



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“ZARAGOZA”

**DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DEL PICOPLANCTON HETEROTRÓFICO Y
NANOFLAGELADOS EN DOS LAGOS MAAR, CON DIFERENTE SALINIDAD EN
MÉXICO.**

ÁREA: LIMNOLOGÍA

Jesús Rodríguez Núñez

Dr. Justo Salvador Hernández Avilés

Director de tesis

CDMX, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*“Tarda en llegar y al final,
al final, hay recompensa”*
Mercedes Sosa, Gustavo Cerati.

*“Al final del viaje estamos tú y yo intactos,
quedamos los que puedan sonreír
en medio de la muerte, en plena luz”*

Silvio Rodríguez.

*“El nitrógeno en nuestro ADN, el calcio en nuestros dientes, el hierro en nuestra sangre y el
carbono en nuestras tartas de manzana fueron hechos en el interior de las estrellas.
¡Estamos hechos de polvo de estrellas!”*

Carl Sagan.

Agradecimientos Institucionales

Es un honor pertenecer a la Universidad Nacional Autónoma de México a quien agradezco por haberme otorgado un espacio en sus instalaciones, hacer uso de sus herramientas y mobiliario, el cual fue fundamental y pilar de mi desarrollo académico. La universidad formó mi carácter dentro y fuera de ella para poder colocarme en el ámbito cultural, social y laboral.

Dentro de la máxima casa de estudios mi lugar en esta formación pertenece a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza a quien agradezco el espacio y su modelo de estudio que me permitió desarrollar mis habilidades y aptitudes para así lograr el mejor desarrollo académico.

En esta etapa de mi crecimiento y desarrollo quiero agradecer al laboratorio de limnoecología en especial al Dr. Justo Salvador Hernández, quien para mi más que mentor, profesor, director de esta tesis, es un increíble ser humano que siempre apoya incondicionalmente a quien lo necesita y sabe el valor de la amistad. Muchas gracias por toda su paciencia y todas sus enseñanzas.

Agradecimiento pleno a mis sinodales y asesores de tesis, Dra. Eloisa Guerra, M. en C. Eunice González, Dr. Guillermo Blancas y Biól. José Luis Guzmán. Quienes, gracias a ellos por sus observaciones y correcciones, aportaron sus conocimientos para el mejoramiento en calidad de este trabajo.

Agradezco a la Facultad de Estudios Superiores Iztacala en especial al Dr. Miroslav Macek por permitirnos hacer uso de su laboratorio y microscopio para el procesamiento de las muestras biológicas, las cuales se ven reflejados los resultados en este trabajo.

A mi familia

Mamá:

Para el amor mas grande de mi vida de quien estoy completamente agradecido por estar siempre caminando junto a mí y apoyándome en todo momento, por los valores que me inculcaste, todos tus consejos, los desvelos, por siempre creer en mi y ser la mejor madre por la cual yo me siento bendecido del amor que siempre tu me das. A ti María A. Núñez siempre estaré agradecido por haberme traído a este mundo, cuidar de mí y cobijarme en todo momento donde nunca nos hizo falta nada.

Abuelo:

Aunque ya no estes entre nosotros, se que desde donde te encuentres te sentirás orgulloso del ser humano que dejaste en mí. Y es por ti abuelo Elfego Castillo que aprendí a valerme, esforzarme, luchar todos los días para salir adelante con todas tus enseñanzas. Gracias por todas las veces que tenías una historia de vida que contarme. Gracias por estar siempre pendiente y porque nunca nos faltara nada a mi madre y a mí. Tu partida marco un cambio en mi vida y es hoy que mirando al cielo te entrego este gran paso en mi vida.

Hermanos

Sandra, Lidia, Ricardo, Tomás... Familia Soriano. Muchas gracias por aguantarme, me siento agradecido por toda su confianza en mi y brindarme de todo su apoyo, consejos y esas palabras de aliento a seguir adelante para poder llegar a este momento. Me siento bendecido por la familia que tengo y que siempre me trataran como su hermano favorito.

Sobrinos

Mi pequeña gran familia de sobrinos... Derain, Sandra, Daniela, Brandon, Mitzy, Melina, Luisa, Santiago y Karla quienes a lo largo de este tiempo les agradezco todo su apoyo y motivación para impulsarme a desarrollarme profesionalmente, pero sobre todas las cosas mantener siempre unida a la familia y regalarme su cariño incondicional. En cada uno de nosotros siempre vivirá una persona especial en nuestros corazones que nos dejó marcado su cariño y esa forma en la que el concebía el mundo. Hugo, te agradezco todo lo que en mi dejaste y esa gran lección de vida por la cual hoy te dedico especialmente este gran logro en mi carrera profesional.

Agradecimientos personales

De este lado del camino mi agradecimiento a cada de las personas quienes dejaron marcada su esencia, su valor y la gran amistad con la cuál desinteresadamente me guiaron dejando momentos inolvidables.

Ustedes dos son pilares fundamentales en mi vida, quienes me han visto crecer y compartir esta hermosa amistad que valoro con toda mi alma. Anallely y Samantha, el estar conmigo significa mucho y les quiero agradecer por siempre estar en mis mejores y peores momentos, por darme siempre su mano y ese consejo que me ayudo a ser más fuerte día a día. Amor a mis dos hermanas.

Mi viejo amigo David, cómplice de mi niñez y juventud. Tú eres quien marcó este sendero de mi desarrollo profesional y personal. Agradezco el encontrarnos y formar una de mis mejores amistades con quien crecí y a quien considero mas que un amigo, mi hermano.

Amigos del CCH-N en especial para Rafa, Alejandra, Mitzy, Rodrigo, Roberto y Carlos quienes me siento orgulloso de conservar de su amistad hasta el día de hoy, así como permitirme poder ver su crecimiento. Mi agradecimiento por siempre confiar y apoyarme en mi desarrollo profesional.

Amigos de la FES-Zaragoza: Andrea, Marco G., Alan, Omar, Natalia, Marlene, Karen, Ivonne, Thelma, Iván, Ulises, Víctor, Erik y Marco M. la lista es larga y eso me hace muy feliz porque cada uno de ellos forman una parte importante y el agradecerles por esa amistad incondicional. Toda una gran aventura estar con ustedes, las risas no faltaron.

Mención especial para una gran mujer a la que admiro y no solo por su bella inteligencia, además posee una luz muy brillante y el haberla conocido provocó que me reencontrara con la Biología. Beatriz, gracias a ti me impulsaste a superarme personal y profesional.

Amigos del laboratorio de limnología, Ana, Itza, José de Jesús, Omar, Iván A., Ulises, Alexei, Jovas, Ara, Jesús, Lore, Cecilia, Ramiro, Cesar, Alberto, Jair, Iván L., Fernanda, Vicky y Moisés. Todos ustedes me dieron la fuerza necesaria para poder seguir adelante y motivarme a poder alcanzar esta meta en mi vida. Pero, sobre todo gracias por esa gran amistad y siempre hacerme sentir parte del gran equipo del laboratorio.

Dentro de mi desarrollo laboral en el cine, en el acuario y en la supervisión de áreas verdes existen muchas personas que conocieron un pedazo de mi historia de vida y que gracias a su apoyo me impulsaron a no dejarme vencer en todos mis obstáculos. Especialmente a Monse, Leopoldo y Cecilia agradezco haberlos conocido y formar un excelente equipo de trabajo, muchos fueron los problemas y justo por nuestra dedicación logramos alcanzar muchos retos.

A mis jefes Nely, Alejandra, Daniel quienes agradezco todas las veces que me permitieron acomodar mis tiempos y todo el espacio para que pudiese concluir esta etapa académica, así como ese consejo que me ayudo a poderme superar dentro y fuera del trabajo.

Para ti Ximena que siempre estuviste pendiente muchas veces mi avance en la titulación y no sólo eso, agradezco todo el cariño y aunque existieron intermitencia entre los dos, siempre supimos que nos podíamos tender la mano cuando más lo necesitábamos y poder así también compartir las alegrías y triunfos personales.

Existen muchas más personas quienes me vieron crecer, me hicieron daño y me fortalecieron con el tiempo. Aun así, les guardo un cariño especial y el respeto agradeciéndoles todo el camino recorrido. Mantengo la esperanza de que el destino algún día nos haga coincidir para poderles decir, "gracias por ser parte de mi vida".

INDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
ZONA DE ESTUDIO.....	5
JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
HIPÓTESIS.....	9
OBJETIVOS.....	9
Objetivo general.....	9
Objetivos particulares.....	9
MÉTODO.....	10
Trabajo de laboratorio.....	11
Trabajo de gabinete.....	12
RESULTADOS.....	13
Parámetros físico-químicos en lago Atexcac y lago La Preciosa.....	13
Temperatura.....	13
Estratificaciones del lago Atexcac.....	14
Estratificaciones del lago La Preciosa.....	15
Oxígeno disuelto.....	16
Alcalinidad y pH.....	18
Conductividad y total de sólidos disueltos.....	20
Nutrimentos.....	22
Fósforo total.....	22
Fósforo reactivo soluble.....	22
Nitrito.....	24
Nitrato.....	25
Amonio.....	26
Parámetros biológicos.....	28
Distribución espacio-temporal del picoplancton heterotrófico en Lago Atexcac.....	28
Distribución espacio-temporal del picoplancton heterotrófico en lago La Preciosa.....	33
Distribución espacio-temporal de nanoflagelados heterotróficos en lago Atexcac.....	39
Distribución espacio-temporal de nanoflagelados heterotróficos en el lago La Preciosa.....	45
Correlaciones entre la densidad y biomasa del picoplancton heterotrófico en el lago Atexcac.....	51

Correlaciones en la densidad y biomasa de nanoflagelados heterotróficos en el lago Atexcac.....	53
Correlaciones en la densidad y biomasa del picoplancton heterotrófico en el lago La Preciosa.....	54
Correlaciones en la densidad y biomasa de nanoflagelados heterotróficos en el lago La Preciosa.....	55
Comparación de la componente biológica entre el lago Atexcac y el lago La Preciosa.....	56
DISCUSIÓN.....	58
Temperatura, oxígeno y zona eufótica.....	58
Alcalinidad y pH.....	61
Salinidad y Conductividad.....	61
Nutrimentos.....	62
Fósforo reactivo soluble y fósforo total.....	63
Nitrógeno inorgánico (Amonio, Nitrito y Nitrato).....	65
Componente biológica.....	67
CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS	75

RESUMEN.

Los estudios de la componente microbiana de los cuerpos acuáticos epicontinentales se han desarrollado principalmente en las regiones templadas, siendo escasos para la zona tropical. Por lo que en la presente investigación se evaluaron la abundancia y distribución del picoplancton heterotrófico (PPH) y nanoflagelados (NFH) en dos lagos maar con diferente salinidad La Preciosa sistema subsalino (1 g L^{-1}) y Atexcac hiposalino (6 g L^{-1}), ambos cuerpos de agua pertenecientes a la cuenca Oriental, Puebla, para determinar su papel dentro del circuito microbiano. Se hipotetizó una mayor abundancia y biomasa de ambos grupos asociados con una menor salinidad. Para tal fin, se realizaron muestreos mensuales a lo largo de la columna de agua de febrero a noviembre del 2015, con la evaluación de parámetros físico-químicos tales como temperatura, oxígeno disuelto, alcalinidad, durezas, conductividad y nutrientes. Los microorganismos de estudio se fijaron en muestras de agua con formol al 2% y se filtraron en membranas negras de policarbonato de $0.2 \mu\text{m}$ para el PPH y en membranas negras de $3.0 \mu\text{m}$ para los NFH, se tiñó su ADN con el fluorocromo DAPI y se realizaron conteos con luz UV con un microscopio de epifluorescencia en 100x. Para ambos lagos se encontró que el picoplancton heterotrófico y los nanoflagelados estuvieron asociados con la monomixis cálida del lago, donde las mayores abundancias para ambos grupos se encontraron durante la estratificación térmica en el epilimnion asociada con una mayor concentración de oxígeno disuelto y en metalimnion por la acumulación de nutrientes en la termoclina, con una disminución consecutiva hacia el hipolimnion que tendió a la anoxia. Se descartó que la diferencia de salinidad afectara las abundancias y biomásas del PPH al no encontrar diferencias espacial y temporal en ambos lagos. Mientras que para los NFH si existieron diferencias, así en el lago Atexcac presentó menores valores para ambos parámetros biológicos, por lo que desempeña un papel secundario en los procesos de depredación bacteriana. Para el lago La Preciosa la abundancia y biomasa pudo estar limitada por depredación de organismos superiores al tener una estructura trófica más compleja por la presencia de peces, lo que implica un circuito microbiano más desarrollado.

INTRODUCCIÓN.

En México los cuerpos de agua continentales son de suma importancia para las comunidades bióticas que se desarrollan tanto en el sistema como a sus alrededores. Además, estos sistemas son los principales aportadores de la productividad primaria de comunidades planctónicas. Anteriormente, se creía que toda la productividad de los ecosistemas acuáticos estaba sostenida exclusivamente por la producción primaria de la comunidad fitoplanctónica (Steele, 1974). Este modelo clásico de las cadenas tróficas acuáticas muestra un flujo unidireccional de la energía que comienza con los productores primarios, seguido por una serie de consumidores. Sin embargo, surgieron algunas interrogantes relacionadas con las vías que toma el carbón orgánico (particulado y disuelto) en los ecosistemas acuáticos. Según este modelo la mayor parte del carbono orgánico particulado proviene directamente del fitoplancton, no obstante, estudios recientes sugieren que la materia orgánica derivada de las bacterias podría ser la fuente principal de este recurso en los procesos del ciclo del carbono y otros procesos biogeoquímicos del agua (Cottrell y Kirchman, 2000).

Johannes (1964) sugirió que los protistas nanoheterótrofos eran más importantes que los copépodos en la remineralización del fósforo; los primeros desarrollos técnicos en el estudio de las comunidades microbianas y su metabolismo llegó a finales de los años 70 (Hobbie *et al.*, 1977). Pomeroy (1974) fue el primero en sugerir con fundamentos que las bacterias deberían incluirse en la red alimenticia marina; y Sorokin (1971 y 1981) argumentó que los microorganismos debían desempeñar un papel dinámico y central en las redes tróficas. Sieburth *et al.* (1978) coloca un sistema de caracteres dimensionales y taxonómicos para poder estudiar el plancton clasificándolo de picoplancton (0.2–2 μm), nanoplancton (2–20 μm), microplancton (20–200 μm) y macroplancton (200–2000 μm). Todas estas opiniones y las de varios especialistas se sintetizaron finalmente en el concepto del circuito microbiano dentro de la red de alimentación planctónica (Azam *et al.*, 1983). La comunidad de picoplancton heterotrófico (PPH) es el componente biológico más importante en la transformación y mineralización de la materia orgánica en los sistemas acuáticos, y su

biomasa constituye una gran parte del total de las bacterias planctónicas en los sistemas limnéticos (Simon *et al.*, 1992).

