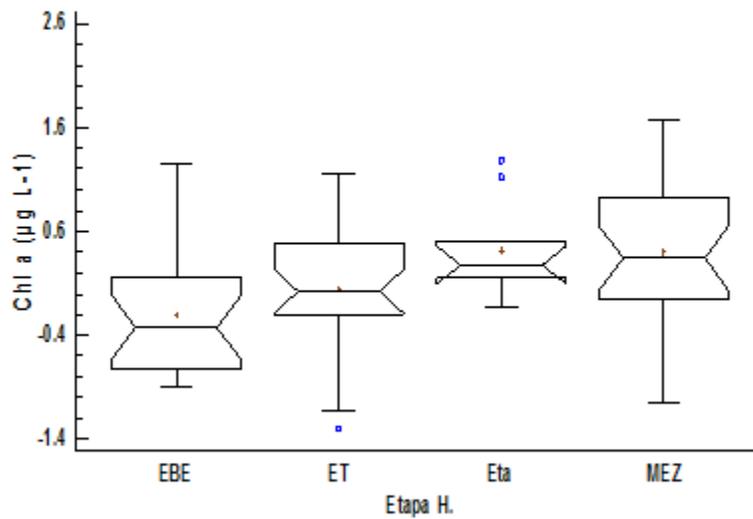


Figura 58. Diagrama de caja con muesca (función pseudosigma $p=0.05$) de la concentración de clorofila a a través de las diferentes etapas hidrodinámicas en el lago La Preciosa.

Atexcac

En las concentraciones de clorofila *a* se encontró que el valor de P-value 0.285451 es ≥ 0.05 , por lo que, no existieron diferencias significativas entre las desviaciones estándar de la concentración promedio de clorofila *a* y las etapas hidrodinámicas, con un nivel de confianza del 95%. Los diagramas de caja con muesca mostraron dos diferencias significativas entre las medianas ($F_{(3,75)} = 2.82$, $p < 0.05$) entre EBE-Eta y ET-MEZ con un nivel de confianza del 95% (Fig. 59).

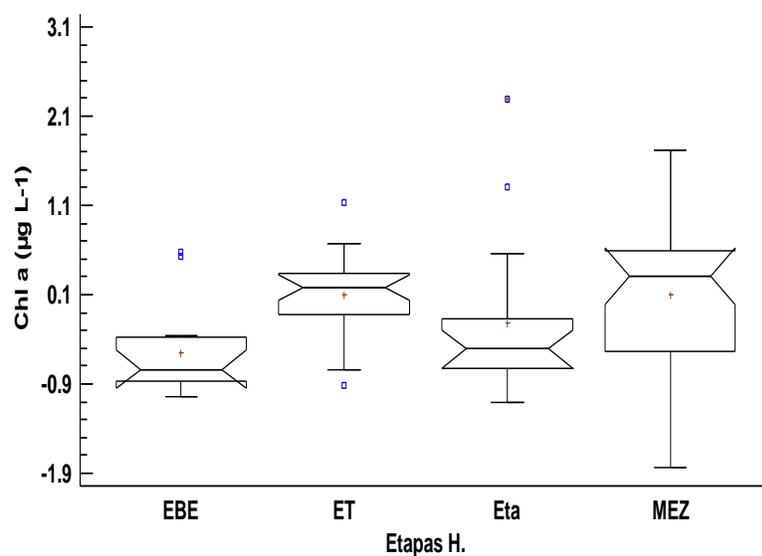


Figura 59. Diagrama de caja con muesca (función pseudosigma $p=0.05$) de la concentración de clorofila *a* a través de las diferentes etapas hidrodinámicas en el lago Atexcac.

5.5.3. Análisis de correlaciones pruebas paramétricas (Pearson) y no paramétricas (Spearman).

La Preciosa

Tabla 7. Correlación de Spearman entre variables biológicas y parámetros físicos y químicos del Lago La Preciosa, se omiten los valores que no presentaron ninguna significancia.

VARIABLES	FT	Mes	NITRATOS
PRE			
R	0.5578 (29) 0.0032	-0.5688 (29) 0.0026	0.4767 (25) 0.0195
	HCO₃⁻	Mes	
PB	0.4660 (25) 0.0224	-0.3715 (29) 0.0493	

Tabla 8. Correlación de Pearson entre variables biológicas y parámetros físicos y químicos del Lago La Preciosa, se omiten los valores que no presentaron ninguna significancia.

VARIABLES LOG	FSR	NITRITOS	SILICATOS
PRE			
R	-0.8510 (10) 0.0002	-0.3715 (29) 0.0493	0.6479 (13) 0.0166
	R		
PB	0.6604 (12) 0.0194		

Tabla 9. Correlación de Spearman entre variables biológicas y parámetros físicos y químicos en el Lago Atexcac, se omiten los valores que no presentaron ninguna significancia.

Variabes	Mes	Z	T	Nitritos
ATX				
Clor <i>a</i>	-0.3187 (45) 0.0345	0.4017 (45) 0.0077	-0.3349 (45) 0.0263	-0.0194 (62) 0.8811
	Amonio	Silicatos		
R	0.2958 (45) 0.0497	-0.3166 (45) 0.0357		
	FSR			
PB	0.3718 (45) 0.0137			

Atexcac

Tabla 10. Correlación de Pearson entre variables biológicas y parámetros físicos y químicos en el Lago Atexcac, se omiten los valores que no presentaron ninguna significancia.

Variabes LOG	R	FSR
ATX		
PB	0.5380 (20) 0.0144	0.4302 (43) 0.0040

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Parámetros físicos y químicos.

6.1.2. Temperatura.

En el periodo de estudio del año 2014 los perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto confirmaron el comportamiento de monomixis cálida para los lagos La Preciosa y Atexcac, previamente registrado por (Arellano y González, 2011; Marcos y Reyes, 2012). De acuerdo con su comportamiento Lewis, (1996) los describe como lagos tropicales profundos el cual consiste en una etapa de mezcla (hemisférico invernal) de principios de enero a finales de marzo y otra de estratificación durante los ocho meses restantes. En ambos lagos se pudieron detectar las tres etapas de la estratificación térmica, delimitadas por la ubicación de la termoclina, su amplitud e intensidad (Figs. 6 y 7). A pesar de que estos dos lagos presentan diferente profundidad su comportamiento térmico y de oxígeno disuelto fue similar, aunque evidentemente el Lago Preciosa presentó un hipolimnion mayor.

El segundo efecto de la profundidad estuvo relacionado con la temperatura mínima registrada en La Preciosa que fue 1.6 grados menor que en Atexcac, aunque la temperatura máxima registrada fue equivalente en ambos sistemas /alrededor de 21 °C (Tabla 1 y 2). Cabe resaltar que durante este año (Servicio Meteorológico Nacional, 2015) se informó que podía esperarse el fenómeno meteorológico de El Niño con un aumento de 1.4° C del promedio de temperatura con respecto a los años anteriores.

La atmosfera tuvo un comportamiento típico del fenómeno lo que lo determinó como un año Niño (SMN 2015). La variación de la temperatura en los lagos afectó los valores mínimos durante la mezcla que fueron superiores en 0.3 en la Preciosa y 0.9 °C en Atexcac a los registrados para los años 2009 y 2010, que fueron años Niño y Niña respectivamente (Arellano y González, 2011; Marcos y Reyes, 2012). Alcocer & Lugo, (2003) reportan que en el año 2000 el Lago Alchichica presentó efectos del Niño y la Niña que afectaron la temperatura del agua del epilimnion ligeramente mayor en el Niño que en la Niña (18.8-19.5 y 18.7-19.5°C, respectivamente) que en los años anteriores donde se encontraron valores promedio entre 18.2y 19.1°C. La amplitud del hipolimnion en el año de El Niño y La Niña fue menos amplia (29 m) y ligeramente más frío (14.5 ° C) que en años normales (es decir 39 m con temperatura de 14.8 ° C). Lo que al parecer indica el efecto de los cambios meteorológicos mayores afectan las masas de agua en estos ambientes volcánicos de tipo

maar como previamente se había reportado para el lago Alchichica (Alcocer, 2003). Mientras que para el lago La Preciosa en la ET la temperatura registró 21.1°C. Se observó para ambos lagos un evento de emblanquecimiento (Anexo 2 D) en el cual los sistemas exhiben un cambio de coloración superficial típica verde esmeralda a azul neón (Thompson *et al*, 1997) promovida por altas temperaturas, florecimiento de picoplancton autotrófico (PPA), nucleación y precipitación de carbonato de calcio que se explicarán a detalle más adelante. Mientras que la incorporación del carbono para los procesos de fotosíntesis es afectada por el régimen de radiación solar y la temperatura del agua (Callieri & Stockner, 2002). Si bien la temperatura no es un factor limitante en lagos tropicales debido a su poca variación, pero sí la disponibilidad de nutrimentos y la radiación subacuática (Esteves, 1988).

6.1.3. Oxígeno Disuelto

Durante la mezcla en los lagos se presenta un perfil de tipo ortógrado, que implica una concentración homogénea de este gas a lo largo de la columna de agua. Esto responde además a los florecimientos algales, que favorecen una oxigenación distribuida en todo el perfil por el movimiento de las masas de agua. En estos ambientes se han registrado florecimientos de diatomeas durante el invierno, lo que coincide con lo reportado por Alcocer *et al.*, (2008) para el lago Alchichica.

Mientras las concentraciones de oxígeno disuelto en ambos lagos muestran durante la estratificación térmica un perfil clinógrado. Cuyo comportamiento fue previamente registrado por (Arellano y González, 2011; Marcos y Reyes, 2012) los cuales asocian las mayores concentraciones de este gas hacia la zona eufótica como resultado de la actividad de los productores primarios, principalmente cuando se presentan florecimientos de fitoplancton. Con una reducción hacia el fondo del sistema por efecto de los procesos de oxidación de la materia orgánica acumulada a través del tiempo.

La oxiclina en el lago La Preciosa fue profundizándose por debajo de la zona eufótica conforme avanzaba la estratificación (Tabla 3) ya que esta depende de la respiración de los heterótrofos particularmente de la comunidad bacteriana encargadas de la descomposición de la materia orgánica y de la profundidad máxima del lago (Figura. 8). Mientras, en el lago Atexcac durante la ET hubo un florecimiento de fitoplancton (*Nodularia cf. spumigena* Mertens ex Bornet & Flahautl (1886-1888)) [Anexo 2 B] (Komárek J. & Komárková-Legnerová., 2002) reportada en el lago La Preciosa por Morán., (2016) y para Atexcac por

Macek *et al.*, (2009); Arredondo y González (2011); Lagunas y Martínez., (2015), que se presenta al final de la mezcla cuya presencia contribuye significativamente con la productividad del sistema. También se ha reportado *N. spumiguena* en el lago monomítico cálido Alchichica por Oliva *et al.*, (2001); Ortega *et al.*, (2005) y Ardiles, (2011). En La Preciosa presentó concentraciones máximas (Tabla 3) de saturación de oxígeno la cual fue disminuyendo por debajo de la termoclina conforme avanzaba la estratificación ya que depende de la temperatura, presión y concentración de varios iones (Hutchinson, (1957), Wetzel, (1983) en Cole G. & Weihe E, 2016.)), registrando concentraciones mínimas de 0.20 mg L⁻¹ en el hipolimnion durante la Eta.

6.1.4. Zona eufótica (Ze)

La ubicación de la Ze delimitada por el 1% del PAR fluctuó durante las fases hidrodinámicas en los lagos. Ésta a su vez dependió de las etapas turbias y claras en los sistemas, asociadas las primeras con una turbidez biogénica producida por florecimientos algales dependientes de una alta disponibilidad de nutrientes y las segundas con bajas densidades fitoplanctónicas cuando se agotan los mismos.

La Preciosa

Durante el periodo de mezcla en el lago La Preciosa la Ze se encontró entre los 13 y 20 m de profundidad (Tabla 1), asociada con la presencia de un florecimiento invernal de diatomeas (*Cyclotella sp.*) en la columna de agua (Moran, 2016), que corresponde con la época donde la temperatura es mínima y homogénea. La circulación de las masas de agua hace que las diatomeas se desplacen a través de toda la columna, lo que implica que pueden permanecer en sitios iluminados o de baja intensidad lumínica por un cierto intervalo de tiempo, favorecido por su forma radial y su tasa de sedimentación. Esto hace que la productividad primaria en este periodo se vea afectada, mostrando concentraciones bajas a pesar de que exista una mayor disponibilidad de nutrimentos de PO₄³⁻ (Fig. 18). Durante la EBE que corresponde con la época de lluvias, las cuales provocaron un arrastre de material edáfico y por ende una mayor disponibilidad de nutrimentos, permitieron una mayor abundancia de algas verdes como *Oocystis parva* y *O. submarina* reportadas por Moran, (2016) lo que favoreció una mayor productividad primaria en la época más cálida del año. Conforme avanzó el período de estratificación, la Ze se redujo hasta los 9 m de profundidad, lo que confirma una etapa de mayor turbidez biogénica.

Atexcac

Durante la mezcla en el lago Atexcac la Ze (Tabla 2), tuvo variaciones mayores a las registradas en el lago La Preciosa, fluctuando entre 9 y 20 m de profundidad, debido también a que se presentó florecimiento invernal de una diatomea *Cyclotella choctawhatcheeana* (López C. comen. pers).

Durante la ET bajo condiciones óptimas de temperatura ($>17^{\circ}\text{C}$), con concentraciones de nitrógeno limitadas y con la presencia de fósforo excedente, una cianobacteria filamentosa *Nodularia* cf. *spumigena* se desarrolla (Cook & Holland, 2012; Holland *et al.*, 2012). La cual es capaz de fijar nitrógeno molecular atmosférico gracias a la presencia de estructuras celulares llamadas heterocistos (Anexo imagen A). Este florecimiento incrementa la turbidez biogénica, disminuyendo la penetración de la irradiación lumínica con una Ze de ~ 8 m, que puede ser considerada como una etapa turbia. Una parte importante de la población de esta cianobacteria filamentosa es arrastrada por la acción del viento hacia la zona litoral del lago, mientras otra sedimenta hacia el fondo, en ambos casos sufren procesos de descomposición, aportando nitrógeno amoniacal al sistema (Fig. 17). En la EBE se presentaron poblaciones remanentes de *N.* cf. *spumigena* que se manifestó con el aumento de la Ze a ~ 14 m. (Fig. 19).

Durante este mismo período se presentó un florecimiento de *Merismopedia trolleri* Bachmann (1920) (2-3 μm de diámetro) que frecuentemente presentan vacuolas de gas que les permiten flotar en la superficie. Este florecimiento estuvo asociado con el de la picocianobacteria *Synechococcus* (PPA), capaz de utilizar bicarbonatos para la fotosíntesis y nucleación de carbonatos que pudiera ser el propulsor del evento de emblanquecimiento en el lago reduciendo drásticamente la visibilidad al disco de *Secchi* por la saturación de carbonatos en precipitación, registrando una Ze de 9 m. Posteriormente en la ETA se presentó *Planktolyngbya tallingii* Komárek & Kling (1991). (López, C. comen. pers). Las propiedades selectivas del clima cálido sub-acuático en la selección de diferentes cepas de picocianobacterias podrían también explicar por qué se han encontrado los máximos de APP en una variedad de profundidades y diferentes intensidades de luz (Pick 1991; Callieri 1996).

Un patrón similar en la sucesión de especies se ha reportado en el lago hiposalino (≈ 8.5 g L^{-1}) Alchichica donde Oliva *et al.*, (2001) reportan especies halotolerantes que se ven favorecidas por un incremento de temperaturas y una alta disponibilidad de nutrientes.

6.1.5 Alcalinidad, Durezas y pH.

La alcalinidad es un indicador indirecto de la productividad de lagos, donde niveles altos de ésta indicarían una productividad elevada y viceversa. Además, las formas de carbono son las principales amortiguadoras del pH del agua dulce. Asimismo, los bicarbonatos pueden servir como fuente de reserva para la fotosíntesis (UPRM. EDU., 2015), particularmente para las cianobacterias que suelen utilizar este anión como fuente de carbono.

De manera general los lagos maar estudiados se puede clasificar como de tipo alcalinos (con una alta alcalinidad total), con una concentración elevada del ión bicarbonato, favorecida por el pH alcalino en el rango de 8.3 a 9.0. En aguas moderadamente duras o alcalinas, todas las bases están presentes en forma de bicarbonatos, se establece en el caso de estos lagos, un equilibrio en la solución con los cationes que más fácilmente ceden electrones, como el calcio y el magnesio (Wetzel, 2001).

En los lagos de estudio La Preciosa presentó pH's alcalinos oscilando entre 8.8 a 9.4 y en Atexcac de 8.8 a 9.07. En general, en el lago La Preciosa predominaron los HCO_3^- sobre los CO_3^{2-} y en el lago Atexcac se encontró un comportamiento inverso (Figs. 10 y 11 AB). Estas diferencias pueden deberse a que en ambos lagos las aguas son muy duras, además el lago Atexcac es hipo-salino con una mayor alcalinidad total en comparación con La Preciosa que es un sistema sub-salino, lo que favorece un incremento en la utilización de los bicarbonatos para procesos fotosintéticos por el PPA al estar en mayor disponibilidad en el primer lago, provocando la formación de cristales de carbonatos por nucleación que se pueden encontrar en forma de pequeñas partículas suspendidas o bien contribuyen a una mayor formación de microbialitos hacia la zona litoral. La etapa hidrodinámica que presentó mayores concentraciones de pH para el lago La Preciosa fue durante la EBE y para el lago Atexcac durante la ETA. Este aumento se debe a la baja concentración de CO_2 libre lo que conlleva a una baja concentración del ion hidronio (H^+) y por ende un aumento en el pH.

Las interacciones entre las formas del carbono y el pH tienen un rol fundamental en los procesos de fotosíntesis y respiración, profundidad del sistema y por su origen geomorfológico, donde bajo estas condiciones el pH es mayor con concentraciones relativamente altas de fósforo y nitrógeno, principales nutrientes de la limitación de organismos autótrofos.

Las durezas totales en el Lago La Preciosa tuvieron concentraciones que fluctuaron entre 1077 a 985 mg de $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ lo que lo caracteriza como un sistema de agua dura de acuerdo con Boyd, (1990); Armienta *et al.*, (2008). Mientras que las concentraciones del lago Atexcac variaron entre 3016 a 2844 mg de $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ lo que lo caracteriza como un sistema de aguas muy duras de acuerdo con Boyd, (1990); Wetzel, (2001) (Tablas 5 y 6 AB).

Para el año de estudio el Servicio Meteorológico Nacional reportó un año de fuertes lluvias durante los meses de junio a septiembre los cuales pudieron provocar una mayor disponibilidad de nutrimentos y disminuyen la transparencia del sistema por cierta turbidez abiogénica lo que contribuye a una menor productividad primaria.