El procesamiento de materia orgánica por parte de bacterias ya había sido estudiado por Pomeroy (1974). A partir de entonces, la ecología del plancton experimentó un cambio de paradigma, al reconocer el papel de los microorganismos heterotróficos en el reciclaje de la materia orgánica disuelta (Fenchel, 1998) y, además la influencia de las redes tróficas bentónicas en el flujo de carbono en la región pelágica. De acuerdo con Azam *et al.* (1983), se trata del proceso, por parte de las bacterias, del carbono orgánico disuelto (COD) producido por las algas, seguido de un consumo de esas bacterias por parte de los protozoos, lo que permite la transferencia de energía para los niveles tróficos superiores y, por lo tanto, el control (junto con la producción primaria) de la productividad de los ecosistemas acuáticos (Kerner *et al.*, 2003). Estas bacterias heterotróficas son consumidas directamente por protozoos y zooplancton (Hobbie, 1988; Ventela *et al.*, 2002) cambiando la idea de una red trófica lineal, en la medida en que el circuito microbiano podía transferir una gran cantidad de energía (10-50% del carbono de la fotosíntesis) a través de la vía alternativa: COD - bacteria - protozoos (Azam *et al.*, 1983). Según Work *et al.* (2005); el carbono de las bacterias representa 25% del total que pasa para el mesozooplancton y casi la mitad del carbono que va para el microzooplancton y protozoos. Una de las consecuencias obvias de la inclusión del circuito microbiano en el análisis de una red trófica, es que existen más niveles tróficos de los que son generalmente aceptados, y que solo una pequeña fracción del carbono orgánico producido llega a los niveles tróficos superiores (Tranvik, 1992; Jansson *et al.*, 2000).

Las bacterias debido a su pequeño tamaño no pueden ser consumidas eficientemente por la mayoría del mesozooplancton (Sanders y Wickham, 1993), pero sí por el nano y microzooplancton (flagelados holozóicos, ciliados, rotíferos y estadios juveniles de otros metazoos) (Sanders *et al.*, 1992; Stabell, 1996) que a su vez son alimento del metazooplancton e incluso de pequeños peces, siendo los nanoflagelados y nanociliados los más importantes en la depredación bacteriana (Fenchel, 1986; Sherr y Sherr, 1987, 1988; Šimek *et al.*, 1995; Montagnes *et al.*, 2008).

Los nanoflagelados heterotróficos (NFH) han recibido atención en los últimos años debido a su particular consumo de bacterias; ya que este puede ser mucho más efectivo que otros consumidores. En algunos cuerpos de agua dulce se ha comprobado que el consumo de bacterias por nanoflagelados es una de las causas que limitan su crecimiento poblacional (Sigee, 2005). Llegando también a afectar la composición taxonómica, la estructura morfológica y la actividad de la comunidad bacteriana (Adamczewski, 2010). Así mismo, los protozoarios se encuentran implicados en importantes procesos en sistemas de agua dulce: participan en el llamado “microbial loop”; son intermediarios entre la materia orgánica y organismos superiores; controlan las poblaciones de bacterias y algas; reciclan nutrientes inorgánicos y participan en la transferencia de carbono, por lo que su presencia en los cuerpos de agua epicontinentales y marinos es fundamental para su buen funcionamiento (Gasol, 1995). Es por ello, que se realiza el presente estudio en los lagos de Atexcac y La Preciosa en Puebla, México. Para ofrecer un aporte descriptivo de las dinámicas espacio temporal del picoplancton heterotrófico y nanoflagelados dando una descripción puntual a lo largo de un ciclo anual de su comportamiento limnológico y su interacción con el circuito microbiano.

ANTECEDENTES.

El estudio de los lagos tropicales empieza a despertar un mayor interés por su dinámica química y biológica, especialmente los de tipo maar en México, este conjunto de lagos denominados axalapascos se localizan dentro de la cuenca Oriental, dentro de estos, se encuentra uno de los más estudiados el lago de Alchichica en donde Hernández *et al.* (2012) describió la composición dinámica del picoplancton procariota, tanto el picoplancton heterotrófico como el autotrófico registraron sus picos más altos en el periodo de la mezcla e inicios de la estratificación donde existía una mayor concentración de nutrientes y posteriormente con la estratificación la abundancias fueron disminuyendo. Con la técnica de Fluorescence *in situ* hybridization (FISH) determinaron la composición de dominios *Bacteria* y *Archaea* resaltando *Proteobacteria*, del género *Paracoccus* como principal desnitrificante y bacterias sulfato reductoras como responsables de enriquecer los estratos más profundos.

Por una parte, González-Flores (2017) evaluó la composición y distribución de Archaea bacteria y grupos de clase Alphaproteobacteria dentro de estos, el género *Paracoccus*, la clase Betaproteobacteria, Deltaproteobacteria y Gammaproteobacteria, usando la técnica de (CARD-FISH) durante un ciclo anual comprendiendo las etapas de estratificación y de mezcla en el lago La Preciosa. En el mismo periodo Arellano-Posadas (2017) durante el ciclo anual en el lago Atexcac precisó la abundancia y distribución espacio-temporal del picoplancton procarionte con el dominio Archaea, bacteria y grupos específicos con la técnica de (CARD-FISH).

Una pregunta de investigación importante es identificar los mecanismos que operan dentro del circuito microbiano así, la abundancia del picoplancton en los sistemas pelágicos puede ser regulado por los controles ascendentes “Bottom-Up” (Disponibilidad de nutrientes) y descendentes “Top-Down” (Depredación) (Weisse, 1993; Gasol, 1994; Stockner *et al.*, 2000). En el caso del lago Atexcac, Moreno, (2018) realizó una evaluación experimental del control descendente “Top-Down” en donde el efecto de depredador-presa no se cumplió debido a una baja concentración en la abundancia de los nanoflagelados y que probablemente por mecanismos de supervivencia el tamaño celular del picoplancton fue menor para evitar ser consumido por los niveles superiores.

ZONA DE ESTUDIO.

Los lagos se encuentran localizados en la cuenca Oriental situada en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz en las coordenadas los 18° 48' y 19° 43' de latitud Norte y 97°09' y 98°03' de longitud Oeste (Gasca, 1982). Conforman esta cuenca dos llanos de origen lacustre, conocidos como San Andrés y San Juan, ubicados al noreste de la Meseta Poblana entre los poblados de San Salvador el Seco y Perote. En los llanos de San Andrés se ubican los axalapascos de Aljojuca y Tecuitlapa y en los de San Juan; San Luis Atexcac, La Preciosa (Las Minas), Quechulac y Alchichica (Arredondo-Figueroa, 2002).

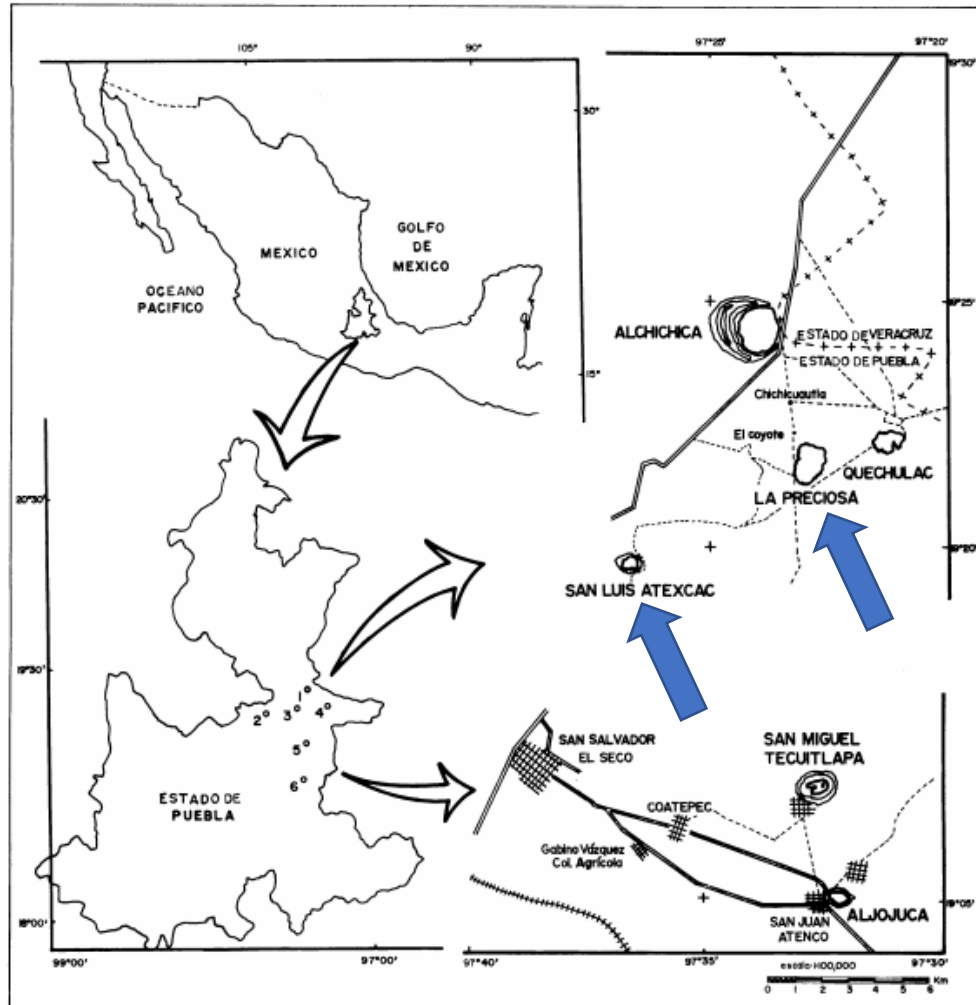


Fig. 1. Ubicación geográfica de los lagos Atexcac y La Preciosa (Arredondo-Figueroa, 1983).

El lago de San Luis Atexcac es un lago cráter tipo maar y de tipo oligo-mesotrófico (Cárcamo, 2017). Se localiza en las coordenadas geográficas de los paralelos $19^{\circ} 19' 50.68''$ - $20^{\circ} 20' 12.30''$ de latitud norte y los meridianos $97^{\circ} 26' 45.99''$ - $97^{\circ} 27' 15.37''$ de longitud oeste cerca del poblado de San Luis Atexcac, Municipio de Guadalupe Victoria, Puebla. Su altitud es de 2340 m s.n.m. Presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, C(w) (w) (i) g, de acuerdo con la clasificación de Köppen y modificado por García (2004). La precipitación promedio anual es inferior a los 500 mm. De acuerdo con Rzedowski (1981), la región presenta provincias florísticas conocidas como serranías meridionales y altiplanicie. La vegetación nativa en gran parte de la zona ha sido sustituida por cultivos; sin

embargo, el cráter se encuentra aislado de ellos por sus paredes elevadas, predominando el llamado izotal de yuca (*Yucca sp* y *Nolina sp*), matorral desértico de lechuguilla, agave lechuguilla o magueyes (*Agave spp*) y nopales (*Opuntia spp*).

La forma del lago es irregular, próxima a una elipse, cuya longitud máxima es de 780 m. La parte central del lago presenta una fuerte inclinación que llega a una profundidad de 30 m., sin embargo, la zona más profunda se encuentra ligeramente desplazada hacia el este y alcanza aproximadamente los 39 m., el volumen del lago es de 6,150,000 m³ y un área superficial de 0.29 km² (Arredondo-Figueroa, 1983). En trabajos recientes se ha notado una disminución del nivel de agua, registrándose una profundidad máxima de 34 m (Moreno, 2018).

El lago se clasifica como hiposalino y atalasoalino 6.0 mg L⁻¹, su componente químico es alcalino, donde predomina bicarbonatos sobre carbonatos y sulfatos a un pH de 8.6 ± 0.84 con predominancia de sodio y bicarbonatos, la temperatura promedio del lago oscila de 16 a 20°C a lo largo del año (Armienta *et al.*, 2008). El lago es monomíctico cálido donde la mezcla se lleva a cabo entre los meses de enero y marzo; permaneciendo estratificado el resto del año (Fig. 2).



Fig. 1. Vista del Lago Atexcac, Puebla. Fotografía tomada el 25 de septiembre 2015, autor Jesús Rodríguez Núñez.

El lago La Preciosa su forma se aproxima a una base triangular, se ubica entre los paralelos 19° 22' 32.78" – 19° 21' 49.14" de latitud norte y los meridianos 97° 22' 56.77" – 97° 23' 30.58" de longitud oeste, a una altitud de 2,330 m s.n.m. Presenta una profundidad máxima de 43 m, una longitud máxima de 1,300 m, un área superficial de 0.78 km² y un volumen de 18,200,000 m³ (Arredondo-Figueroa, 1983). Presenta una baja salinidad de 1.4 g L⁻¹ como consecuencia de ello existe una rica ictiofauna con dos especies endémicas *Poblana*

alchichica squamata y *Poblana letholeptis*, así como cierta abundancia de aves, anfibios y reptiles lacustres. En cuanto a la vegetación nativa presenta pastizales y una pequeña extensión de bosques de pino en los alrededores, aunque la mayor parte la componen cultivos introducidos principalmente de alfalfa (Marcos y Reyes, 2012).

La cubeta de La Preciosa está formada por cenizas semiconsolidadas de pómez y material andesítico muy fino y su forma es triangular. La zona litoral del lago se caracteriza por ser dulceacuícola con aguas templadas (21.0 ± 1.8 °C) y con una concentración de oxígeno disuelto de media a elevada (8.6 ± 1.7 g L⁻¹). Sus sedimentos están compuestos principalmente de arenas gruesas a finas, el sustrato se encuentra parcialmente cubierto por macrófitas acuáticas y algas bentónicas (Arredondo-Figueroa, 2002).



Fig. 2. Vista del Lago La Preciosa. Fotografía tomada el 1 de agosto del 2015, autor Jesús Rodríguez Núñez.

JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.

El estudio de la componente microbiana es incipiente en las zonas tropicales. El PPH es considerado como el componente más importante para los procesos de la descomposición de la materia orgánica y algunos procesos biogeoquímicos y en la transferencia de carbono a través de su consumo por los nanoflagelados heterotróficos (NFH) principalmente, cumpliendo así un papel importante en el circuito microbiano. Los lagos La Preciosa y Atexcac son de tipo maar y presentan diferencias de salinidad que conllevan a diferencias en la complejidad estructural de las redes tróficas (Hernández-Avilés *et al.*, 2012), además de ser sistemas que se caracterizan por ser oligotróficos y oligo-mesotróficos (Cárcamo, 2017). Por lo que resulta importante aportar información que ayude a entender la distribución espacio-temporal, la interacción de estos componentes biológicos y su relación con las dinámicas limnológicas de cada lago.

HIPÓTESIS.

La distribución temporal y espacial del picoplancton heterotrófico presenta respuesta principalmente a los gradientes térmicos y de oxígeno disuelto en ambos lagos a lo largo de la columna de agua.

Si la distribución del picoplancton y nanoflagelados heterotróficos sigue un patrón conforme a las estacionalidades de los lagos; se esperaría una mayor abundancia y una distribución más homogénea del picoplancton y nanoflagelados a lo largo de la columna durante la etapa de la mezcla y una disminución hacia el fondo durante la estratificación térmica.

Al presentar una menor salinidad el lago La Preciosa (1 g L^{-1}) que el lago Atexcac (6 g L^{-1}) tanto el picoplancton y nanoflagelados heterotróficos presentarán una mayor abundancia y biomasa.

OBJETIVOS.

Objetivo general

- Evaluar la dinámica espacio-temporal del picoplancton y nanoflagelados heterotróficos en los lagos La Preciosa y Atexcac en función a las variaciones térmicas y gradientes químicos.

Objetivos particulares

- Cuantificar la abundancia y biomasa picoplancton y de nanoflagelados heterotróficos en la zona limnética de cada uno de los lagos.
- Evaluar su variabilidad espacio-temporal en los lagos de estudio correspondiente al ciclo anual.
- Determinar si existe asociación entre la abundancia y biomasa del picoplancton heterotrófico (PPH) con el nanoplancton heterotrófico (NFH), así como con los parámetros limnológicos en el lago de Atexcac y el lago La Preciosa.