6.1.6 Total de sólidos disueltos y conductividad.

La Preciosa y Atexcac presentaron una conductividad eléctrica promedio que fluctuó de entre 2.14 ± 0.06 y $12.09 \pm 0.21 \text{ mS cm}^{-1}$ y TSD promedio de 1.08 ± 0.03 y $6.05 \pm 0.12 \text{ g L}^{-1}$ respectivamente. De acuerdo con su salinidad 1.1 g L^{-1} el lago La Preciosa se encuentra en el límite entre agua dulce y salina, considerándolo como sub-salino (Martínez, 2010). Mientras que Atexcac con una salinidad de 6 g L^{-1} se considera como hipo-salino (Armienta *et al.*, 2008) y atalasalino por tener sales de origen no marino (Vilaclara *et al.*, 1993) (Tablas 5 y 6 A B). La salinidad, y por ende la densidad del agua también varía a lo largo del perfil de profundidad asociada esta última también con la variación en la temperatura del agua. A su vez, dichas variaciones, afectan los patrones de circulación de las masas de aguas y, en consecuencia, afectan la translocación vertical de nutrientes en la columna de agua y el movimiento horizontal del plancton y los nutrimentos (Webber & Thurman, 1991).

6.2. Nutrimientos.

El incremento en la concentración de nutrimentos favorece el crecimiento de ciertas poblaciones de fitoplancton (Carpenter & Cottingham, 1997; Weithoff *et al.*, 2000; Muylaert *et al.*, 2002), que son responsables de una elevada actividad fotosintética inicial, conduciendo a la producción de gran cantidad de biomasa.

En los lagos tropicales existen nutrimentos limitantes para el crecimiento poblacional del fitoplancton y otros organismos, estos por lo general son los derivados de las formas inorgánicas del nitrógeno, mientras que para los lagos templados son los del fósforo. Aunque también en los sistemas lacustres del altiplano mexicano se ha registrado una colimitación por ambos nutrimentos (Hernández-Avilés *et al.*, 2002).

El concepto de nutrimento limitante se basa en la premisa de que, dada una determinada estequiometría celular, el nutrimento que controla la cantidad máxima de biomasa fitoplanctónica es el que se consume primero y que alcanza un mínimo antes que otros nutrimentos relativos a tal estequiometría (Salas & Martino., 1991).

6.2.1. Nitrógeno inorgánico disuelto ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$).

En el lago La Preciosa durante el periodo de mezcla invernal se presentó un florecimiento de diatomeas que agotó el nitrógeno principalmente en sus formas oxidadas al ser las más asimilables por el fitoplancton. Los nitratos por lo general se mantuvieron siempre en concentraciones bajas y constantes a lo largo del año (Figura 12). Las bajas concentraciones de nitratos favorecen la productividad primaria acuática (Margalef 1983). En este tipo de lagos volcánicos se propone que el aumento en la disponibilidad de nutrimentos durante la mezcla favorece el florecimiento de diatomeas (Alcocer *et al.*, 2008; Ardiles *et al.*, 2012). Mientras que para el lago Atexcac ($200 \pm 400 \text{ mg m}^{-3}$) lo cual lo clasifica como un lago oligo-mesotrófico de acuerdo con Wetzel, (2001) y con el agotamiento del nitrógeno provocado por las diatomeas, surge la cianobacteria *Nodularia cf. spumigena* que tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico aprovechando el fósforo disponible, lo que le da la posibilidad de prevalecer durante la estratificación temprana, llegando a establecer

una alta productividad primaria y biomasa; así como elevadas concentraciones de Chl *a* durante su florecimiento. Su posterior reducción a amonio por efectos de altas temperaturas y por procesos de desnitrificación hace que la disponibilidad de nitrógeno disminuya (Lewis Jr., 2002).

Durante la EBE el aumento de la disponibilidad de NH_4^+ fue mayor que NO_3^- y NO_2^- a través de toda la columna de agua y fue aumentando del epilimnion hacia el hipolimnion. Como resultado de la oxidación de la materia orgánica se favorece el proceso de amonificación que favorece la acumulación de amonio-amoniaco en el hipolimnion. Asimismo, con el agotamiento del oxígeno en este estrato se favorece el proceso de desnitrificación u oxidación anaerobia de las formas oxidadas del nitrógeno produciéndose por esta vía nitrógeno molecular.

6.2.2. Fósforo reactivo soluble (FRS)

En los lagos La Preciosa y Atexcac durante la etapa de mezcla existe una distribución de FRS homogénea en la columna de agua, concentraciones $0.0030 \pm 0.0027 \text{ mg L}^{-1}$ y $0.0029 \pm 0.0019 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente, concentraciones muy bajas que son rápidamente asimiladas por el fitoplancton y el bacterioplancton presentes en el sistema. Posteriormente conforme avanza la estratificación las concentraciones de fósforo disminuyen del epilimnion hacia el hipolimnion esta disminución es característica en lagos con curvas de tipo clinógrado (Wetzel, 2001). Este comportamiento al igual que en Alchichica, presenta la acumulación de nutrientes hacia el fondo, terminando por de ser liberados, durante la mezcla, con lo que se produce un florecimiento de diatomeas (Ardiles, 2011).

Diversos estudios limnológicos han demostrado que el fósforo es el principal nutriente que limita la producción fitoplanctónica en los lagos templados, mientras que se van acumulando evidencias de que el nitrógeno es frecuentemente el factor limitante en los lagos tropicales (Vincent *et al.*, 1984; Lewis Jr., 1996:2002). En los lagos de estudio pasa lo contrario, con el florecimiento de *N.cf. spumigena* que con ello indica el déficit de nitrógeno, precisamente porque se desarrolla fijando nitrógeno y enriqueciendo con este nutriente la capa de mezcla hasta que consume el fósforo disponible. Talling & Talling (1965) sugieren que el nitrógeno es el más crítico que el fósforo para el desarrollo del fitoplancton en Ramos *et al.*, (2008) en el lago Alchichica.

6.2.3. Sulfatos SO_4^{2-}

Las plantas, algas y muchos microorganismos heterótrofos, asimilan el azufre en forma de sulfato, para poder incorporar aminoácidos protéicos y algunas coenzimas.

La descomposición de compuestos orgánicos de azufre del suelo y de los sedimentos produce mercaptanos y H_2S (Bremner y Steele, 1978). El H_2S no se libera a la atmósfera, puede ser oxidado por microorganismos en condiciones aerobias o ser oxidado fotótróficamente en condiciones anóxicas. Se pudo percibir durante el muestreo en el hipolimnion cercano al fondo de la columna de agua, el olor peculiar a mercaptanos parecido a huevo podrido.

6.2.4. Sílice reactivo soluble (SiRS)

El contenido de silicatos soluble depende principalmente del pH. En general, cuanto más alta sea la alcalinidad, mayor será la reserva del anión silicio (Margalef, 1974). Durante el florecimiento de diatomeas se produce una alta exportación de sílice biogénico hacia los sedimentos. Debido a que el lago La Preciosa presenta un pH de 9, es probable que el sílice se haya encontrado mayoritariamente como HSiO_3^- (bisilicato). Por otra parte, el sílice que contienen las frústulas de las diatomeas (*Cyclotella sp.*) puede pasar al sedimento del lago por su gran tamaño y peso que le impide mantenerse en la capa de mezcla al inicio de la estratificación. Estos factores se acumulan a través del tiempo en los sedimentos del fondo de la columna de agua. De acuerdo con Margalef, 1983 el sílice experimenta ciertos cambios estructurales que disminuyen la facilidad ulterior de disolución). Por ejemplo; en el lago Alchichica, se presentó un pH relativamente elevado, la mayor parte del ciclo anual se encuentra en condiciones hipóxicas-anóxicas, en un ambiente muy pobre en calcio disuelto (Vilaclara *et al.*, 1993 en Ardiles *et al.*, 2012). Mientras que en el lago Atexcac el patrón de comportamiento de sílice (Figs. 23) se alterna con el florecimiento de *N.cf. spumigena* el cual es menos intenso cuando se ha producido un intenso de diatomeas.

Los altos aumentos de concentraciones de sílice en lagos tropicales coinciden con una marcada disminución de la termoclina, y un declive de clorofitas y cianobacterias (Lewis, 1978). La extensión del periodo de la estratificación parece influir en la posición del máximo profundo de clorofila ya que -con el tiempo- la captación de los nutrientes por el fitoplancton puede llevar a una profundización progresiva de la nutriclina y consecuentemente a la profundización del DCM (Barbiero & Tuchman, 2004).

6.3. Parámetros biológicos

6.3.1 Productividad primaria

Durante el periodo de mezcla la productividad primaria del lago La Preciosa se encontraron valores promedio de PB que oscilaron entre $153.88 \pm 58.00 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ y $57.20 \pm 34.78 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ en la Zeuf disminuyendo paulatinamente la productividad hacia el hipolimnion. Además, existió una disminución rápida de la zona eufótica a lo largo de los meses de mezcla, por efecto de un florecimiento fitoplanctónico de la clase *Bacillariophyta* compuesto por *Cyclotella sp.* (Moran, 2016) producto de una sucesión temporal y asociado a con una mayor disponibilidad de nutrientes

Posteriormente, con la variación estacional que produce cambios en la temperatura y por ende de las densidades de la columna de agua se presentó la ET en donde los valores de PB promedio fueron de $78.30 \pm 20.59 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ y la R $394.35 \pm 42 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Donde se pudo observar una mayor tasa de respiración y un decremento de la biomasa fitoplanctónica de las diatomeas (vinculado con la tasa de mortalidad y sedimentación) que favorece una disminución de la turbidez biogénica, el incremento de la estabilidad de la columna de agua, así como; la escasez de sílice a través de ésta.

En la EBE cuando las temperaturas del agua fueron las más cálidas; junto con el período de lluvias que aporta nutrientes de la microcuenca de captación favorecen el crecimiento de cianobacterias como *Planktolyngbya tallingii* con mayor dominancia, seguidas por clorofitas de tamaño pequeño como *Kirchneriella sp.* y *Oocystis sp.* (Moran, 2016). Esta dominancia no necesariamente aporta una mayor productividad en el sistema. Asimismo, se sabe que el picoplancton autotrófico (PPA) usualmente alcanza altas concentraciones de productividad primaria a finales de verano tanto en ambientes marinos y de agua dulce (Stockner, 1991 en Padisák *et al.*, 1997), pudiendo ser este grupo importante en el lago La Preciosa. En la tabla 11 se presentan los valores de productividad primaria bruta contra la concentración de clorofila "a" de algunos lagos tropicales y subtropicales con relación a lo observado a La Preciosa y Atexcac. Según Wetzel (2001), quién clasifica el estado trófico con base a la productividad primaria, se consideraría a La Preciosa (PB $1.31 \pm 0.54 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) como oligotrófico ($0.49\text{-}2.22 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). A pesar de esta clasificación de acuerdo con sus concentraciones de Chl a $1.32 \pm 1.12 \mu\text{g L}^{-1}$ de acuerdo con algunos autores (Takahashi *et al.*, 1995; Hart *et al.*, 2000 y Valdespino *et al.*, 2014) el lago tiende a ser mesotrófico. Oseguera *et al.*, (2015) reporta de acuerdo con Wetzel, (2001) que el estado trófico del

Lago Alchichica con base en la PPN ($842 \pm 2,296 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) como mesotrófico ($250\text{--}1,000 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) Tabla 11.

Las condiciones desarrolladas en la estratificación térmica (baja disponibilidad de nutrientes, alta temperatura, e irradiación solar) favorecen el crecimiento del grupo *Chlorophyta* (Lewis Jr.1978; Flores & Barone 2000), de las cuales *Oocystis parva* y *O. submarina* predominaron durante la estratificación a pesar de los pocos nutrientes disponibles para su consumo, lo que pudiera indicar que a baja disponibilidad de estos predominan las formas pequeñas del fitoplancton. En la zona metalimnética de la columna de agua se presentó un máximo de PB $\sim 103.64 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, que se pudo deber a la presencia de PPA. De acuerdo con Stockner *et al.*, (2000) las condiciones de luz bajo del agua son muy importantes en el crecimiento y producción de picoplancton fotosintético cuya abundancia y distribución dentro de la columna puede cambiar rápidamente con diferencias térmicas y régimen de luz.

El incremento de las picocianobacterias (Pcy, por sus siglas en inglés) durante la estratificación térmica es posiblemente ligado a la estructura térmica del lago. Estas especies de Pcy provocaron un aumento en la productividad bruta del sistema; ya que de acuerdo con su relación superficie-volumen tienen una ventaja competitiva sobre otros organismos de mayor talla como las diatomeas $>2.0 \mu\text{m}$ previniendo una alta tasa de sedimentación en respuesta al gradiente de densidad de la termoclina hacia las capas más profundas de la columna de agua.

En la figura 27 se encuentran los valores promedio de PB del lago Atexcac los cuales oscilaron entre ($399.64\text{--}12.75 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) en el mes de febrero en el estrato del hipolimnion hubo un aumento considerable con respecto al mes anterior y a finales del mes marzo se encontraron los valores más altos de PB y R ($399.64\text{--}66.97 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$), respectivamente, en el epilimnion, estrato donde se observó una disminución en la Ze $\sim 10 \text{ m}$ provocado por un florecimiento de *N. cf. spumigena* la cual forma vacuolas de gas que le permiten flotar y mantenerse en la superficie con una iluminación óptima, concentración de nutrientes u otro factor para estas especies como la fijación nitrógeno atmosférico. (Bellinger & Sigge., 2010). [Anexo 2 A].

La carga extra de nitrógeno aumenta con la productividad del ecosistema y cumple con 20 a 90% de los requerimientos de nitrógeno para la comunidad de la productividad primaria durante un florecimiento de verano (Sörenson & Sahlsten., 1987; Larsson *et al.*, 2001; Wasmund *et al.*, 2005, en Wannicke *et al.*, 2012). Estos florecimientos de cianobacterias fijadoras de nitrógeno al inicio de la estratificación después del periodo de mezcla son comunes en los lagos tropicales (Talling & Lemoalle, 1998). (Anexo Imagen B). En el lago Alchichica, también existe un florecimiento de *N. cf. spumigena* que se desarrolla con una variable intensidad interanual, por un breve periodo de tiempo, para posteriormente decaer (Alcocer *et al.*, 2000; Alcocer *et al.*, 2008).

Posteriormente durante la EBE la productividad disminuyó debido que en el mes de septiembre durante el muestreo se pudo observar un fenómeno de emblanquecimiento con lo cual la visibilidad y la penetración de radiación solar disminuyó considerablemente dejando a la Zeuf en una amplitud hasta los 7 m y con una PB de $62.00 \pm 24.82 \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Este fenómeno se ve asociado a la precipitación de carbonatos de calcio que puede ser inducido por la actividad del PPA, organismos que por su tamaño y relación superficie-volumen, dominan el total de la biomasa y producción en lagos oligotróficos y océanos. Durante finales de esta etapa hidrodinámica *Merismopedia trolleri* y *Planktolyngbya tallingii* tuvieron su máxima abundancia manteniéndose constante *Chroococcus sp.* en la estratificación (Lopez C. comen. pers.). Esto se puede deber a la presencia de cianobacterias coloniales pequeñas de 2 a 4 células con estructuras celulares de flotabilidad como las vacuolas de gas que les permiten mantenerse en óptimas condiciones de luz y de nutrientes que son limitantes en el sistema como nitrógeno y fósforo que absorben con movimientos (migraciones) verticales a través de la columna de agua y que permiten la estabilidad durante un prolongado tiempo en la estratificación.

6.3.2 Clorofila a

Durante el periodo de estudio, la concentración de Chl a presentó oscilaciones que se vieron influenciadas por diferentes factores tales como: la hidrodinámica de los lagos, periodos de mezcla y estratificación de los diferentes florecimientos tanto de diatomeas como cianobacterias, profundidad en la penetración de la luz que influye en la distribución del fitoplancton.

Para el lago La Preciosa en la etapa de mezcla se obtuvieron lecturas de Chl a ($1.69 \pm 0.65 \mu\text{g L}^{-1}$) con concentración más homogénea a través de la columna de agua. Durante la

segunda etapa de mezcla del año 2015 se presentaron las mayores lecturas promedio de Chl *a* ($5.32 \mu\text{g L}^{-1}$) este aporte se pudo influir a la presencia de un florecimiento invernal de diatomeas (*Cyclotella sp.*) producto de la mezcla favorecida por la disminución de la temperatura ambiental y la acción del viento que redistribuye los nutrientes desde las zonas más profundas del cuerpo de agua, promoviendo su crecimiento y proliferación durante este periodo (Fig. 28).

Conforme avanzó la mezcla y se presentó la estratificación temprana la concentración de clorofila *a* disminuyó ($0.98 \pm 0.46 \mu\text{g L}^{-1}$) lo que estuvo asociado con la disminución de la Zeuf hasta los 11 m y la formación de la termoclina de los 12 a los 25 m de profundidad, la composición del fitoplancton de la estratificación temprana estuvo dominada por *Oocystis sp. 2*, seguida de *Cosmarium sp* y *Oocystis sp. 1* (Moran, 2016), en esta etapa se encontraron las especies del fitoplancton asociadas con varios regímenes de irradiación, presentando características fisiológicas que incluso les permite la absorción de la irradiancia en el límite del $\sim 1\%$ del PAR.

En la estratificación bien establecida se presentó el fenómeno de emblanquecimiento, reduciendo la zona eufótica y la productividad en el sistema. Las concentraciones de Chl *a* ($0.99 \pm 0.86 \mu\text{g L}^{-1}$), dominada también por géneros de tamaños pequeños tales como: *Oocystis sp. 2*, *Kirchneriella sp.*, y la especie *Oocystis parva* (Moran, 2016). En esta etapa se registraron dos máximos de Chl *a* localizados dentro de la termoclina uno en el mes de agosto de $3.53 \mu\text{g L}^{-1}$ y otro en septiembre de $2.98 \mu\text{g L}^{-1}$. De donde se deduce que conforme avanzó la EBE la acumulación de nutrientes y las diferentes tasas de sedimentación de los organismos quedaron disponibles en el metalimnion para el fitoplancton.

Ya en la Eta el valor de Chl *a* aumentó con una concentración promedio de $1.44 \pm 0.65 \mu\text{g L}^{-1}$. En esta etapa se encontró un máximo de Chl *a* localizado en el epilimnion de $3.09 \mu\text{g L}^{-1}$ en el mes de octubre. Estas etapas hidrodinámicas presentaron concentraciones de clorofila *a* $> 1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ (más altas de la estratificación) y la zona eufótica se profundizó hasta los ~ 23 m, con una termoclina que fue de los 14 a los 23 m, lo cual pudo promover una mayor PB ($69.09 \text{ mg C m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) en el sistema inducida por el fitoplancton de tamaño pequeño a lo largo de la columna de agua.

Durante la estratificación térmica los máximos profundos de clorofila (DCM) se localizaron por debajo de la Zeuf, y el metalimnion por lo que constituyó una adaptación a las bajas intensidades lumínicas; por lo tanto, promovió el crecimiento del fitoplancton y la extensión al periodo de estratificación que parece influir en la posición del DCM, así como; el efecto de la picnoclina (densidad) en la retención del fitoplancton de gran tamaño en el

DCM, se suma a factores endógenos de las propias células adaptadas a condiciones extremas, relacionados con la disminución del número de cloroplastos del PPA formando una relación superficie-volumen mejor adaptada a estas condiciones. En contraste con el lago Tanganyika las concentraciones PB ($0.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y de Chl *a* $1.2 \mu\text{g L}^{-1}$ de acuerdo con Sarmiento *et al.*, 2006., lo clasificarían como mesotrófico por productividad primaria bruta y por clorofila *a* como oligotrófico la misma clasificación para nuestro lago a pesar de las diferentes tasas de sedimentación y profundidad. Tabla 11.