MÉTODO.

Se realizaron muestreos mensuales de la zona limnética durante un periodo anual del 2015 contemplando el periodo de mezcla, estratificación temprana, estratificación bien establecida y estratificación tardía en los lagos Atexcac y La Preciosa. Los puntos de muestreo en ambos lagos se determinaron de acuerdo con su batimetría, utilizando como referencia los puntos de mayor profundidad, de esta manera se representará toda la columna de agua. Se consideró la zona más profunda limnética del lago, para tener una representatividad de la variabilidad vertical de la columna de agua donde quedan bien representados los estratos. El efecto del viento repercute en toda la columna de agua durante la mezcla y sólo en el epilimnion durante la estratificación térmica.

Al llegar al punto de muestreo se registró la fecha, hora (inicio del muestreo), temperatura del ambiente, porcentaje de nubosidad y la visibilidad al disco de Secchi, esta última para determinar la zona eufótica, utilizando el resultado del promedio de la visibilidad multiplicado por 3.5 que corresponde a la constante de Margalef (1974). Posteriormente se procedió a realizar un perfil vertical de la columna del lago, se realizaron lecturas de temperatura y oxígeno, empleando un oxímetro marca Hach 40D, con precisión de 0.01 unidades, inicialmente se toma una muestra de agua a 5 m de profundidad desde la parte superficial y se toma lectura de temperatura y oxígeno, a partir de los 5 metros se fue tomando una muestra de agua descendiendo cada 1 metro con la finalidad de localizar la termoclina y la oxiclina, una vez identificada las muestras de agua se tomaron cada 10 m de profundidad, obteniendo así los perfiles de temperatura-oxígeno. Las muestras de agua de diferentes profundidades se obtienen dependiendo del tiempo de estratificación y de mezcla, en promedio de 5 a 7 profundidades con ayuda de una botella Van Dorn de 2.5 L de capacidad (marca Wildcon), las cuales fueron depositadas en botellas blancas de polietileno con capacidad de 1 L; para una mejor preservación se depositaron en una hielera con temperatura aproximada de 4°C Marcos H., & Reyes M., (2012).

Para las muestras del picoplancton y nanoflagelados heterotróficos se tomaron con ayuda de la botella Van Dorn y fueron vertidas en botellas blancas con capacidad de 125 ml fijadas con formaldehído al 2% libre de bacterias para su preservación (Straškrabova *et al.*, 1999);

estas fueron en relación con las estratificaciones del lago y posteriormente almacenadas en hieleras a temperatura de 4 °C donde fueron procesadas posteriormente en el laboratorio.

A las muestras tomadas se realizaron algunos parámetros físicos y químicos *in-situ*. Para la determinación del pH se usó un potenciómetro marca HACH, con precisión de 0.01 unidades. Los sólidos disueltos totales y conductividad se midieron mediante un conductímetro marca Corning con precisión de $\pm 0.01 \text{ mS cm}^{-1}$ y 0.1 g L^{-1} , respectivamente. La alcalinidad y dureza se realizaron por medio de métodos volumétricos con el uso de indicadores de fenolftaleína y anaranjado de metilo para la primera y para la dureza (total y de calcio) el método complejométrico respectivamente con EDTA (APHA, 2012) e indicadores y murexida. Cada una de estas pruebas se realizaron entre cada uno de los meses de muestreo con dos repeticiones por profundidad con la finalidad de evitar un margen de error amplio.

Trabajo de laboratorio.

Las muestras se conservaron en refrigeración a 4 °C para su procesamiento y determinar los niveles de nutrimentos con las técnicas colorimétricas: Nitrato (columna de reducción de Cadmio y el método del ácido fenoldisulfónico); Nitrito (ácido sulfanílico); Amonio, azul de indofenol (fenato); Fosfato (fosfomolibdato); Fósforo total (fosfomolibdato con digestión), (APHA, 2012). Con estas técnicas las muestras se leyeron con un espectrofotómetro Spectronic 20D Milton Roy de ± 0.001 de precisión en absorbancia y ± 0.1 de transmitancia.

Para procesar las muestras de picoplancton heterotrófico (PPH) fijadas en formaldehído al 2% se filtraron en membranas de policarbonato de $0.2 \mu\text{m}$ (Poretics USA) teñidas de color negro; con un volumen de 15 a 20 mL donde, los 15 mL fueron para las profundidades del epilimnion y metalimnion y los 20 mL para el hipolimnion; se le agregó 50 μL de fluorocromo DAPI (4,6-diamidino-2-fenilindol); para teñir el ADN de las bacterias según lo recomendado por (Porter y Feig, 1980). También se le añadió una gota de Vecta Shield (Fluorescent Mounting Media, Vector Labs). Se observaron en el microscopio de epifluorescencia (marca Leica, Germany) con un objetivo de 100x apocromático; con filtro

UV para poder observar el DNA teñido. Se tomaron al menos 10 fotografías con cámara digital (Canon, 4 Mpix).

Para medir la densidad del PPH se registraron los conteos tomando como referencia un cuadro de un área de $277.55 \mu\text{m}^2$ de una cuadrícula vista al microscopio, se tomaron al menos 30 cuadros hasta llegar a un conteo de 300 células registrándose en una base de datos en una hoja de cálculo con ayuda del programa Excel (Microsoft Office, 2016).

Para las muestras biológicas de nanoflagelados heterotróficos (NFH) se filtraron con membranas de policarbonato $0.8 \mu\text{m}$ teñidas de color negro. El volumen filtrado de cada muestra fue de 5, 10 y 15 mL para el epilimnion, metalimnion e hipolimnion respectivamente y de 15 mL para toda la columna de agua en la temporada de mezcla. Al momento en que se lleva a cabo el proceso de filtración las membranas negras de $3.0 \mu\text{m}$ se tiñeron con 50 μL de DAPI (fluorocromo 4,6-diamidino-2-fenil-indol); durante un lapso de tres minutos, y se mantuvo en congelación a -20°C hasta el momento de su análisis (Porter y Feig, 1980).

Para cuantificar la densidad de nanoflagelados se eligieron campos al azar en un microscopio de epifluorescencia con un objetivo de 100x apocromático, empleando un filtro de luz UV para organismos heterótrofos. Finalmente se tomaron de 5 a 10 fotografías de cada profundidad con una cámara digital (Canon, 4 Mpix) para su análisis morfométrico.

Trabajo de gabinete.

Las fotografías tomadas del PPH y NFH se analizaron con el programa *Image J*, el cual permitió cortar y limpiar la imagen para únicamente utilizar los organismos de interés, así mismo el programa proporcionará datos morfométricos de área, perímetro y feret. Estos datos se llevaron a una hoja de cálculo en Excel donde se obtuvieron los parámetros de longitud, ancho y volumen. Para obtener el contenido de carbono se empleó la ecuación alométrica de Loferer-Krößbacher *et al* (1998) para las bacterias y para los nanoflagelados con la ecuación de Børshheim y Bratbak, (1987).

Se realizaron las comparaciones estadísticas de los componentes biológicos y limnológicos de estos dos sistemas se utilizó el programa Statgraphics Centurión XV (StatPoint, 2007). Revisando en primera instancia los supuestos de normalidad con la curva de probabilidad normal y la prueba de Shapiro-Wilks y de homocedasticidad con la prueba de Levene, si los datos no correspondían con los supuestos se realizaba una transformación logarítmica de los datos. Así, si éstos supuestos se cumplían se procedió a realizar un análisis de datos paramétricos; análisis de varianza de Fisher (ANOVA). Cuando se presentaron diferencias significativas de distribución a lo largo del ciclo anual entre bacterioplancton y nanoplancton se procedió a realizar la prueba de rangos múltiples de Tukey. Y cuando no se cumplieron se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, posteriormente con graficas de caja y bigotes múltiples con muesca se buscaron diferencias significativas entre meses o estratos (Salgado-Ugarte, 1992). Además, se realizaron correlaciones de Pearson o Spearman existentes entre los datos biológicos y los fisicoquímicos de los lagos, para identificar las posibles interacciones y causas de distribución del picoplanton heterotófico y nanoflagelados causados por una correlación positiva o limitantes en el consumo de nutrimentos disponibles.

RESULTADOS.

Parámetros físico-químicos en lago Atexcac y lago La Preciosa.

Temperatura

El lago de Atexcac por ser un lago monomítico cálido, clasificación propuesta por (Lewis, 1996) a los lagos tropicales y con mayor profundidad. Su periodo de mezcla se presentó en los meses de enero, febrero y finales de noviembre 2015 así como enero 2016 y su temperatura presentó variación entre 16.5 y 17.7 °C en la columna de agua. A lo largo del ciclo anual correspondiente al periodo de estratificación la temperatura en el fondo de lago promedio en los 16.8 °C y en la superficie del cuerpo de agua en 20.1°C (Fig. 4).

Estratificaciones del lago Atexcac.

Estratificación temprana. Comenzó a finales de marzo y terminó a finales de mayo, en esta etapa la temperatura promedió en la parte superficial 21°C y en el fondo de 17°C . Para el epilimnion los datos registrados tuvieron una amplitud que se delimitaba de 5 m en su primera etapa hasta los 9 m del último mes, el metalimnion se ubicó por debajo de los 5 m al inicio hasta los 16 m como máximo en el último mes con una longitud de 7 m aproximadamente, en cambio del hipolimnion se ubicó a partir de los 15 m y 17 m hasta el fondo del sistema abarcando en promedio de 16 m de profundidad los meses de muestreo, tomando el mes de abril como representación en la etapa de estratificación (Fig. 4).

Estratificación bien establecida. Presentó en promedio de temperatura en la superficie linética de 21°C y 17°C al fondo, destacando un aumento de temperatura de 18.3°C en el fondo para el mes de junio. El epilimnion, se observó desde la superficie hasta profundidades entre 8 y 12 m en los meses de muestreo, para el metalimnion se observó la termoclina entre los 15 y 17 m de profundidad y una amplitud de 11 m como máximo y finalmente para la zona del hipolimnion comenzó desde los 17 a 20 m hasta el fondo del sistema y con una amplitud de 12 y 14 m en promedio en los meses de muestreo, se tomó el mes de agosto como representativo en esta etapa de estratificación (Fig. 4).

Estratificación tardía. La temperatura osciló entre los 19°C en la parte superficial y 16°C para el fondo. El epilimnion desde la superficie 13 m y al final del periodo de muestreo de 17 m, así el metalimnion se ubicó por debajo de los 13 m hasta los 22 m con una termoclina observada de 17 y 18 m en promedio, por último, el hipolimnion se registró desde los 22 m hasta el fondo del sistema, se tomó el mes de octubre como la representación de esta etapa de estratificación (Fig. 4).

En el lago La Preciosa la temperatura promedio durante el periodo de muestreo en su ciclo anual fue de 19.2°C en la parte superficial y con una disminución de 16.1°C en el fondo del cuerpo de agua. Para describir el comportamiento dentro de sus fases del ciclo anual se ubicó el periodo de mezcla en los meses más fríos tomando finales de febrero 2015 y noviembre 2015, los cuales oscilaron entre los 17.5°C y 16°C en promedio (Fig. 5).

Estratificaciones del lago La Preciosa.

Estratificación temprana. Se inició a partir del mes de marzo y finalizó en el mes de mayo, la temperatura en este periodo alcanzó una máxima en la parte superficial de 19.8 °C y 16°C en la parte profunda del lago. El epilimnion inició en el mes de marzo con 5 m de profundidad hasta alcanzar un máximo de 10 m al final del periodo de muestreo, en secuencia el metalimnion se registró a partir de los 5 m hasta los 25 m en promedio y con una termoclina marcada a los 15 m y una amplitud marcada de 10 a los 20 m al final de su periodo, se tomó el mes de abril como el más representativo (Fig. 5).

Estratificación bien establecida. Se observó desde el mes de junio hasta finales de mes de agosto, durante ese periodo de muestreo la temperatura máxima registrada fue de 19.5 °C en la parte más superficial del cuerpo de agua y 16 °C en la parte más profunda. El epilimnion abarcó una profundidad el periodo de muestreo una profundidad de 10 m en la columna de agua, el metalimnion presentó una extensión de 10 a 15 m delimitándose hasta los 25 m de profundidad en promedio, la termoclina se desplazó de 16 m hasta los 20 m; por último, el hipolimnion se ubicó a partir de los 20 m hasta la parte más profunda del cuerpo de agua, se tomó el mes de julio como el representativo de esta estratificación (Fig. 5).

Estratificación tardía. Las observaciones registradas comenzaron en el mes de septiembre hasta finales de noviembre donde la temperatura osciló en 19 °C para la parte superficial y 15.4 °C en la profundidad del cuerpo de agua. El epilimnion se ubicó hasta los 11 metros y creciendo gradualmente hasta los 17 metros al final del periodo de muestreo, para el metalimnion alcanzó una profundidad de los 20 a 30 m de profundidad en esta parte la termoclina se ubicó entre los 18 y los 25 m. Por último, el hipolimnion se observó más marcado por debajo de los 25 m hacia el fondo del sistema, el mes de octubre fue el más representativo en la etapa de estratificación tardía (Fig. 5).

Oxígeno disuelto.

Para el lago Atexcac se observó durante el periodo de mezcla una constante de oxígeno disuelto a lo largo de la columna de agua entre 5.41 mg L^{-1} y 4.1 mg L^{-1} . Para el periodo de la estratificación temprana en la parte superficial el oxígeno se mantuvo en 8.4 mg L^{-1} y 2.0 mg L^{-1} hacia el fondo del sistema. Las oscilaciones que se observaron en el periodo de la estratificación bien establecida fueron de 7.3 mg L^{-1} y 1.2 mg L^{-1} de la parte superficial al fondo. Por último, para la estratificación tardía en el ciclo de muestreo se observó en la parte superficial 7.2 mg L^{-1} y 0.17 mg L^{-1} hacia el fondo del sistema (Fig. 4).

Durante el periodo de mezcla en el lago La Preciosa el oxígeno disuelto del sistema osciló entre los 7.23 mg L^{-1} y 4.76 mg L^{-1} a lo largo de la columna de agua. En la estratificación temprana el oxígeno disuelto en la parte superficial fue de 7.1 mg L^{-1} y 2.8 mg L^{-1} hacia el fondo del sistema. Para el periodo de la estratificación bien establecida las oscilaciones se dieron de 6.8 mg L^{-1} y 0.9 mg L^{-1} de la parte superficial al fondo. Por último, e la estratificación tardía el oxígeno tuvo oscilaciones de 7.2 mg L^{-1} y 0.1 mg L^{-1} de la superficie al fondo del sistema (Fig. 5).