Atexcac

Durante la etapa de mezcla se registró una Zeuf hasta los 20 m de profundidad la cual disminuye rápidamente con el florecimiento invernal de diatomeas (*Cyclotella sp.*) producto de la redistribución- y disponibilidad de nutrientes. Las concentraciones promedio de clorofila *a* fueron $1.28 \pm 1.37 \mu\text{g L}^{-1}$ a través de la columna de agua. Debido a la presencia de diatomeas se contribuye a la formación de un pico máximo de clorofila *a* ($\sim 5.54 \mu\text{g L}^{-1}$) en el epilimnion durante el mes de marzo como resultado del inicio de la estratificación. Conforme avanzó la estratificación térmica se observó una disminución en la Zeuf ($\sim 12 \text{ m}$), asociado con el florecimiento de *N.cf. spumigena* y su período de permanencia y decaimiento. En la ET la concentración promedio de clorofila *a* fue de $1.15 \pm 0.42 \mu\text{g L}^{-1}$ y presentó un máximo profundo de clorofila ($\sim 1.97 \mu\text{g L}^{-1}$) que pudieron deberse a la presencia de *N.cf. spumigena* favorecida por el incremento de la temperatura del agua y con la capacidad de fijar N_2 atmosférico que de 2 a 3 meses desaparecerá después que decaen los pocos nutrientes disponibles.

Durante la EBE las concentraciones promedio fueron de $0.73 \pm 0.47 \mu\text{g L}^{-1}$. Durante este periodo se pudo observar el evento de emblanquecimiento que puede ser promovido por la precipitación de carbonato de calcio y posiblemente por actividad fotosintética precedente de un florecimiento de PPA, que coincide con un pico máximo de dureza parcial ($3023.02 \text{ mg L}^{-1}$), la disminución de CO_2 limitante por el proceso de la fotosíntesis, el pH alcalino (~ 9.01) en el agua y cambios de concentraciones de carbonatos y bicarbonatos anteceden la aparición del fenómeno de emblanquecimiento en la columna de agua. En esta etapa predominaron los siguientes géneros de cianobacterias como: *Merismopedia trolleri* en el epilimnion y metalimnion, posteriormente *Planktolyngbya tallingii* y *Chroococcus sp.* (López, inédito); donde las concentraciones de Chl *a* fueron aumentando del metalimnion hacia el epilimnion.

Debido a la asimilación de los nutrientes acumulados en el metalimnion e hipolimnion en la etapa anterior, se presentó un DCM de $9.95 \mu\text{g L}^{-1}$. Como ya se ha mencionado éstos están asociados a picocianobacterias del género *Synechococcus sp*, éstas son capaces de crecer y fotosintetizar a baja irradiación solar con pigmentos accesorios como ficobilinas, zeaxantina y β -caroteno; así como, divinil clorofila *a* respectivamente, que ayudan a captar clorofila *a* longitudes de onda (570-650 nm) (Morel *et al.*, 1993).

En contraste con estos lagos su concentración de Chl *a* ($46.4 \mu\text{g L}^{-1}$) es muy por abajo del lago Kinneret (mar de Galilea) considerado meso-eutrófico, pero de acuerdo con su PB ($1.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) se le consideraría como oligotrófico. Algo muy similar pasa con el lago Alchichica (forma parte de los lagos tipo maar de la cuenca oriental de Puebla) acuerdo a su PB promedio ($1.049 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y con intervalos de 1.08 a $4.19 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Oseguera *et al.*, (2015) lo clasificarán en el mismo estado trófico (oligotrófico) con respecto a Wetzel, (2001).

Oseguera *et al.* (2015) clasifica al lago Alchichica por su productividad primaria como oligotrófico de acuerdo con Wetzel (2001); siendo similar a la productividad primaria registrada en el lago Atexcac, pudiéndose también ubicar dentro de este mismo estado trófico. Sin embargo, en función de las máximas productividades registradas en ambos sistemas se pueden clasificar como mesotróficos. Mientras, que el lago La Preciosa por el intervalo de productividad primaria encontrado sería oligotrófico (Tabla 11)

Berman *et al.*, (1995) y Stronge *et al.*, (1998) afirman que la concentración de clorofila puede estar relacionada con concentraciones del año anterior, es decir, es posible que la dependencia o control interno de la producción del año con relación a la anterior dé como resultado un año con alta producción seguida de otro con baja. Por lo tanto, la concentración de clorofila *a* no resulta un buen indicador de la productividad primaria en el sistema más bien se asemeja a una capacidad potencial del fitoplancton.

Tabla 11. Estados tróficos con respecto a las concentraciones promedio, desviaciones estándar y rangos de clorofila a, productividad primaria bruta de algunos lagos tropicales y templados.

Lago	Estado trófico	Chl a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	PB ($\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$)		Referencia
			Promedio	Intervalo	
La Preciosa, México	Oligotrófico	1.32±1.12	1.31±0.54	0.49-2.22	Este trabajo
Atexcac, México	Oligo- mesotrófico	1.19±1.37	1.67±1.10	0.57-4.16	Este trabajo
Alchichica, México	Oligotrófico	2.91±4.00	1.049± 0.44	1.08-4.19	Oseguera <i>et al.</i> , 2015
Chapala, México	Oligotrófico	4.2±1.4	0.21±0.08	-----	Lind <i>et al.</i> , 1992
Valle de Bravo, México	Eutrófico	81.48±171.38	2.1	0.7-2.3	Valdespino <i>et al.</i> , 2014
Biwa, Japón	Mesotrófico	1.7	0.8	0.21-1.48	Takahashi <i>et al.</i> , 1995 Kishimoto <i>et al.</i> , 2015
Kinneret, Israel	Meso-eutrófico	46.4±40.9	1.2	0.1-1.8	Hart <i>et al.</i> , (2000)
Tanganyika, Kenya	Oligotrófico	1.2	0.8	-----	Hecky & Fee (1981)
Victoria, Uganda	Eutrófico	24.5	2.8±0.8	-----	Talling (1965)
Lanao, Filipinas	Mesotrófico	(3)	1.7	-----	Lewis (1974)

7. Conclusiones

1.- De acuerdo con las concentraciones promedio de la productividad bruta 1.31 ± 0.54 y $1.67 \pm 1.10 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para los lagos La Preciosa y Atexcac respectivamente; estos se encuentran en un estado mesotrófico de acuerdo con el sistema de clasificación de Wetzel (2001), corroborando este estado trófico al compararlos con otros sistemas lacustres monomíticos cálidos como el lago Biwa y el lago Kinneret (Takahashi *et al.*, 1995; Hart & Stone, 2000 y Valdespino *et al.*, 2014).

2.- En función de la concentración promedio de clorofila *a* de $1.32 \pm 1.12 \mu\text{g L}^{-1}$ para el lago La Preciosa y de $1.19 \pm 1.37 \mu\text{g L}^{-1}$ para Atexcac estos se clasifican como oligotróficos. Y por las concentraciones de los máximos profundos de clorofila de $5.32 \mu\text{g L}^{-1}$ para el lago La Preciosa conservaría este mismo estado trófico. Mientras, el lago Atexcac con concentración máxima de $9.95 \mu\text{g L}^{-1}$ tendería a ser mesotrófico de acuerdo con OCDE (1982).

3.- Los lagos a través de sus diferentes etapas hidrodinámicas presentaron variaciones en la productividad primaria, tendiendo a concentraciones mayores durante los florecimientos algales; tales como, el de diatomeas durante la mezcla en ambos lagos, *Nodularia cf. spumigena* al inicio de la estratificación en el lago Atexcac y picocianobacterias en el fenómeno del emblanquecimiento, de ambos sistemas en la estratificación bien establecida.

4.- La concentración de clorofila *a* en los lagos de estudio no es un buen indicador de la productividad real del sistema, más bien es una medida de la capacidad potencial de los productores primarios.

5.- Aunque los lagos se encuentran ubicados a escasa distancia unos de otros, existen algunas diferencias entre ellos. Estas tienen su origen en la morfometría de ambos lagos, asociados con la profundidad máxima, área superficial y volumen, así como la forma de la microcuenca de captación.

6.- De acuerdo con los efectos meteorológicos globales que pudiera implicar el año Niño que se presentó durante el periodo de estudio, éste influyó en un aumento de la temperatura del agua en la superficie de los lagos, particularmente durante el inicio de la estratificación, así como las modificaciones en la periodicidad y duración de los florecimientos algales que determinaron la dinámica productiva de ambos sistemas.

LITERATURA CITADA.

- ✓ Alcocer, J., & Lugo A., 2003. Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central México. *Geofísica Internacional*. Vol. 42. Núm. 3. P.p. 523-528.
- ✓ Alcocer, J., Escobar, E. & Oseguera, L. 2008. Acoplamiento pelágico-bentónico: respuesta de la zona bentónica profunda a la sedimentación del florecimiento invernal de diatomeas en el lago oligotrófico Alchichica, Puebla, México. *Hidrobiológica*, 18: 115-122.
- ✓ Alcocer, J., Escolero, O. & Marín, L. 2004. Problemática en el agua de la cuenca oriental estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala: 57-77. En: *El agua en México vista desde la Academia*. Jiménez B & Marín L. (Eds). Academia Mexicana de Ciencias. México.
- ✓ Alcocer, J., Lugo, A., Escobar, E., Sánchez, M. & Vilaclara, G. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen Internationalis. Vereinigung Limnologiae* 27: 3166-3169
- ✓ APHA, AWWA & WPCF. 1992. Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Ed. Díaz de Santos. Madrid.
- ✓ Arar, E. J. & Collins G. B. 1997. *In Vitro* Determination of Chlorophyll a and Pheophytin and Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. (Method 445.0.) In U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. 22p.
- ✓ Ardiles, V., Alcocer J., Vilaclara G., Oseguera, L. & Velasco, L. 2012. Diatom fluxes in a tropical, oligotrophic lake dominated by large-sized phytoplankton. *Hydrobiología* 679: 77-90.
- ✓ Ardiles, V. 2011. Dinámica a largo plazo de la biomasa fitoplanctónica en un lago monomítico cálido tropical. Tesis profesional de Doctorado en Ciencias. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. P.p. 1-3 México.
- ✓ Arellano, P. & González, F. 2011. Dinámica espacio-temporal del Picoplancton procarionte y su variación con la variabilidad limnológica del lago volcánico Atexcac, Puebla. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. P.p. 15-35.
- ✓ Armienta, M., Vilaclara, G., De la Cruz-Reyna S., Ramos, S., Ceniceros, N., Cruz, O & Arcega, C. 2008. Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(2). P.p.249-258.
- ✓ Arredondo-Figueroa, J., Borrego-Enríquez, L., Castillo-Domínguez R, Valladolid-Laredo M., 1983. Batimetría y morfometría de los lagos “*maars*” de la cuenca Oriental, Puebla, México. *Biótica* 8: 3-47.
- ✓ Bachmann, H. 1920. *Merismopedia Trolleri nov.* Spec. Zeitschrift für Hydrologie 1: 350.
- ✓ Badillo, A, Galindo de Santiago M., Gallardo T., Luzama Uc, G., Palomino A., Arena O., Chiappa, C. 2010. Manual de prácticas de Ecología Acuática. Unidad

- Multidisciplinaria de Docencia e Investigación. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. P.p: 15-26.
- ✓ Barbiero, R & Tuchman, M. 2004. The deep chlorophyll maximum in Lake Superior. *J. Great Lakes Res.* 30 (Suppl. 1), 256–268.
 - ✓ Begon, M., Harper, J.L. & Townsend, C.R. 1999. *Ecología: Individuos, Poblaciones y Comunidades*. Ediciones Omega, Barcelona.
 - ✓ Bellinger, E. & Sigge, D. 2010. *Freshwater algae Identification and use as bioindicators*. Wiley-Blackwell.
 - ✓ Benítez, H. y Contreras, T. 2016. Composición y dinámica del plancton procarionte en el lago volcánico monomítico cálido subsalino “La Preciosa”, Puebla. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
 - ✓ Berman, T., Stone, L., Yacobi, Y., Kaplan, B., Schlichter, A., Nishri, A & Pollinger, U. 1995. Primary production and phytoplankton in Lake Kinneret: A long-term record (1972-1993) *Oceanographic & Limnological Research*, Yigal Allon Kinneret Limnological Laboratory, POB 345, Tiberias. Israel.
 - ✓ Bremner, J & Steele, C. 1978. Role of Microorganisms in the Atmospheric Sulfur Cycle. In: Alexander M. (eds) *Advances in Microbial Ecology*. *Advances in Microbial Ecology*, vol 2. Springer,
 - ✓ Boston, M., Carpenter A., S., & Cottingham K. 1997. Resilience and restoration of lakes. *Conservation Ecology*.
 - ✓ Boyd, C., 1990. Water quality in pond for aquaculture. *Birmingham Publishing Co.* Birmingham, Alabama. 36-48, 87-90.
 - ✓ Callieri, C., Amicucci, E., Bertoni, R. & Vörös, L. 1996. Fluorometric characterization of two picocyanobacteria strains from different underwater light quality. *Int. Revueges. Hydrobiol.*, 81: 13-23.
 - ✓ Callieri, C. & Stockner, J. 2000. Picocyanobacteria success in oligotrophic lakes: fact or fiction? *J. Limnol.*, 59(1): 72-76.
 - ✓ Callieri, C. & Stockner, J. 2002. Freshwater autotrophic picoplankton: a review. *J. Limnol.* 61(1): 1-14.
 - ✓ Camacho, A., Borja, C., Valero-Garcés, B., Sahuquillo, M., Cirujano, S., Soria, J. M, Rico, E., De La Hera, A., Santamans, A. C., García De Domingo, A., Chicote, A. & Gosálvez, R.U, 2009. 3190 Lagos y lagunas kársticas sobre yesos. En: VV.AA., *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. P.p. 37
 - ✓ Carlson, C. A., Ducklow, H. W., & Sleeter, T. D. 1992. Stocks and dynamics of bacterioplankton in the northwestern Sargasso Sea. *Deep-Sea Res II* 43:491-515.
 - ✓ Carpenter, S. & Cottingham K. 1997. Resilience and restoration of lakes. *Conservation Ecology* (1): 2.
 - ✓ Carrasco-Núñez, G., Ortega, H., Romero, C. 2006. Evolution and hydrological conditions of a maar volcano (Atexcac crater, Eastern México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159. P.p.179–197.

- ✓ Chen, M., Schliep, M., Willows, R., Zheng-Li, Cai., Neilan, B., & Scheer, H. 2010. A Red-Shifted Chlorophyll. *Science*. Vol. 329, Issue 5997, pp. 1318-1319.
- ✓ Cole, G. A & Weihe, E. P., 2016. *Textbook of Limnology*. Fifth edition, Whavelan Press, Inc. P.p 205-265 (Versión en línea).
- ✓ Cook, P. L & D. P, Holland. 2012. Long term nutrient loads and chlorophyll dynamic in a large temperature Australian lagoon system affected by recurring blooms of cyanobacteria. *Biogeochemistry* 107: 261-274.
- ✓ Couradeau, E., Benzerara, K., Gérard, E., Moreira, D., Bernard, S., Gordon, E., Brown, Jr. & López-García, P. 2012. An Early-Branching Microbialite Cyanobacterium Forms Intracellular Carbonates. *Science*.
- ✓ Cullen, J. 1982. "The Deep Chlorophyll Maximum: Comparing Vertical Profiles of Chlorophyll a". *Fish.*
- ✓ Daw G. 2016. Evaluación de la Composición y Abundancia del procarioplancton durante el fenómeno de emblanquecimiento "whiting event" en el lago volcánico La Preciosa, Estado de Puebla. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- ✓ De la Lanza-Espino, G. y García Calderón, J.L. 2002. *Lagos y Presas de México*. (Eds) Segunda Edición, AGT Editor, México. P.p. 680.
- ✓ Díaz, P.E. 2002. *Poblana letholepis*. Peces en riesgo de la Mesa Central de México. Laboratorio de Ictiología y Limnología, Departamento de Zoología, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto W039. México.
- ✓ Dittrich, M. & Obst M. 2004. Are picoplankton responsible for calcite precipitation in lakes? *AMBIO: Journal of the Human Environment*; 33(8): 559-564.
- ✓ Dufour, A. P., 1992. "Methods for the Determination of Chemical Substances in Marine and Estuarine" *Environmental Matrices - 2nd Edition Microbiological and Chemical Exposure*. Sección 445.0 (Arar & Collins, 1997) P.p. 133-153.
- ✓ Duglas, S. & Beveridge, T. 1998. Mineral formation by bacteria in natural microbial communities. *FEMS Microbiol Ecol* 26(2) P.p. 79-88.
- ✓ Esteves, F. 1988. *Fundamentos de Limnología*. Rio de Janeiro: Editora Interciência/FINEP. P.p. 575-579.
- ✓ Fennel, K. & Boss, E., 2003. Subsurface maxima of phytoplankton and chlorophyll: Steady-state solutions from a simple model. *Limnol. Oceanogr*, 48(4): 1521-1534.
- ✓ Flores, N. & Barone, R. 2000. Phytoplankton Dynamics and Structure: A Comparative Analysis in Natural and Man-made Water Bodies of Different Trophic State. *Hydrobiologia*, 438(1):65-74
- ✓ Gaarder, T. & Gran, H. 1927. Investigations of the production of phytoplankton in the Oslo Fjord. *Rapp. P.V. Cons. Int. Explor. Mer*, 42, 1-48.
- ✓ García, E., 1990. "Climas", 1: 4000 000. IV.4.10 (A). *Atlas Nacional de México*. Vol. II. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- ✓ Golden software Surfer version 11. (1997-2011). Technologically advanced mapping and graphing solutions Inc.