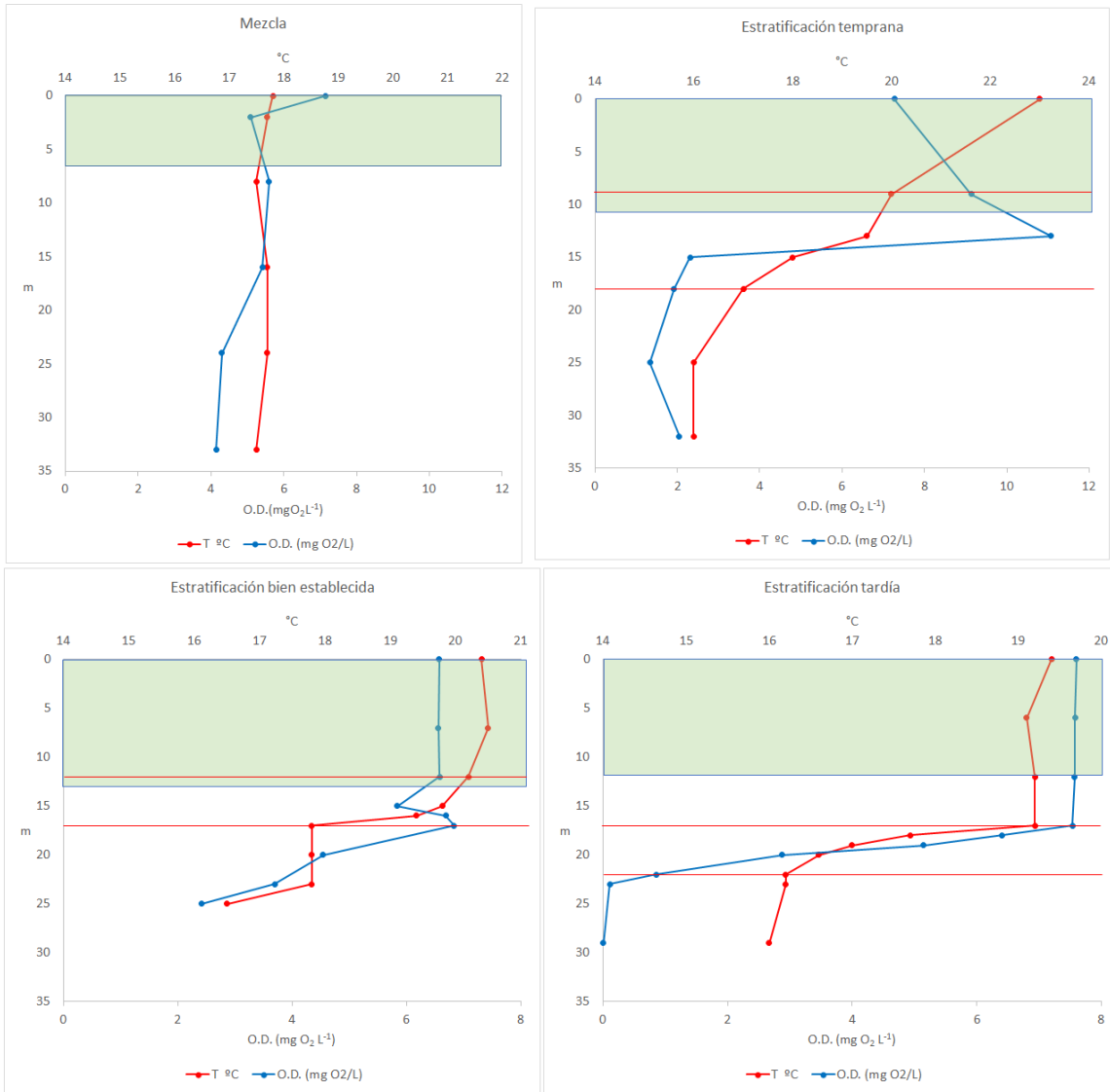


Fig. 4. Perfiles verticales de temperatura y oxígeno en el lago Atexcac, se representan las etapas hidrodinámicas del 2015. Se indica la zona eufótica sombreado de color verde y se delimita la termoclina líneas horizontales de color rojo en las tres etapas de estratificación.

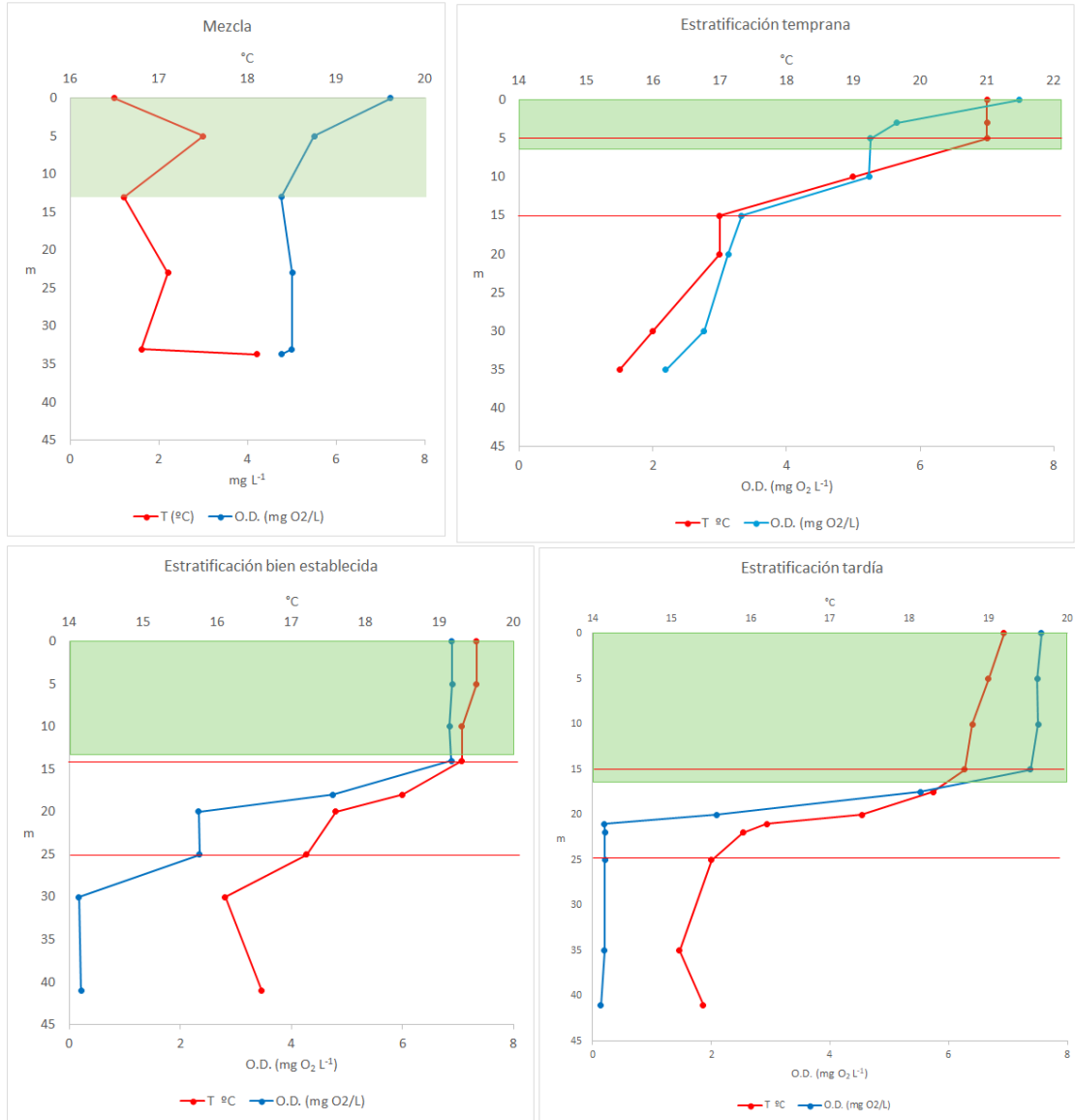


Fig. 5. Perfiles verticales de temperatura y oxígeno del lago La Preciosa. Se muestran las etapas hidrodinámicas más representativas del 2015, en cada figura se indica la zona eufótica y la termoclina, la primera se muestra través de la marca sombreada de color verde y la segunda es indicada a través de las líneas horizontales de color rojo.

Alcalinidad y pH.

Durante las etapas hidrodinámicas en el lago Atexcac se observaron ligeros cambios en el pH y en consecuencia la alcalinidad también. En el periodo de la mezcla el pH alcanzó en promedio 8.4 ± 0.015 , en la estratificación temprana el valor que obtuvo fue de 8.8 ± 0.06 , para el periodo de la estratificación bien establecida 8.5 ± 0.17 observando una disminución

con respecto a la estratificación temprana, al final en la estratificación bien establecida se observó un aumento de 8.9 ± 0.15 en promedio, considerando estos valores durante todas sus etapas como un lago alcalino. Para su medición, se consideraron los carbonatos y bicarbonatos presentes en el sistema, donde se observó en la etapa de la mezcla carbonatos de $300 \text{ mg L}^{-1} \pm 40.5$ y $809 \text{ mg L}^{-1} \pm 136$ de bicarbonatos, para la estratificación temprana $257 \text{ mg L}^{-1} \pm 22.02$ y $715 \text{ mg L}^{-1} \pm 57.7$ en promedio, en la estratificación bien establecida se observó un aumento en los carbonatos y mayormente en los bicarbonatos $356 \text{ mg L}^{-1} \pm 58.73$ y $1255 \text{ mg L}^{-1} \pm 408.8$. Para el final, en la estratificación tardía se observó una disminución de $340 \text{ mg L}^{-1} \pm 46.9$ y $914 \text{ mg L}^{-1} \pm 104.5$ de carbonatos y bicarbonatos (Fig. 6).

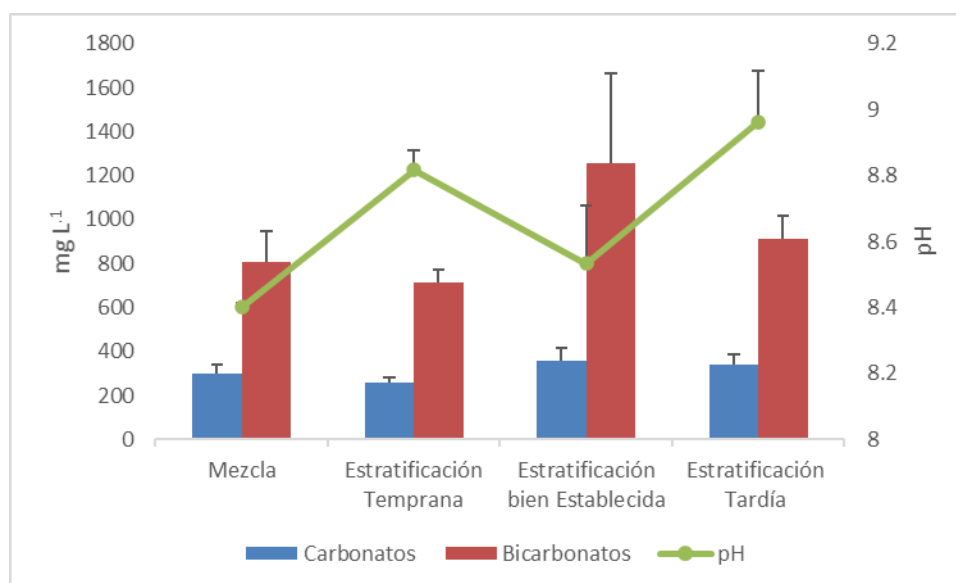


Fig. 6. Variación temporal promedio de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) y pH en el lago Atexcac.

Durante las etapas hidrodinámicas en el lago La Preciosa el pH se mantuvo en promedio durante la mezcla de 8.5 ± 0.01 , se observó un ligero aumento en la estratificación temprana de 9.0 ± 0.07 , para el periodo de la estratificación bien establecida el pH registró una disminución en promedio de 8.6 ± 0.18 . Por último, en la estratificación tardía el pH aumentó a 9.0 ± 0.23 se observa que este lago también posee características de ser un lago alcalino. Para poder medir la concentración alcalina en el lago La Preciosa se tomaron los carbonatos y bicarbonatos del sistema, observando como resultado para el periodo de la

mezcla una concentración de $249 \text{ mg L}^{-1} \pm 16.6$ y $133 \text{ mg L}^{-1} \pm 68.69$, para la estratificación temprana se observó $215 \text{ mg L}^{-1} \pm 51.3$ y $263 \text{ mg L}^{-1} \pm 86.4$, al pasar a la estratificación bien establecida los valores aumentaron en promedio de $260 \text{ mg L}^{-1} \pm 77.1$ para carbonatos y $365 \text{ mg L}^{-1} \pm 127.7$ para bicarbonatos. Por último, en la estratificación tardía los carbonatos y bicarbonatos se redujeron en promedio $244 \text{ mg L}^{-1} \pm 124.3$ y $139 \text{ mg L}^{-1} \pm 70.6$ (Fig. 7).

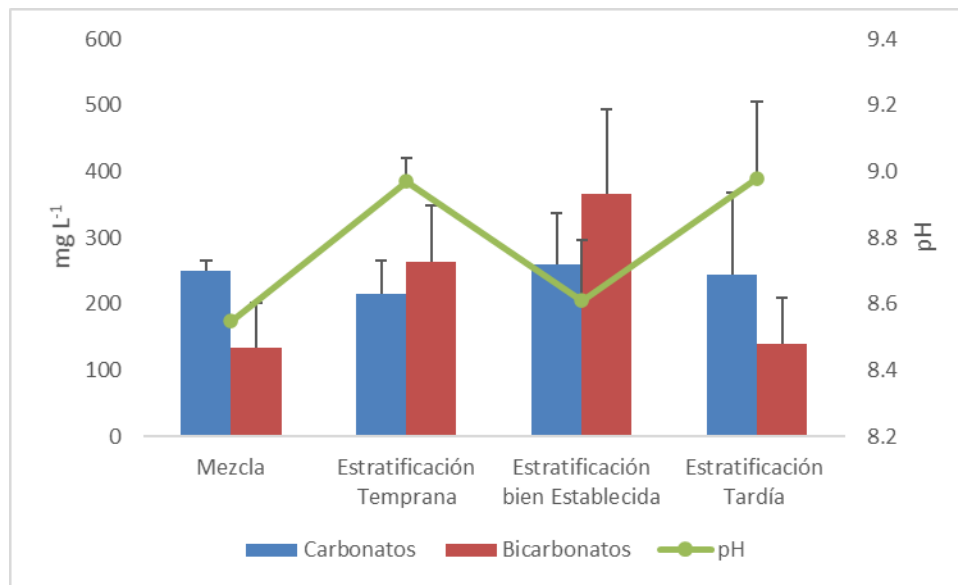


Fig. 7. Variación temporal promedio de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) y pH en el lago La Preciosa

Conductividad y total de sólidos disueltos.

La relación de estos dos parámetros al ser medidos en todo el ciclo anual no se observaron cambios entre cada una de sus etapas hidrodinámicas, lo que sí se puede observar en la estratificación temprana una conductividad con valor de 12.3 mS cm^{-1} y 6.2 g/L de total de sólidos disueltos, contenían el mayor valor en todo el ciclo de muestreo y este presentó una leve reducción para el periodo de la estratificación tardía donde se encontró una conductividad de 10.3 mS cm^{-1} y 5.2 g/L de total de sólidos disueltos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Relación de la conductividad y total de solidos disueltos y su comportamiento en el lago Atexcac.

	Conductividad (mS cm ⁻¹)	Total de solidos disueltos (g/L)
Mezcla	12.3	6.2
Estratificación Temprana	12.3	6.2
Estratificación bien Establecida	11.3	5.7
Estratificación Tardía	10.3	5.2

Para el lago de La preciosa los parámetros medidos a lo largo del ciclo anual tampoco se encontraron diferencias sólo una ligera disminución al final de su etapa hidrodinámica. En la estratificación temprana se observó una concentración en la conductividad de 2.1 mS cm⁻¹ y 1.0 g/L de total de sólidos disueltos, ya para la estratificación tardía se observó una ligera reducción de la conductividad en 1.8 mS cm⁻¹ y 0.9 g/L en el total de sólidos disueltos (Cuadro 2).