- ✓ Gómez, M., Blancas A., Constanzo C. y Cervantes, S., 2014. Análisis de calidad de aguas residuales con aplicación a la micro escala. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. P.p. 204.
- ✓ González, C., Circe, G., Alcocer, J., Oseguera, L. 2015. Clorofila a fitoplanctónica en el lago tropical profundo Alchichica: un registro de largo plazo (1999-2010). Hidrobiológica [en línea], 25.
- ✓ Google Earth., 2017 NASA, INEGI. Transnavicom USA. Ltd., Europa Technology's.
- ✓ Hart, D., Stone, L y Berman, T. 2000. Seasonal dynamics of the Lake Kinneret food web: The importance of the microbial loop, Limnology and Oceanography Volume 45, Issue 2. P.p. 350–361.
- ✓ Hecky, R. & Fee, E. 1981. Primary production and rates of algal growth in Lake Tanganyika, Limnology and Oceanography, Vol. 26, Issue 3 P.p. 532–547.
- ✓ Hernández-Avilés, J., Galindo M. & Loera J. 2002. Bordos o microembalses: *In*: de la Lanza-Espino, G. & J. L. García-Calderón. (Comps.). Lagos y presas de México, 1ª Edición, AGT Editor S.A. P.p. 599-618. México, D.F
- ✓ Hoek, C. Van den., Mann, D. & H, Jahns. 1998. Algae: An introduction to phycology. Cambridge University Press. P.p. 627.
- ✓ Holland, D., Van Erp, I., Beardall, J., Perran, L. & Cook, M. 2012. Environmental controls on the nitrogen-fixing cyanobacterium *Nodularia spumigena* in a temperate lagoon system in SE Australia. Marine ecology progress series 461: P.p. 47-57.
- ✓ Hutchinson, G. 1957. A Treatise in Limnology. Geography Physics, and Chemistry. Wiley. N.Y. P.p 1015.
- ✓ Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. INAFED., 2010©. SEGOB Secretaría de Gobernación.
- ✓ Kirchman, D.L., Xosé, A.G., Morán & Ducklow, H. 2009. Microbial growth in the polar oceans role of temperature and potential impact of climate change. Nature Reviews/ Microbiology.
- ✓ Kishimoto, N., Yamamoto, C., Suzuki, K & Ichise, S. 2015. Does a Decrease in Chlorophyll a Concentration in Lake Biwa Mean a Decrease Primary Productivity by Phytoplankton? Journal of Water and Environment Technology, Vol. 13. No. 1.
- ✓ Komárek, J. & Kling, H. 1991. Variation in six planktonic *Cyanophyte* genera in Lake Victoria (East Africa). Algological Studies 61: P.p. 24-45.
- ✓ Komárek, J. & Komárková-Legnerová, J. 2002. Contribution to the knowledge of planktic cyanoprokaryotes from central México *Preslia*, Praha, 74: 207-233.
- ✓ Kosamu, I. & Obst, M. 2009. The influence of picocyanobacterial photosynthesis on calcite precipitation *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 6 (4), 557-562.
- ✓ Lagunas, S. & Martínez, D. 2015. Estructura de la comunidad del plancton procarionte en el lago volcánico hipo-salino y monomíctico cálido Atexcac, Puebla. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. P.p. 22-35.
- ✓ Lamper, W. & Sommer. 2007. "Limnoecology". The Ecology of Lakes and Streams. Second Edition. Oxford University Press. P.p 382-389.
- ✓ Lewis, Jr, W. 1974. Primary Production in the Plankton Community of a Tropical Lake. *Ecological Monographs*. Vol. 44. P.p. 377–409.

- ✓ Lewis, Jr, W. 1978. Analysis of succession in a tropical plankton community of a tropical and a new measure of succession rate. *American Naturalist*. 112. P.p 401-414.
- ✓ Lewis, Jr, W. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference. In F. Schiemer & K.T. Boland [eds.], *Perspectives in tropical limnology*, Amsterdam: SPB Academic Publishing P.p. 43–64.
- ✓ Lewis, Jr, W. 2002. Causes for the high frequency of nitrogen limitation in tropical lakes. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 28. P.p. 210–213.
- ✓ Lind, O., Doyle, R., Vodopich, D., Trotter, B., Limón, J & Dávalos, L. 1992. Clay turbidity: Regulation of phytoplankton production in a large, nutrient-rich tropical lake. *Limnol. Oceanogr.* 37:549-565.
- ✓ López, A., Espejo, A., Martínez, N y Ramírez, I. 2007. Dos nuevas especies de *Hechtia* (Bromeliaceae) de México. *Acta Botánica Mexicana*, enero P.p. 97-109.
- ✓ Macek, M., Alcocer, J., Lugo, A., Martínez-Pérez M., Peralta, L & Vilaclara, G. 2009. Long term picoplankton dynamics in a warm-monomictic, tropical high-altitude lake. *J. Limnol.*, 68(2): 183-192.
- ✓ Malone, T. 1980. *Algal size. The physiological ecology of phytoplankton*. Blackwell. Scientific Publications, Oxford, UK. P.p. 433-464.
- ✓ Marcos, B. y Reyes R. 2012 Variabilidad anual del picoplancton procarionte en el lago monomítico cálido “La Preciosa”, Puebla. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- ✓ Margalef, R. 1974. *Ecología*. Ediciones Omega, Barcelona, España. P.p. 951.
- ✓ Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona.
- ✓ Margalef, R. 1997b. Turbulence and marine life. *Scientia Marina* 61: 109-123.
- ✓ Marqués de Cantú, M. 1991. *Probabilidad y Estadística para Ciencias Químico Biológicas*, Mc.Graw-Hill, México.
- ✓ Martínez, C. 2010. Efecto de cladóceros y copépodos sobre el fitoplancton del lago La Preciosa, Puebla. Tesis de maestría. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- ✓ Montoya, Y. & Aguirre, N. 2010. Dynamics of the primary production of phytoplankton in tropical lake through the flood pulse. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*.
- ✓ Morán, V. 2016. Estructura de la comunidad fitoplactónica durante las etapas hidodinámicas del lago La Preciosa, Puebla. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- ✓ Morel, A., Yu-Hwan, Anh., Partensky, F., Vaulot, D & Claustre, H. 1993. *Prochlorococcus* and *Synechococcus*: A comparative study of their optical properties in relation to their size and pigmentation. *Jurnal of Marine Research*. P.p. 617-649.
- ✓ Muylaert, K., Van der Gucht, K., Vloemans, N., Meester, Luc De., Gillis, M & Vyverman, W. 2002. Relationship between Bacterial Community Composition and Bottom-Up versus Top-Down Variables in Four Eutrophic Shallow Lakes. *Applied and Environmental Microbiology*. American Society for Microbiology. Vol. 68 Num. 10. P.p. 4740–4750.

- ✓ Oliva, M., Lugo, A., Alcocer, J., Peralta, L & Sánchez, M. 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hidrobiologia*. 466: 299-306.
- ✓ Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) 1982. The OCDE Listo Social Indicators, Paris.
- ✓ Ortega, E., Sánchez, M^a R. y Ciros, J. 2005. ¿Puede la composición del fitoplancton determinar la limitación de recursos en el zooplancton en lagos monomícticos tropicales? 3er Congreso de la Asociación Mexicana de Limnología, pp. 46.
- ✓ Oseguera, L., Alcocer, J y Villareal, Q. 2015. Metabolismo lacustre de un lago tropical profundo: ¿Fuente o sumidero de carbono? *Hidrobiológica*, vol. 25, núm. 3, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Distrito Federal. México. P.p. 391-399
- Padisák, J., Barbosa, F., Koschel, R. & Krienitz, L. 2003a. Deep Layer *Cyanoprokaryota maxima* in Temperate and tropical lakes. *Archives of hydrobiology special Issues in Advanced Limnology*, Vol. 58, P.p. 175-199.
- ✓ Padisák, J., Krienitz, L., Kosche, R & Nedoma, J. 1997. Deep-layer autotrophic picoplankton maximum in the oligotrophic Lake Stechlin, Germany: origin, activity, Developmet and Erosion. *Eur. J. Phycol.* 32:403-416.
- ✓ Ramos E., Alcocer J., Ortega E., y Camacho A. 2008. Nitrógeno: elemento limitante para el crecimiento fitoplanctónico en un lago oligotrófico tropical. *Hidrobiológica* vol.18 supl. México.
- ✓ Revilla, M., Iriarte, A., Madariaga, I. & Orive, E. 2000. Bacterial and phytoplankton dynamics along a trophic gradient in a shallow temperate estuary. *Estuarine Coastal Shelf Science*. 50, 297–313.
- ✓ Reynolds, C. S. 1984. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press. Cambridge. 384 p.
- ✓ Reynolds, C. S. 1994. The long, and short and stalled: on the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers. *Hidrobiología*. P.p. 289:9-21.
- ✓ Rojas, R. 2017. Evaluación anual de la productividad primaria y del contenido de clorofila “a” en el lago cráter, Atexcac, Puebla. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- ✓ Ryther, J. H. 1956. Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. *Limnology and Oceanography*. 1:61-70.
- ✓ Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. 1ra Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. P.p. 504.
- ✓ Salas, H. & Martino, P. 1991. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS), Casilla 4337, Lima, Perú. P.p. 100.
- ✓ Pick, F.R. 1991. The abundance and composition of freshwater picocyanobacteria in relation to light penetration. *Limnol. Oceanogr.*, 36: 1457-1462.
- ✓ Salgado-Ugarte. 2010. Métodos estadísticos exploratorios y confirmatorios para análisis de datos. Un enfoque biométrico. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

- ✓ Sarmento, H., Isumbisho, M & Descy, Jean-Pierre. 2006. Phytoplankton ecology of Lake Kivu (eastern Africa), *Journal of Plankton Research*, Vol. 28, Issue 9, P.p. 815-829.
- ✓ Schliep, M., Caviglasso, G., Quinnell, R., Stranger, R & Larkum, A. 2012. "Formyl group modification of chlorophyll a: a major evolutionary mechanism in oxygenic photosynthesis". Blackwell Publishing Ltd, *Plant, Cell & Environment*.
- ✓ Servicio Meteorológico Nacional. 2015. CONAGUA. México. <http://smn.cna.gob.mx>.
- ✓ Sieburth, J. Mc, N., Smetacek V. & Lentz J. 1978. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic components of the plankton and their relationship to plankton size-fractions. *Limnol. Oceanogr.* 23:1256-1263.
- ✓ Staehr, P., Testa, J., Kemp, M., Cole, J., Sand-Jensen & Smith, S. 2010. "The metabolism of aquatic ecosystems: history, applications, and future challenges." Springer. *Aquatic Sciences*.
- ✓ Statgraphics Centurion X.V.I. 2009. Versión 16.1.11 (32 bits). Statpoint technologies Inc.
- ✓ Steitz, A. & Velimirov, B. 1999. Contribution of Picocyanobacteria to total primary production and community respiratory losses in a backwater system. *Journal of Plankton Research* Vol.21 no.12 P.p. 2341–2360.
- ✓ Stockner, J. 1991. Autotrophic Picoplankton in Freshwater Ecosystems: The View from the Summit. *Int. Revue ges. Hydrobiol. Hydrogr.* 76: 483–492.
- ✓ Stockner J., Callieri C. & Cronberg G. 2000. - Picoplankton and other non-bloom-forming cyanobacteria in lakes. In *the Ecology of Cyanobacteria*. Whittion B.A. & Potts M. (eds). Kluwer Academic Publishers. Netherlands. P.p. 195-231.
- ✓ Stockner, J. & Anita N. 1986. Algal picoplankton from marine and fresh-water ecosystems: a multidisciplinary perspective. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43:2472-2502.
- ✓ Stronge, K., Smith, R. & Lennox, D. 1998. Predicting the spring algal biomass in Lough Neagh using time series analysis. *Freshwater Biology* 39: 593-600.
- ✓ Takahashi, M., Hama, T., Matsunaga, K & Handa, N. 1995. Photosynthetic organic carbon production and respiratory organic carbon consumption in the trophogenic layer of Lake Biwa, *Journal of Plankton Research*, Volume 17, Issue 5, 1, P.p. 1017–1025
- ✓ Talling, J. & Lamoale, J. 1998. *Ecological Dinamics of Tropical Island Waters*. Cambridge University Press. United Kingdom.
- ✓ Talling, J. & Talling, I. 1965. *The Chemical Composition of African Lake Waters*. Freshwater biological Association. Ambleside. England. *Int. Revneges. Hydrobiol.* 50. P.p 1-32.
- ✓ Talling, J. 1965. The photosynthetic activity of phytoplankton in East African lakes. *International reviews Hydrobiology. Hydrogr.* Vol. 50: 1–32.
- ✓ Thompson, J., Schultze-Lam., Beveridge, T & Des Marais, D. 1997. Whiting events: Biogenic origin due to the photosynthetic activity of cyanobacterial picoplankton. *Limnol. Oceanogr.* 42(1), 1997, 133-141. 1-9 pp.
- ✓ Universidad de Puerto Rico. Recinto universitario de Mayagüez. UPRM.EDU. 2015. Segunda parte Parámetros físicos-químicos: alcalinidad <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf>.

- ✓ Valdespino, P., Alcántara, R., Alcocer, J., Merino, M., Macek, M y Falcón, L. 2014. Alkaline phosphatases in microbialites and bacterioplankton from Alchichica soda lake, Mexico. *Microbiology Ecology*. FEMS. Published by John Wiley & Sons Ltd. Vol. 90, Issue 2. P.p. 504–519.
- ✓ Vincent, W., Wurtsbaugh, W., Vincent, C., Richerson, P. 1984. Season dynamics of nutrient. Limitation in a tropical high-aititude lake (Lake Titicaca, Peru-Bolivia): Application of Physiological bioassays. *Limnol. Oceanogr.*, 29: 540-552.
- ✓ Wannicke, N., Endres, S., Engel, A., Grossart, H., Nausch, M., Unger, J. & Voss, M. 2012. Response of *Nodularia spumigena* to CO₂⁻ Part 1: Growth, production and nitrogen cycling. *Biogeosciences; Katlenburg-Lindau*. 9.8. 2973-2988.
- ✓ Webber, H. & Thurman, H. 1991. *Marine Biology*. 2nd ed. Harper Collins Publishers Inc., New York, NY (USA).
- ✓ Weithoff, G., Lorke, A. & Walz, N. 2000. Effects of water-column mixing on bacteria, phytoplankton, and rotifers under different levels of herbivory in a shallow eutrophic lake. *Oecologia*, 125, 91–100.
- ✓ Welschmeyer, N., 1994. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. *Limnology and Oceanography* 39(8): 1985-1992.
- ✓ Wetzel, R. & Likens, G. 1990. *Limnological Analyses*, 2nd edn. Springer, New York. P.p. 319.
- ✓ Wetzel, R. G. & Likens, G.E. 1979. *Limnological Analysis*. Third Edition. NY USA. Ed. Springer. P.p. 15-30, 429-433
Wetzel, R. G. & Likens, G.E. 2000. *Limnological analyses*. 3 ed. Springer-Verlag, New York. P.p. 429.
- ✓ Wetzel, R. G. 1983. *Periphyton of freshwater ecosystems*. Developments. Hydrobiology. 17. Dr. W. Junk BY Publ., The Hague, P.p. 73-79.
- ✓ Wetzel, R. G. 2001. *Limnology "Lake and River Ecosystems"* Third Edition. Academic Press, P.p. 9- 33.
- ✓ Wood. E., Armstrong, F. & Richards, F. 1967. Determination of nitrate in seawater by cadmium copper reduction to nitrite. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 47: 23-31.

Anexo 1

1. Método 445.0. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory (Arar & Collins, 1997). Titulado y traducido al español "Determinación *in vitro* de clorofila *a* y feofitina *a* en algas marinas y de agua dulce por fluorescencia". Fluorómetro (Turner Desings 10 AU).

a). Empuje a la parte inferior del tubo con una varilla de vidrio. Con una pipeta volumétrica, añadir 4 ml de la solución de acetona acuosa para el tubo de trituración. Moler el filtro hasta que se ha convertido en una suspensión.

b). Verter la mezcla en un tubo de centrífuga con tapón de rosca de 15 ml y, utilizando una pipeta volumétrica de 6 ml, enjuagar el tubo de trituración con acetona al 90%. Añadir el enjuague al tubo de centrífuga que contiene la suspensión de filtro. Tapar el tubo y agitar vigorosamente.

c). Colóquelo en la oscuridad antes de proceder a la siguiente extracción del filtro. Antes de colocar otro filtro en el tubo de trituración, utilizar las botellas de acetona y enjuague al chorro de agua cuidado de enjuagar bien el tubo y la varilla de vidrio esmerilado.

d). El último enjuague debe ser con acetona. Utilice un paño limpio para eliminar cualquier residuo de la filtración que se adhiere al mortero o la varilla de acero del mortero. Continúe con el siguiente filtro y repetir los pasos anteriores. Toda la extracción con la transferencia y enjuague tarda 5 min. En este paso se gasta aproximadamente 500 ml de acetona por cada 20 muestras de agua y por el enjuague de materiales de vidrio y aparatos.

e). Agitar vigorosamente cada tubo antes de colocarlas en la oscuridad y a una temperatura de ~4 °C. Las muestras se dejan reposar durante un mínimo de 2 h, pero que no exceda de 24 h. Los tubos deben agitarse al menos una vez durante el período de maceración.

f). Cuando la maceración se haya completado, agitar los tubos vigorosamente y posteriormente los filtros se mantuvieron en la obscuridad a baja temperatura durante 24 hr para asegurar la extracción completa de los pigmentos se almacenan en tubo de plástico para centrifugar.

g). Una vez trascurrido el tiempo las muestras se centrifugan durante 20 min a 2000 rpm o durante 30 min a 1500 rpm. Una vez trascurrido el tiempo de centrifugación sacar las muestras, y permitir que alcancen una temperatura ambiente antes de su análisis. Esto se puede hacer mediante la colocación de los tubos en un baño de agua maría a temperatura constante o al dejarlos reposar a temperatura ambiente durante 30 min.

h). Transcurrido el tiempo se leyó la fluorescencia del sobredenante con un fluorómetro Turner Designs 10 AU por el método de Welschmeyer, (1994).

Anexo 2



A) Las células amarillas de *Nodularia cf. spumigena*. son heterocistos (10 μm)
<http://ccba.ug.edu.pl>.



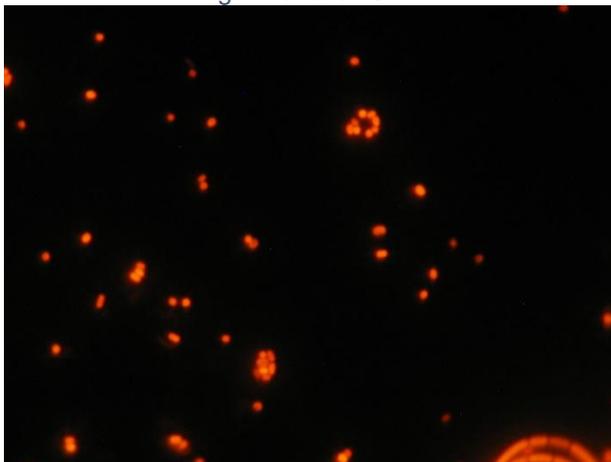
B) El Máximo esplendor de *Nodularia cf. spumigena* se presentó en marzo 2014.



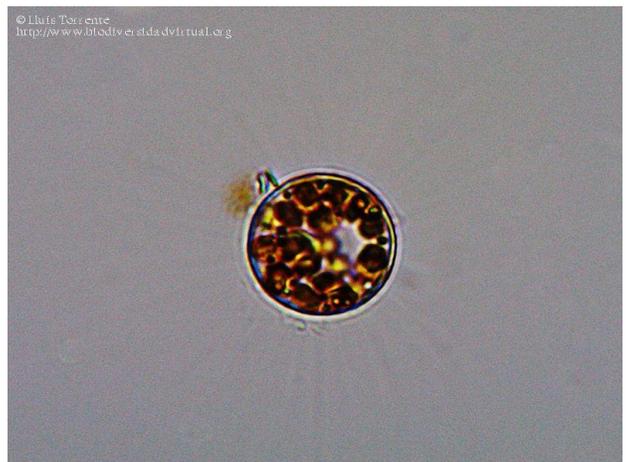
C) Evento de emblanquecimiento en el lago Atexcac 2014.



D) Evento de emblanquecimiento en el lago La Preciosa 2014.



E) Picocianobacterias (10 μm) en el lago La Preciosa 2014.



F) *Cyclotella sp.* Luis Torrente 2016.
<http://biodiversidadvirtual.org>