Cuadro 2 . Relación de la conductividad eléctrica y total de sólidos disueltos y su comportamiento el lago La Preciosa.

	Conductividad (mS cm ⁻¹)	TSD (g/L)
Mezcla	1.93	1.10
Estratificación Temprana	2.11	1.05
Estratificación bien Establecida	1.95	0.98
Estratificación Tardía	1.88	0.95

Nutrientes.

Fósforo total

El fósforo total presente en el lago Atexcac durante la mezcla fue a lo largo de la columna de agua de $0.13 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.046$, para el periodo de la estratificación temprana el fósforo total la mayor concentración se ubicó en el epilimnion $0.074 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.063$ y con ligera reducción hacia el hipolimnion. En comparación con el periodo de la estratificación bien establecida la concentración fue menor en el epilimnion $0.057 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.023$ y gradualmente se observó un crecimiento de su concentración hasta encontrar en el hipolimnion $0.074 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.043$. Para el periodo de la estratificación tardía las concentraciones se fueron incrementando hacia el fondo del sistema donde el epilimnion tenía una concentración de $0.09 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.02$ y hacia el hipolimnion la concentración llegó a $0.18 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.09$ (Fig. 8).

En comparación con el lago La Preciosa, la concentración de fósforo total en la mezcla osciló entre $0.11 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.03$ a lo largo de la columna de agua. Para las estratificaciones a lo largo del ciclo de muestreo las menores concentraciones se observaron en la parte superficial y fueron aumentando gradualmente hacia el fondo, en la estratificación temprana la concentración observada fue de $0.06 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.03$ y para el hipolimnion $0.07 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.02$, en la estratificación bien establecida se observó $0.03 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.02$ en el epilimnion, $0.04 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.03$ en metalimnion y $0.07 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.05$ para el hipolimnion. Por último, para la estratificación tardía $0.09 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.08$ correspondió al epilimnion y $0.10 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.14$ en el hipolimnion (Fig. 9).

Fósforo reactivo soluble.

Las concentraciones de fósforo reactivo soluble (FSR) para el lago de Atexcac se observó que en el periodo de la mezcla osciló entre $0.03 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.01$ en los meses de muestreo, en el periodo de la estratificación temprana se observó que la mayor concentración

correspondía en el metalimnion $0.04 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.02$ y una baja en el epilimnion $0.027 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.004$ y para el hipolimnion $0.03 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.02$, en los dos periodos posteriores de estratificación del lago se encontró un aumento gradual de la concentración del fósforo reactivo soluble hacia el fondo del sistema, para la estratificación bien establecida el epilimnion se observó $0.02 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.02$ de concentración y para el hipolimnion $0.08 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.01$. Por último, en la estratificación tardía el epilimnion osciló $0.03 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.04$, el metalimnion $0.05 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.01$ y por último en el hipolimnion $0.08 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.01$ (Fig. 8).

Para el lago La Preciosa la concentración de fósforo soluble reactivo (FSR) en el periodo de la mezcla se observó una concentración en promedio $0.01 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.01$, en las tres estratificaciones posteriores en nuestro periodo de muestreo en la estratificación bien establecida fue donde se encontró mayor concentración de fósforo reactivo soluble donde, en el metalimnion se observó $0.03 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.03$ de concentración, sobre el epilimnion se encontró $0.018 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.01$ y para el hipolimnion $0.016 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0005$, en la estratificación temprana la concentración más baja se encontró en el epilimnion $0.010 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.01$ y la concentración más alta en el hipolimnion $0.015 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.01$. Y por último, en la estratificación tardía las concentraciones fueron más bajas para el epilimnion $0.001 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0003$ y un ligero aumento hacia el hipolimnion de $0.003 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.002$ (Fig. 9).

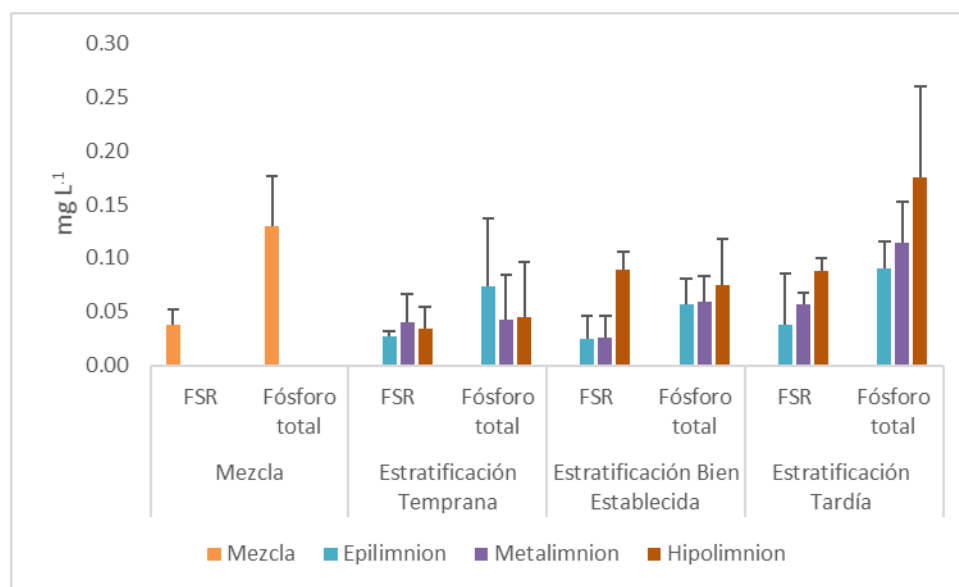


Fig. 8. Concentración de fósforo reactivo soluble (FSR) y fósforo total en el lago Atexcac.

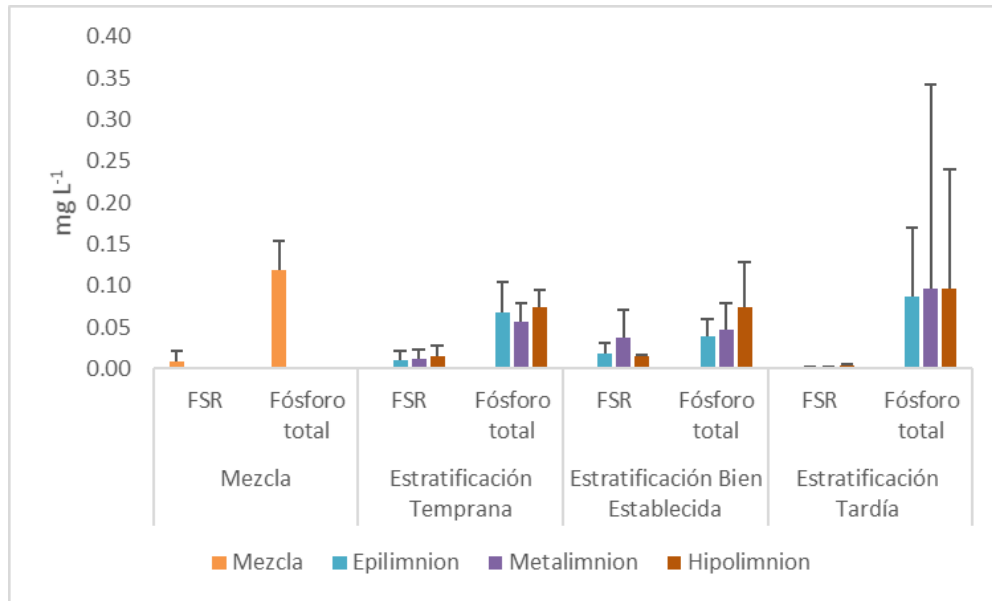


Fig. 9. Concentración de fósforo reactivo soluble (FSR) y fósforo total en el lago La Preciosa durante las etapas hidrodinámicas.

Nitrato

En el lago Atexcac las concentraciones de nitrato para la etapa de la mezcla osciló $0.0005 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0003$ a lo largo de la columna de agua. Se observaron en todas las etapas hidrodinámicas una muy baja concentración de nitrato en particular en las dos primeras estratificaciones donde las concentraciones aumentaron poco significativamente hacia el fondo del sistema. Para la estratificación temprana el epilimnion se registró $0.0006 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0006$ y para el hipolimnion $0.0011 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0007$, para la estratificación bien establecida sobre el epilimnion la concentración osciló $0.0006 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0005$, en el metalimnion se observó la concentración más baja $0.0003 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0001$. Por último, alcanzando una máxima concentración en el hipolimnion de $0.0012 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0013$; al final en la estratificación tardía, la concentración menor corresponde en el hipolimnion $0.0003 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0002$ y la mayor concentración correspondió en el metalimnion $0.0006 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0007$ (Fig. 10).

En el lago La Preciosa las concentraciones de nitrato también fueron notoriamente bajas en todas las etapas hidrodinámicas, para el periodo de la mezcla se observó $0.0007 \text{ mg L}^{-1} \pm$

0.0003, para la estratificación temprana sobre el epilimnion la concentración osciló $0.0004 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0001$, en el metalimnion bajó $0.0003 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0001$ y para el hipolimnion la concentración aumentó a $0.0005 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0002$; para la estratificación bien establecida el epilimnion registró $0.0003 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0002$, en el metalimnion se redujo a $0.0002 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0001$ y en el hipolimnion aumento la concentración similar a al estrato de la parte superficial $0.0003 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.0001$. Por último, en la estratificación tardía la concentración en el epilimnion osciló $0.001 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.002$ y para el metalimnion y el hipolimnion la concentración no presento una variación significativa entre estos dos estratos $0.002 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.002$ (Fig. 11).

Nitrato

En las últimas etapas hidrodinámicas de lago Atexcac para el nitrato se observaron con la mayor concentración de la parte superficial hacia el fondo del sistema. En la etapa de la mezcla la concentración fue de $0.119 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.115$ a lo largo de la columna de agua, en la estratificación temprana sobre el epilimnion $0.009 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.001$, en el metalimnion tuvo un ligero incremento $0.010 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.001$ y en el hipolimnion descendió $0.006 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.004$. Para la estratificación bien establecida el epilimnion osciló $0.081 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.068$, un ligero aumento en el metalimnion $0.085 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.053$ y la mayor concentración en el hipolimnion de $0.125 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.098$. Por último, en la estratificación tardía sobre el epilimnion se observó $0.119 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.026$, en el metalimnion $0.123 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.055$ y finalmente en el hipolimnion $0.213 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.069$ (Fig. 10).

Para el lago La Preciosa la concentración más alta de nitrato se observaron en las últimas etapas hidrodinámicas sobre la parte más superficial del sistema. En la etapa de la mezcla la concentración osciló $0.083 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.080$, en la estratificación temprana el epilimnion $0.036 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.034$ y el hipolimnion $0.037 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.043$ no distanciaron mucho de su mayor concentración, mientras que el metalimnion osciló $0.026 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.022$. Para la estratificación bien establecida la mayor concentración se observó en el epilimnion $0.767 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.591$, mientras que en el metalimnion $0.461 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.523$ y el hipolimnion $0.462 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.542$ fueron concentraciones que no variaron entre estos dos; para la

estratificación tardía el epilimnion se observó $0.713 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.972$ obteniendo la mayor concentración a lo largo de la columna a diferencia de metalimnion $0.300 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.610$ y el hipolimnion $0.552 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.730$ donde el nitrato se redujo considerablemente (Fig. 11).

Amonio

Las concentraciones de amonio en el lago Atexcac para el periodo de la mezcla osciló $0.036 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.014$ a lo largo de la columna de agua. En la estratificación temprana el amonio la más baja concentración se encontró en el epilimnion $0.021 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.005$, observándose el mayor incremento en el metalimnion $0.053 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.045$ y para el hipolimnion $0.034 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.014$ donde se observó una disminución. En la estratificación bien establecida, en el epilimnion la concentración fue de $0.029 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.019$ aumentando más hacia el fondo donde el metalimnion $0.034 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.033$ y el hipolimnion $0.034 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.014$. Por último, en la estratificación tardía el epilimnion $0.028 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.018$, la concentración descendió en el metalimnion $0.024 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.007$, en el hipolimnion se observó un incremento $0.053 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.030$ (Fig. 10).

En el lago La Preciosa la concentración de amonio en el periodo de la mezcla fue de $0.050 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.018$ a lo largo de la columna de agua. Durante las tres estratificaciones se observaron en la parte superficial las mayores concentraciones de amonio, en la estratificación temprana el epilimnion se observó $0.074 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.056$ y descendiendo en el metalimnion $0.063 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.051$ y en el hipolimnion $0.048 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.027$. En la estratificación bien establecida el epilimnion obtuvo una concentración $0.415 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.474$ y fue descendiendo hacia el fondo en el metalimnion $0.295 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.446$ y el hipolimnion $0.298 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.398$. Por último, en la estratificación tardía el epilimnion se observó $0.099 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.109$, bajando un poco la concentración en el metalimnion $0.055 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.062$ y un repunte hacia el fondo en el hipolimnion $0.102 \text{ mg L}^{-1} \pm 0.080$ (Fig. 11).

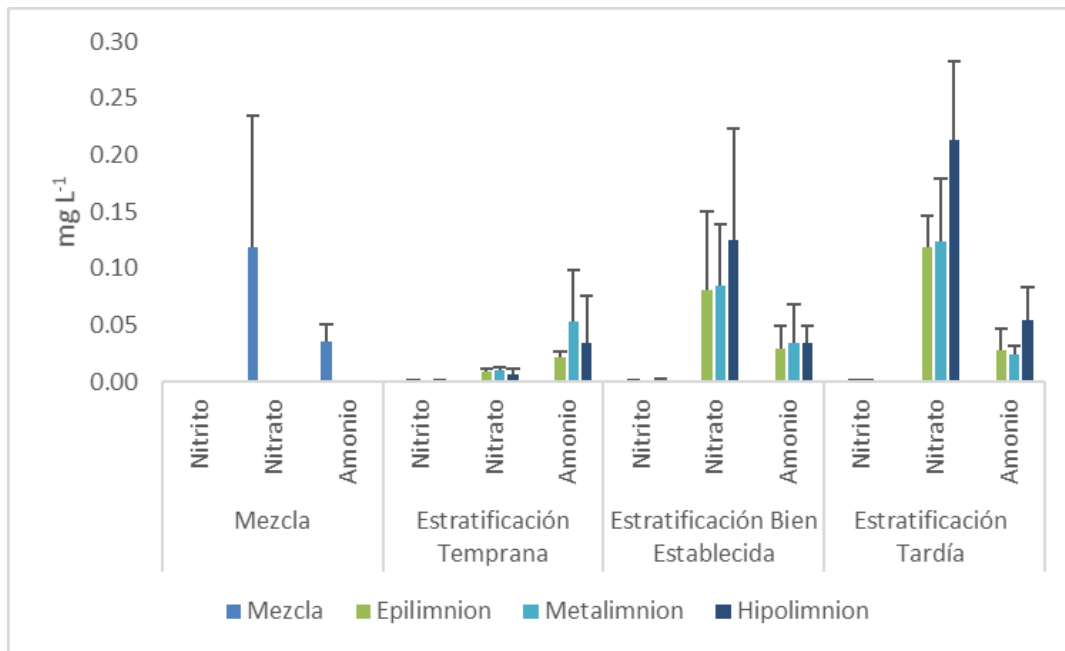


Fig. 10. Variación temporal de la concentración de nitrito, nitrato y amonio en el lago Atexcac.

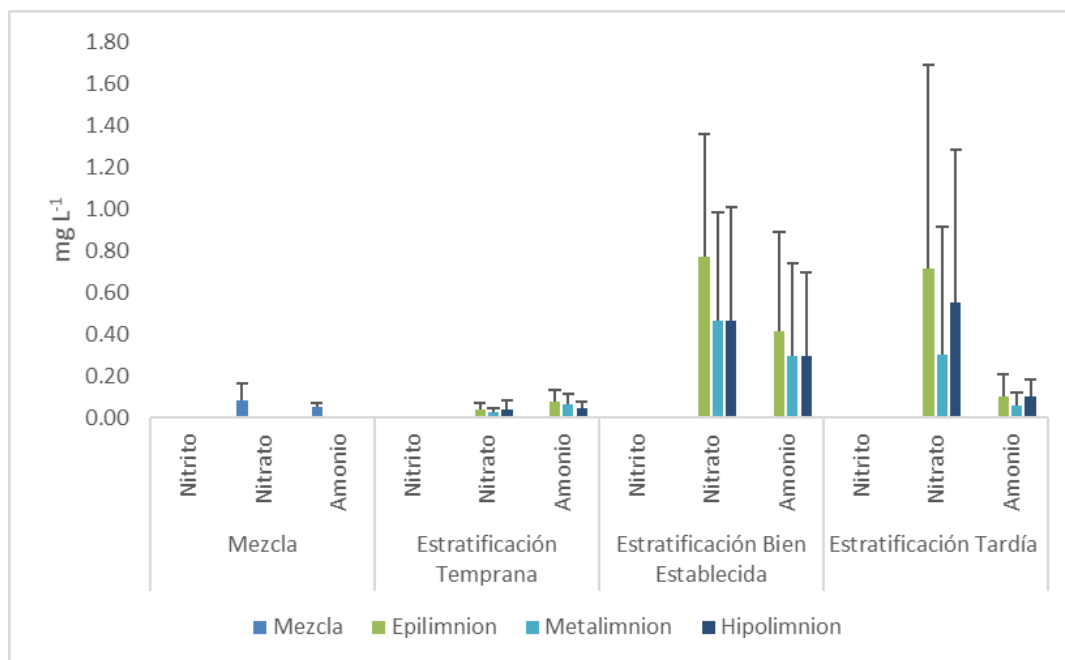


Fig. 11. Variación temporal en la concentración de nitrito, nitrato y amonio en el lago La Preciosa.

Parámetros biológicos.

Distribución espacio-temporal del picoplancton heterotrófico en Lago Atexcac.

La densidad del picoplancton heterotrófico (PPH) en el lago Atexcac durante el año de muestreo se observó para el periodo de la mezcla una concentración de 3.36×10^6 cél. mL⁻¹ a lo largo de la columna de agua. Durante los siguientes muestreos en las estratificaciones se presentaron cambios en la abundancia del PPH, en la estratificación temprana el epilimnion se observó 4.24×10^6 cél mL⁻¹, en el metalimnion 4.19×10^6 cél. mL⁻¹ y en el hipolimnion 3.43×10^6 cél. mL⁻¹; para este periodo se observa que la mayor concentración se registró en el epilimnion y descendió gradualmente hacia el hipolimnion (Fig. 12). Para la estratificación bien establecida en el epilimnion se cuantificaron 4.14×10^6 cél. mL⁻¹, en el metalimnion 4.51×10^6 cél. mL⁻¹ y el hipolimnion 3.32×10^6 cél. mL⁻¹. Por último, en la estratificación tardía el epilimnion registró 4.32×10^6 cél. mL⁻¹, en el metalimnion 4.64×10^6 cél. mL⁻¹ y en el hipolimnion 3.50×10^6 cél. mL⁻¹ (Fig. 12). En estos dos últimos periodos las mayores abundancias se observaron en el metalimnion y disminución de esta abundancia en la parte del hipolimnion (Fig. 12).

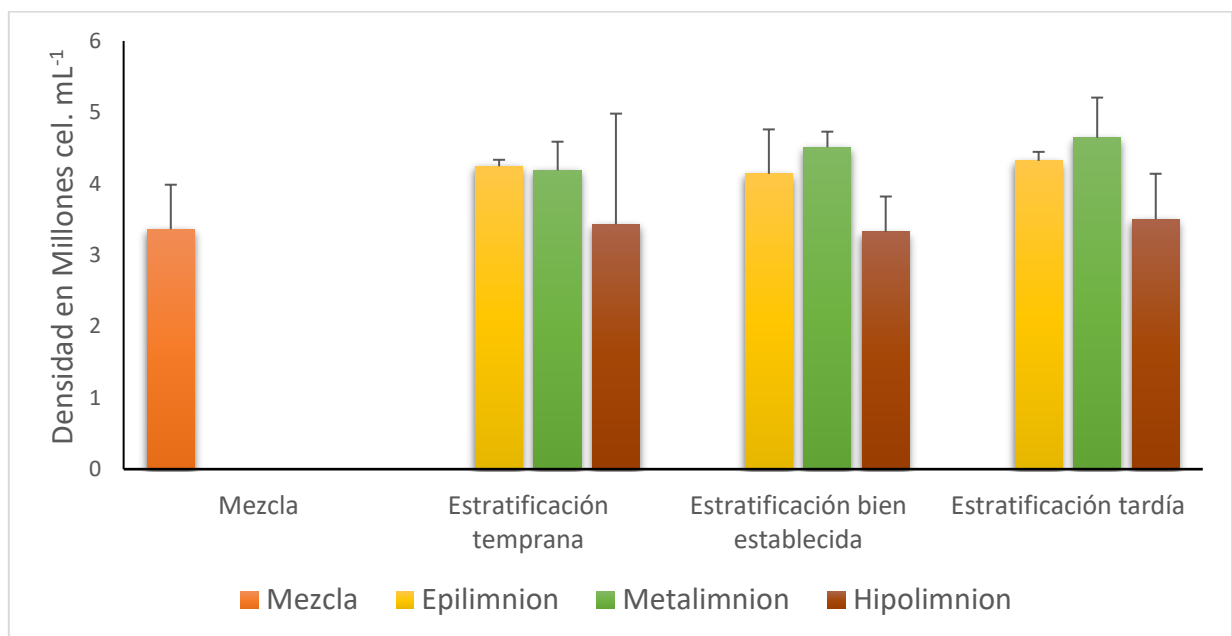


Fig. 12. Densidad espacio-temporal del picoplancton heterotrófico (PPH) del lago Atexcac en las etapas hidrodinámicas.

En el lago Atexcac, la variabilidad espacial para el PPH se analizó los meses de muestreo aplicando la curva de probabilidad normal obteniendo como resultado que no correspondían a una distribución normal, por tal razón, se aplicó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar las medias de las densidades por mes, donde se obtuvo un valor de ($p > 0.65$), lo que indicó que no había diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza entre cada uno de los meses, lo que se corroboró con las cajas múltiples con muesca (Fig. 13).

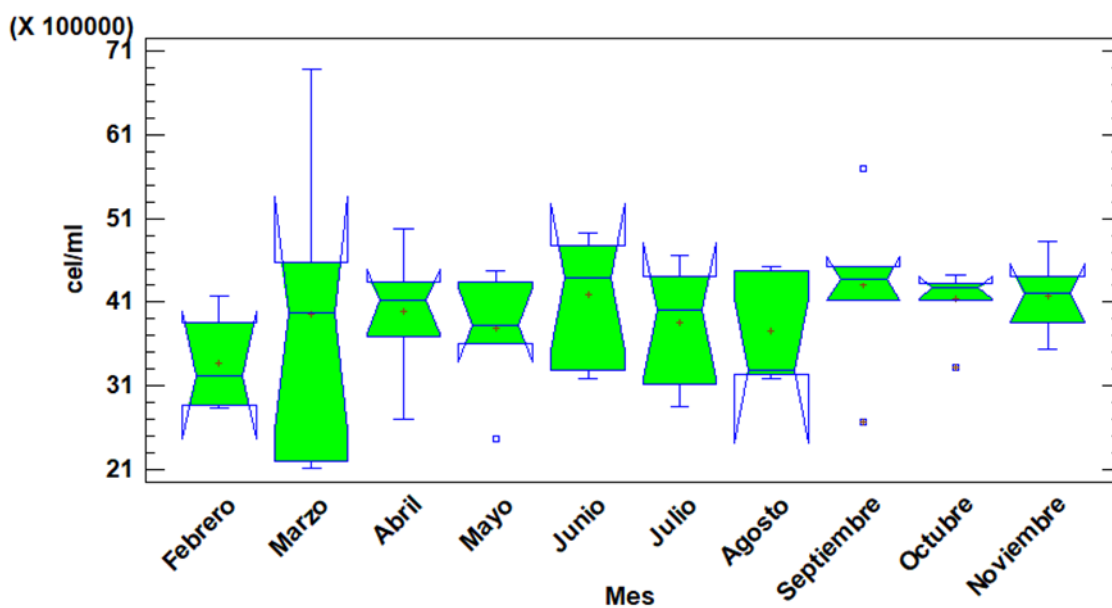


Fig. 13. Diagrama de cajas múltiples con muesca densidad del picoplancton heterotrófico (PPH) por mes en el lago Atexcac.

La densidad del PPH por estrato se encontró que no corresponde a una distribución normal. Como estos resultados corresponden a datos no paramétricos se realizó la prueba de Kruskal-Wallis en densidad por estrato ($p < 0.0000043$) comprobando que existe una diferencia estadísticamente significativa con un 95% de confianza. Estas diferencias coinciden con el diagrama de cajas múltiples con muesca, se observa diferencia del hipolimnion respecto al epilimnion y metalimnion; así como la mezcla se observó diferencia con el epilimnion y metalimnion (Fig. 14).

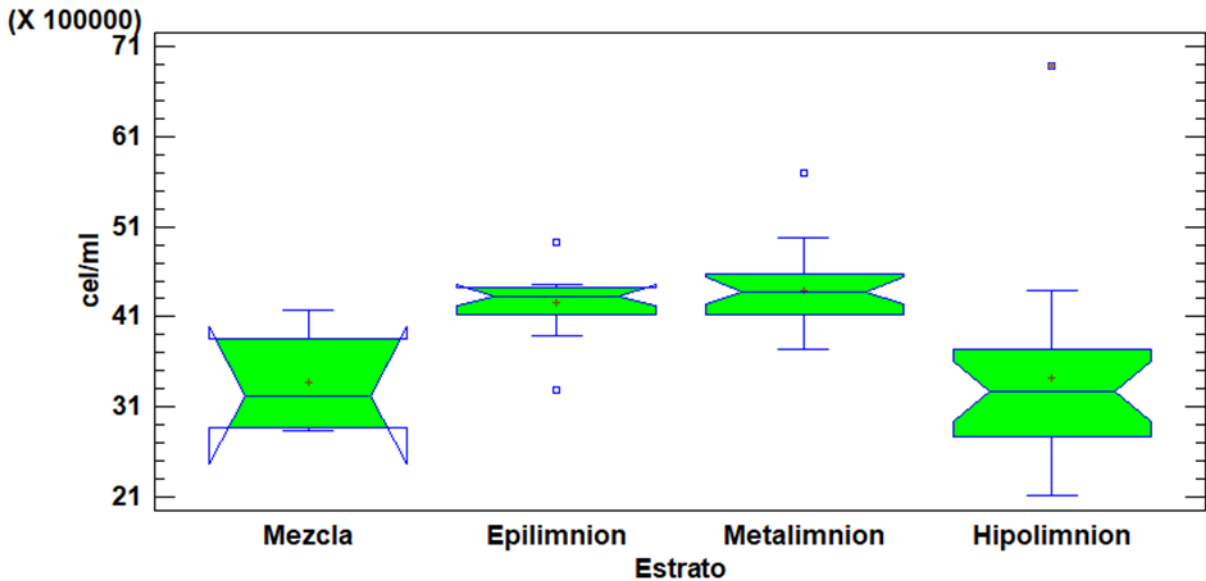


Fig. 14. Diagrama de cajas múltiples con muesca en la densidad del picoplancton heterotrófico (PPH) por estrato en el lago Atexcac.

En el lago Atexcac el PPH las concentraciones registradas de biomasa para el periodo de la mezcla se obtuvo una oscilación de $871.73 \mu\text{g C L}^{-1}$ a lo largo de la columna de agua (Fig. 15). En la estratificación temprana sobre el epilimnion la concentración fue de $1155.84 \mu\text{g C L}^{-1}$, en el metalimnion se observó $1141.28 \mu\text{g C L}^{-1}$ y en el hipolimnion de $950.10 \mu\text{g C L}^{-1}$; En esta etapa la mayor cantidad de biomasa se concentró en la parte del epilimnion y disminuye gradualmente hacia el hipolimnion (Fig. 15). Para la estratificación bien establecida el epilimnion se registró $1123.69 \mu\text{g C L}^{-1}$, para el metalimnion aumentó a $1221.84 \mu\text{g C L}^{-1}$ y hacia el hipolimnion se observó $906.44 \mu\text{g C L}^{-1}$; por último, en la etapa de la estratificación tardía en el epilimnion la biomasa contenida promedio fue de $1164.90 \mu\text{g C L}^{-1}$, para el metalimnion $1264.71 \mu\text{g C L}^{-1}$ y el hipolimnion $969.46 \mu\text{g C L}^{-1}$ (Fig. 15). En estas dos últimas etapas de la estratificación la mayor concentración la registró el metalimnion y la menor concentración de biomasa se observó en el hipolimnion (Fig. 15).

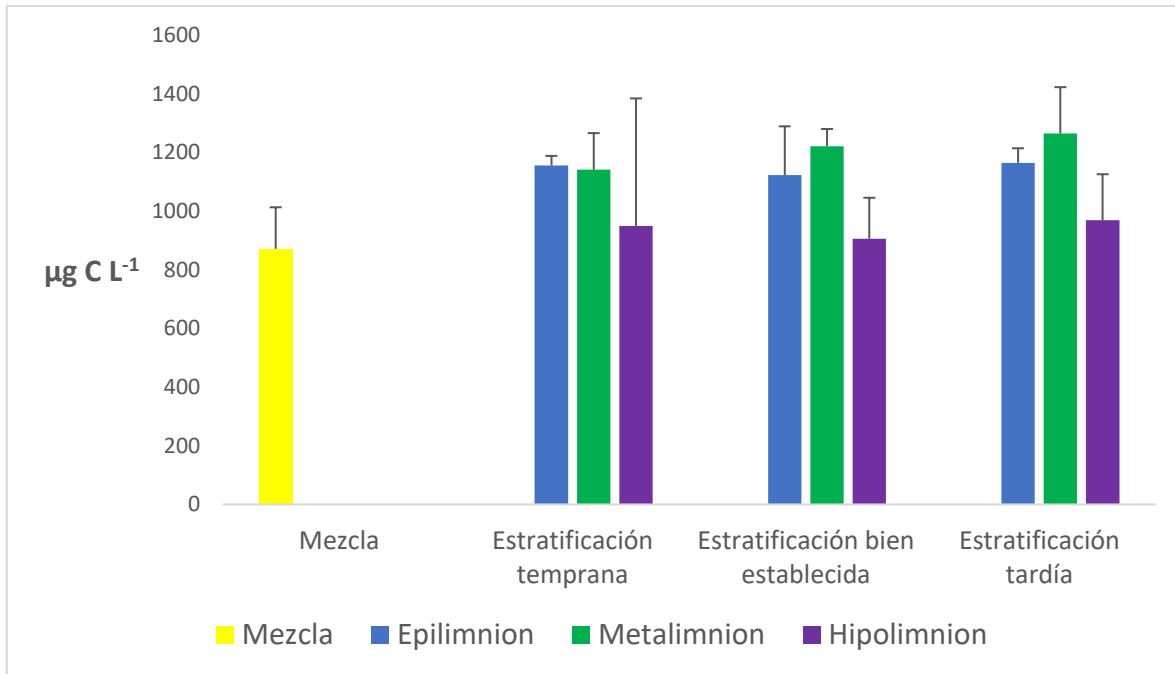


Fig. 15. Biomasa del picoplancton heterotrófico en el lago Atexcac. Se indica la biomasa registrada durante la etapa de mezcla y en los estratos (epilimnion, metalimnion e hipolimnion) de la columna de agua durante las fases de estratificación.

Para la biomasa del PPH se aplicó la curva de probabilidad normal, obteniendo que los datos se ajustan a una distribución normal con el logaritmo de la biomasa entre cada mes de muestreo. En un análisis de la varianza el ajuste de logaritmo en las concentraciones de la biomasa de PPH se encontró con un 95% de confianza que no existen diferencias estadísticamente significativas [$F_{(9,51)}=0.78, p>0.63$], por el contrario, al realizar la prueba de rangos múltiples de Tukey presentó una diferencia significativa entre el mes de febrero con noviembre, se realizó un diagrama de cajas múltiples con muesca para los datos con transformación comprobando que si existía diferencia significativa entre los meses de la estratificación tardía y la mezcla en febrero (Fig. 16).

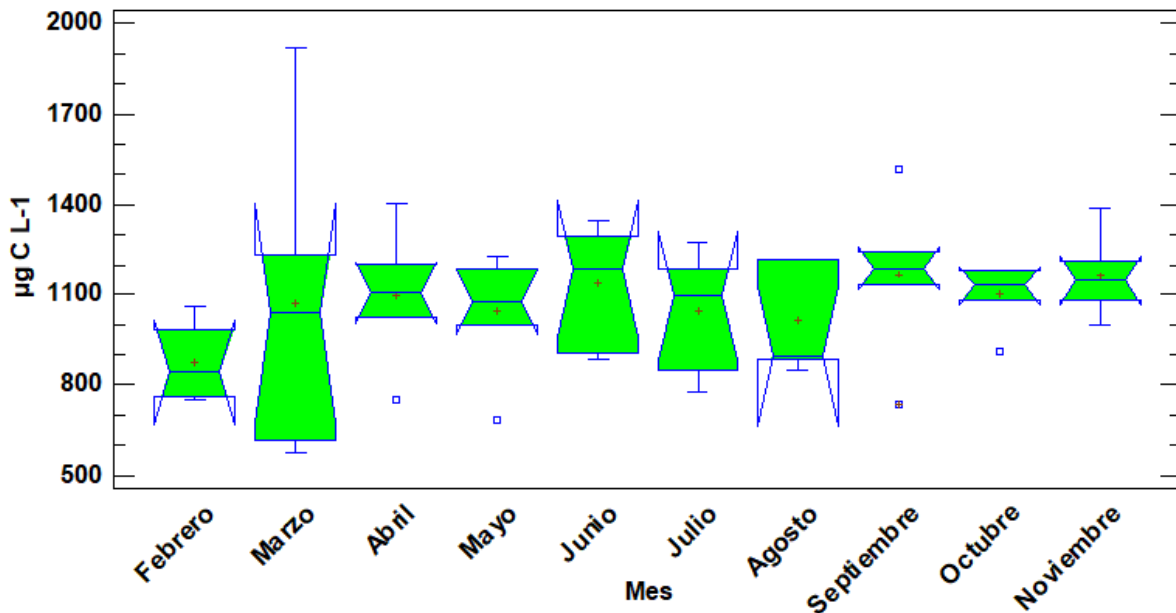


Fig. 16. Diagrama de cajas múltiples con muesca biomasa del picoplancton heterotrófico PPH por mes en el lago Atexcac.

Para el análisis estadístico de la biomasa del PPH en el lago Atexcac se realizó una curva de probabilidad normal estandarizando el logaritmo de los datos de la biomasa por estrato, obteniendo una distribución normal. Se realizó un análisis de varianza, se utilizaron los logaritmos de las biomásas de los estratos de la columna de agua, de este análisis se obtuvo que existe una diferencia estadísticamente significativa con un 95% de confianza [$F_{(3,57)} = 11.37, p < 0.00$]. En la prueba de rangos múltiples de Tukey las diferencias se encontraron entre el periodo de la mezcla respecto al epilimnion y metalimnion; el estrato del hipolimnion en comparación del epilimnion y metalimnion. Las diferencias que se encontraron en la prueba de rangos múltiples se cotejaron con el diagrama de cajas múltiples con muesca, encontrando dichas diferencias (Fig. 17).

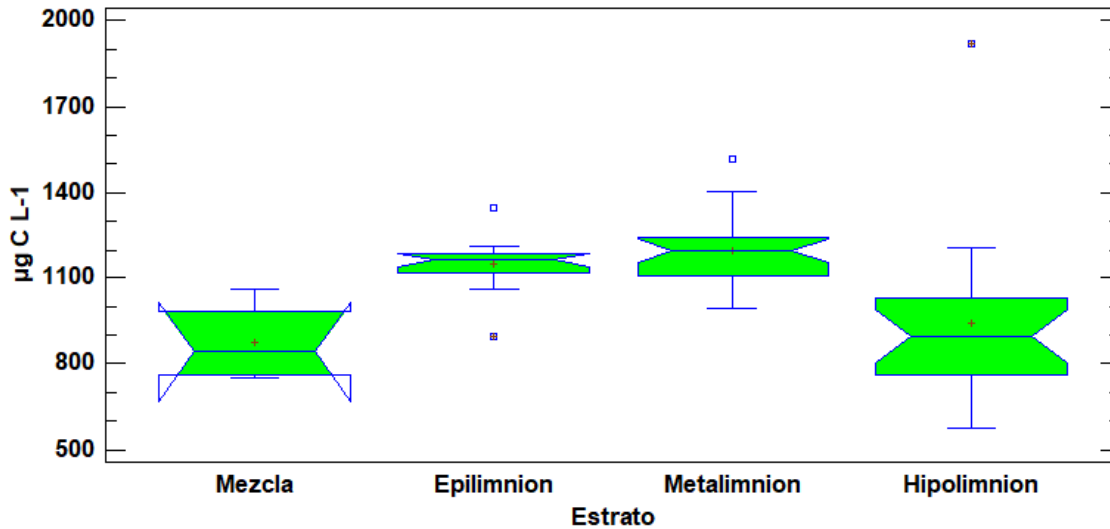


Fig. 17. Diagrama de cajas múltiples con muesca, biomasa del picoplancton heterotrófico PPH por estrato en un ciclo anual en el lago Atexcac.

Distribución espacio-temporal del picoplancton heterotrófico en lago La Preciosa.

En el lago La Preciosa durante el año de muestreo el picoplancton heterotrófico (PPH) se observó una distribución durante el periodo de la mezcla de 4.98×10^6 cél. mL^{-1} a lo largo de la columna de agua (Fig. 18). La distribución de PPH durante la estratificación temprana el epilimnion registró 4.65×10^6 cél. mL^{-1} , sobre el metalimnion 4.39×10^6 cél. mL^{-1} y el hipolimnion 3.47×10^6 cél. mL^{-1} , se observa que en la parte más superficial la mayor concentración de PPH y disminuye gradualmente hacia el fondo del sistema (Fig. 18). En la estratificación bien establecida en el epilimnion se observó una densidad de 4.72×10^6 cél. mL^{-1} , aumentando en el metalimnion a 4.79×10^6 cél. mL^{-1} y para el hipolimnion se observó un descenso de 3.16×10^6 cél. mL^{-1} ; Por último, para la estratificación tardía en el epilimnion fue de 4.39×10^6 cél. mL^{-1} , se observó un aumento en el metalimnion de 5.00×10^6 cél. mL^{-1} y un marcado descenso en la concentración sobre el hipolimnion de 2.78×10^6 cél. mL^{-1} , en estos dos periodos de la estratificación las mayores densidades se registraron sobre el metalimnion ajustado en las observaciones donde se encontraba la termoclina (Fig. 18).

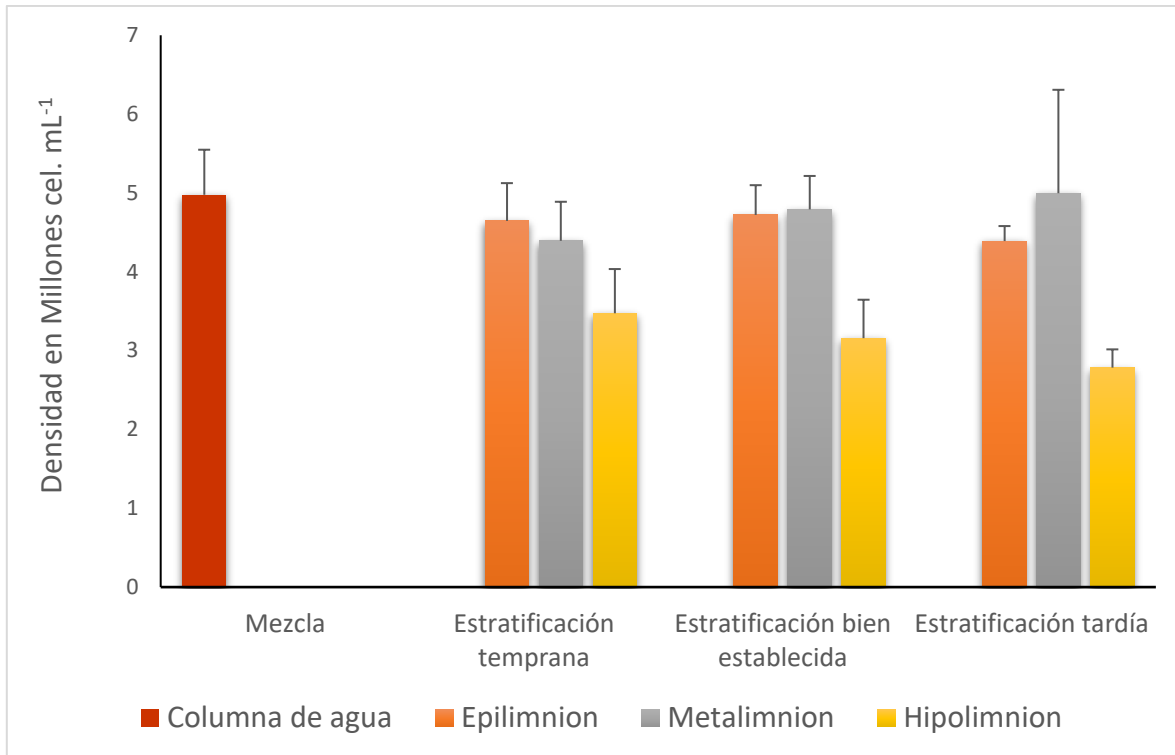


Fig. 18. Densidad del picoplancton heterotrófico y sus etapas hidrodinámicas espacio-temporal del lago La Preciosa.

En el lago La Preciosa la variabilidad espacial de la densidad del PPH mostró una distribución normal entre cada uno de los meses de muestreo con la curva de probabilidad normal, el análisis de varianza en las concentraciones para la densidad del PPH por mes con un 95% de confianza no se encontraron diferencias significativas [$F_{(9,52)}=0.74$, $p>0.66$], en la prueba de rangos múltiples de Tukey se comprobó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre cada uno de los meses de muestreo para la densidad del PPH, la comprobación se apoya con el diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 19).

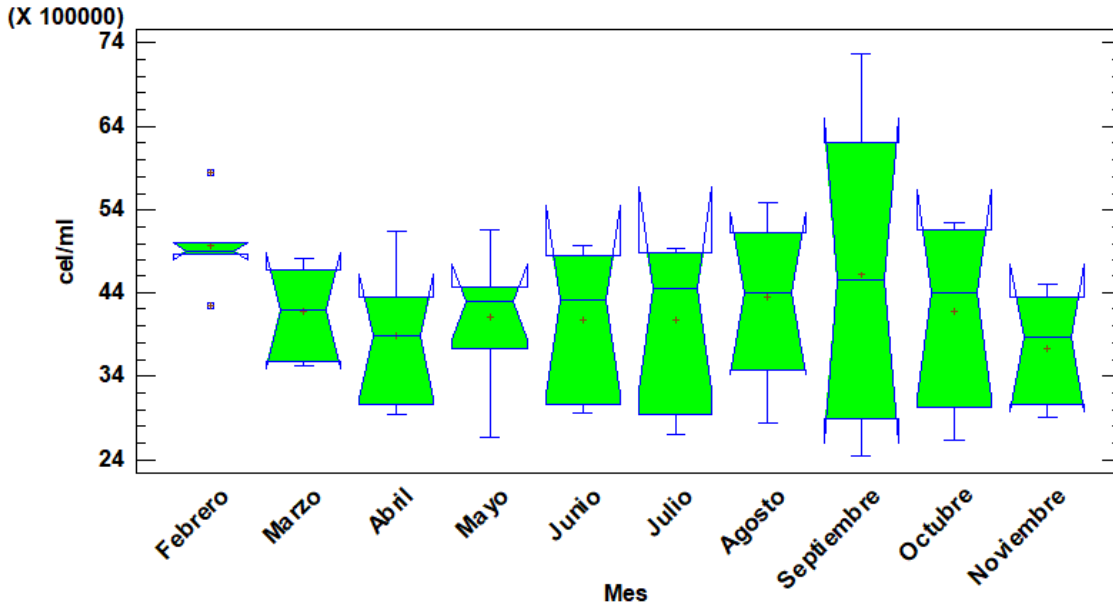


Fig. 19. Diagrama de cajas múltiples con muesca de la densidad del picoplancton heterotrófico (PPH) por mes en el lago La Preciosa.

Para la densidad del PPH por estrato perteneciendo a una distribución normal, al realizar el análisis de la varianza para la densidad por estrato se encontraron diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza [$F_{(3,58)}=24.85$, $p<0.00$], la prueba de rangos múltiples de Tukey mostró las diferencias de la densidad del PPH en la mezcla con respecto al hipolimnion, el epilimnion con el hipolimnion y metalimnion en comparación con el hipolimnion; estas diferencias se observan en el diagrama de cajas múltiples con muesca (Fig. 20).

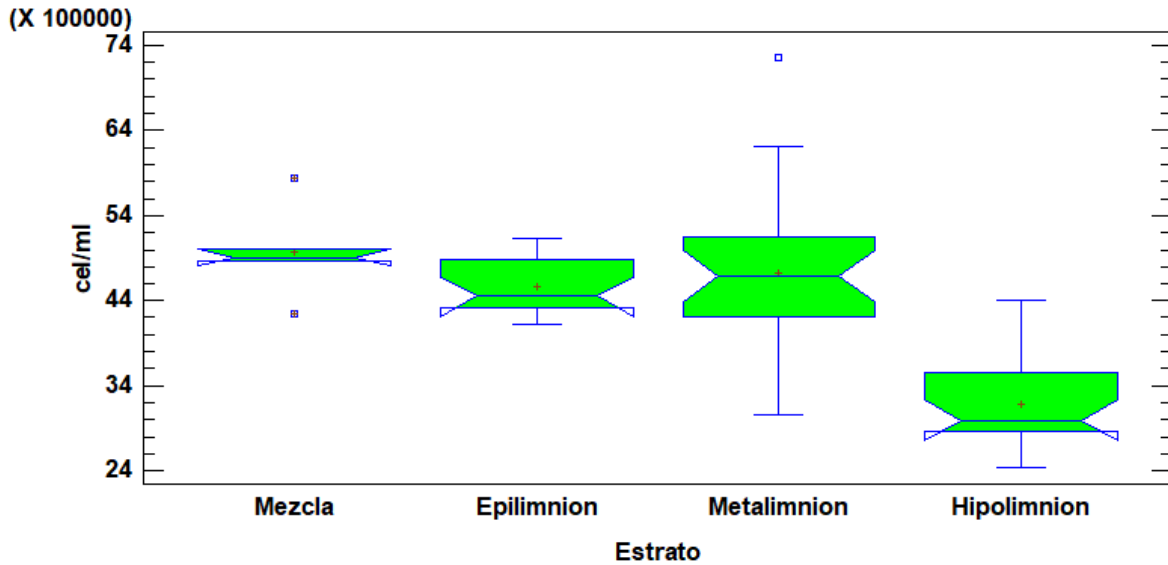


Fig. 20. Diagrama de cajas múltiples con muesca densidad del picoplancton heterotófico (PPH) por estrato en el lago La Preciosa.

La biomasa del PPH en el lago La Preciosa registró una concentración promedio de 1362.08 $\mu\text{g C L}^{-1}$ durante el periodo de la mezcla a lo largo de la columna de agua (Fig. 21). En la estratificación temprana el epilimnion registró una biomasa de 1242.03 $\mu\text{g C L}^{-1}$, en el metalimnion una concentración promedio de 1180.08 $\mu\text{g C L}^{-1}$ y el hipolimnion de 939.90 $\mu\text{g C L}^{-1}$, en este periodo de la estratificación se observó una mayor concentración de biomasa en la parte superficial y descendió gradualmente hacia el fondo (Fig. 21). En la estratificación bien establecida el epilimnion registró una biomasa de 1261.61 $\mu\text{g C L}^{-1}$, en el metalimnion la concentración osciló entre 1285.20 $\mu\text{g C L}^{-1}$ y el hipolimnion 856.02 $\mu\text{g C L}^{-1}$; para la estratificación tardía la biomasa en el epilimnion fue de 1191.63 $\mu\text{g C L}^{-1}$, sobre el metalimnion 1339.86 $\mu\text{g C L}^{-1}$ y por último en el hipolimnion 730.33 $\mu\text{g C L}^{-1}$, en los dos periodos de estratificación se observó la mayor concentración de biomasa en la parte del metalimnion seguido del epilimnion y una disminución muy notable sobre el hipolimnion (Fig. 21).

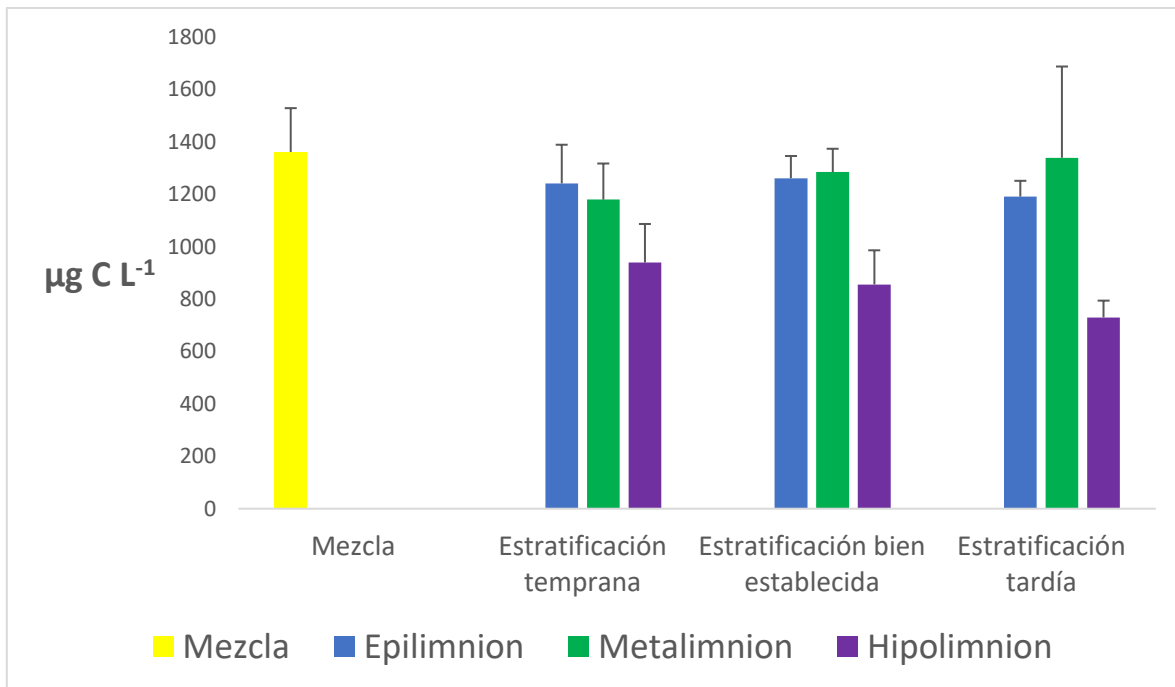


Fig. 21. Biomasa del picoplancton heterotrófico en el lago La Preciosa y su distribución espacio-temporal en las etapas hidrodinámicas.

La biomasa de PPH en el lago La Preciosa mostró que los datos corresponden a una distribución normal. Al aplicar un análisis de varianza de los datos de biomasa por mes se encontró que con un 95% de confianza no existe diferencias estadísticamente significativas [$F_{(9,51)}=0.68$, $p>0.723$], al revisar la prueba de rangos múltiples de Tukey sólo se indicó una posible diferencia entre el mes de febrero con noviembre. Para su comprobación se realizó un diagrama de cajas múltiples con muesca demostrando que si existe una ligera diferencia entre los dos meses señalados (Fig.22).

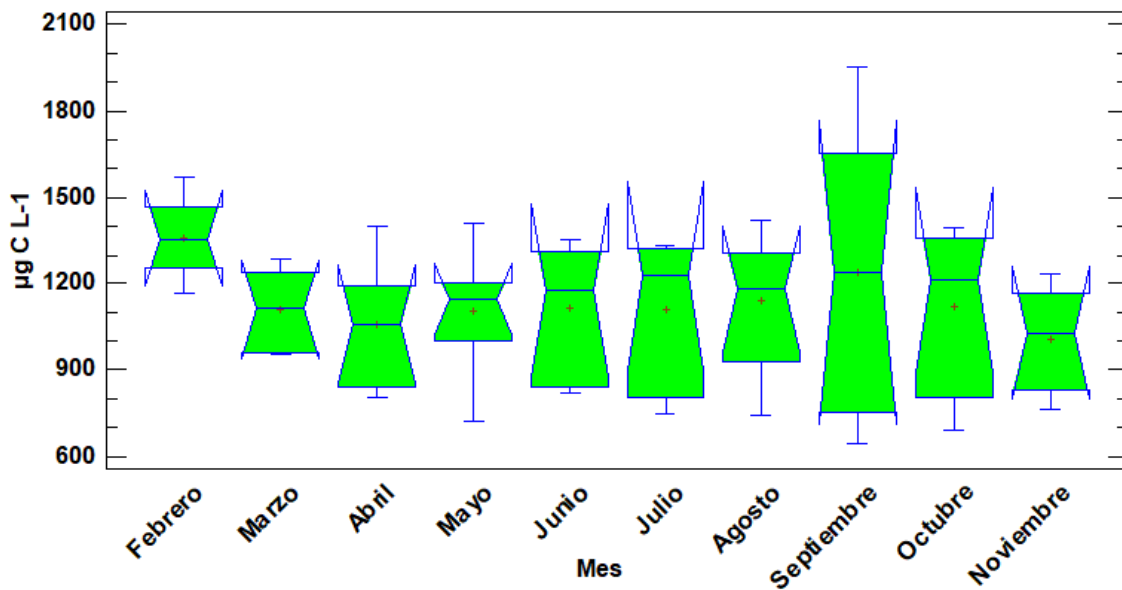


Fig. 22. Diagrama de cajas múltiples con muesca biomasa del picoplancton heterotrófico (PPH) por mes en el lago La Preciosa.

Para el lago La Preciosa, la biomasa por estrato mostró una distribución normal. En el análisis de varianza para la biomasa por estrato con un 95% de confianza existe diferencias estadísticamente significativas entre estratos [$F_{(3,57)}=24.84$, $p<0.00$], aplicando la prueba de rangos múltiples de Tukey se encontraron que dichas diferencias de la biomasa de PPH están en la mezcla, epilimnion y metalimnion con respecto al hipolimnion lo que se confirma con el análisis de cajas múltiples con muesca (Fig. 23).

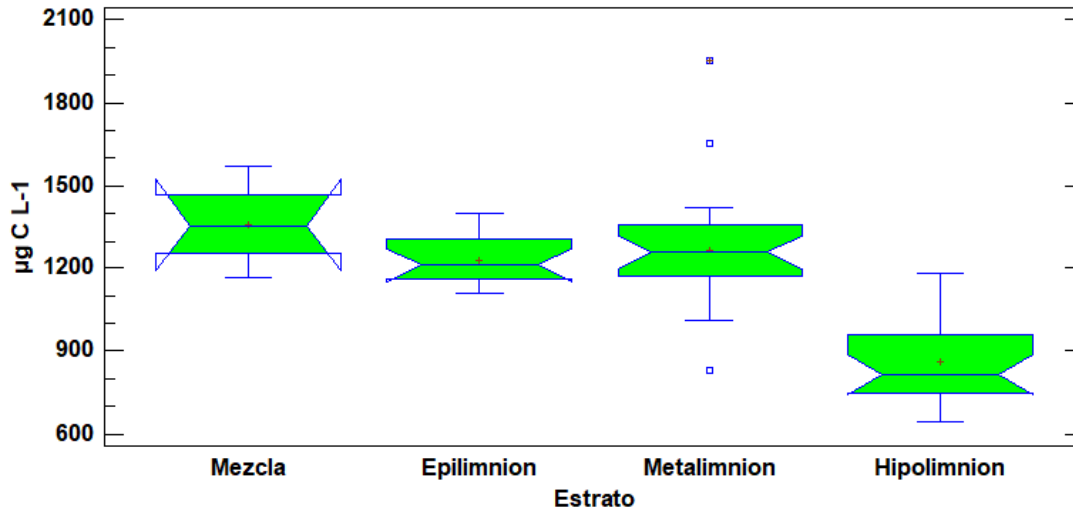


Fig. 23. Diagrama de cajas múltiples con muesca de la biomasa del picoplancton heterotrófico (PPH) en cada uno de los estratos de un ciclo anual en el lago La Preciosa.

Distribución espacio-temporal de nanoflagelados heterotróficos en lago Atexcac.

En el lago Atexcac la densidad de los nanoflagelados heterotrófico (NFH) durante el periodo de muestreo se observó una densidad de 4.04×10^2 Org. L⁻¹ correspondiente al tiempo de la mezcla y sobre toda la columna de agua. (Fig. 24). En la estratificación temprana la densidad en el epilimnion de (NFH) oscilo de 3.81×10^2 Org. L⁻¹, incrementando la densidad para el metalimnion en 5.55×10^2 Org. L⁻¹ y para el hipolimnion 2.20×10^2 Org. L⁻¹ (Fig. 24). Para la estratificación bien establecida en el epilimnion se observó la mayor densidad de 4.96×10^2 Org. L⁻¹, descendiendo hacia el metalimnion a 2.42×10^2 Org. L⁻¹ y en el hipolimnion 1.94×10^2 Org. L⁻¹. Por último, en la estratificación tardía en el epilimnion se observó una densidad de 2.04×10^2 Org. L⁻¹, una disminución hacia el metalimnion de 1.01×10^2 Org. L⁻¹ y en el hipolimnion 6.96×10^1 Org. L⁻¹ (Fig. 24).

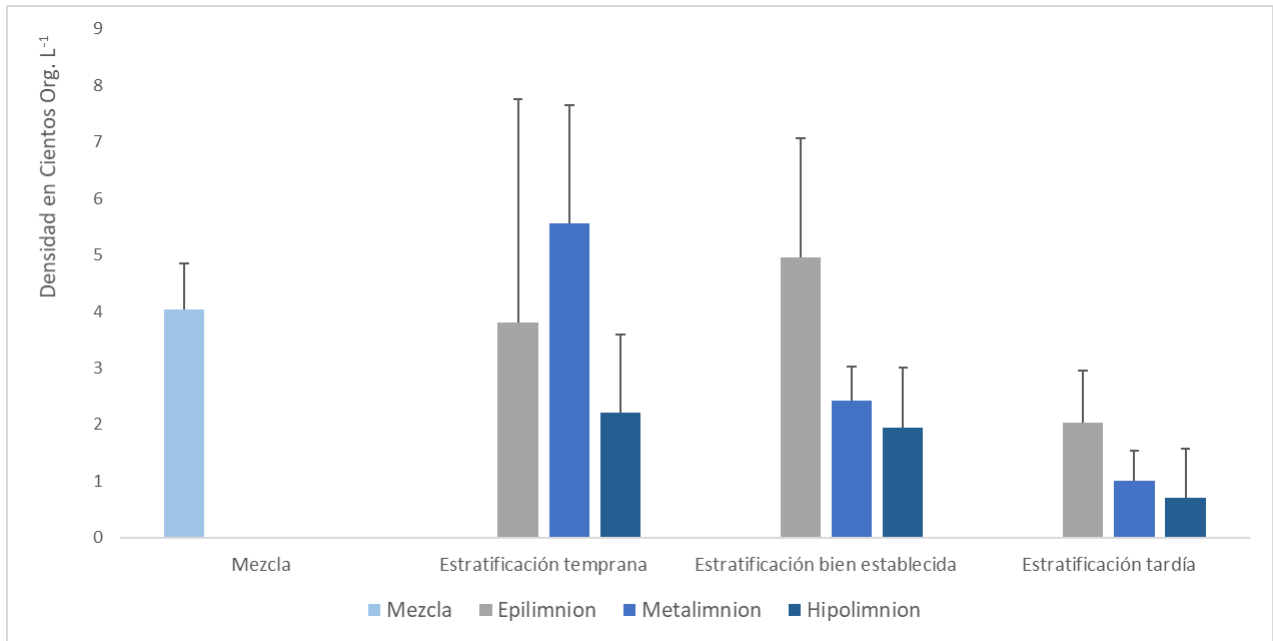


Fig. 24. Densidad y distribución en la densidad de nanoflagelados heterotróficos (NFH) en las etapas hidrodinámicas del lago Atexcac.

Usando la curva de probabilidad normal en los nanoflagelados heterotróficos en el lago Atexcac mostraron que no corresponden con una distribución normal. En la prueba de Kruskal-Wallis se encontró que ($p < 0.0099$) la densidad registrada para cada uno de los meses de muestreo no registro una diferencia estadísticamente significativa con un 95% de confianza. Al realizar una observación con el diagrama de cajas múltiples se encontró que existe una diferencia en el mes de febrero con respecto a los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre, así también el mes de mayo en comparación con el mes de septiembre y octubre. (Fig. 25).

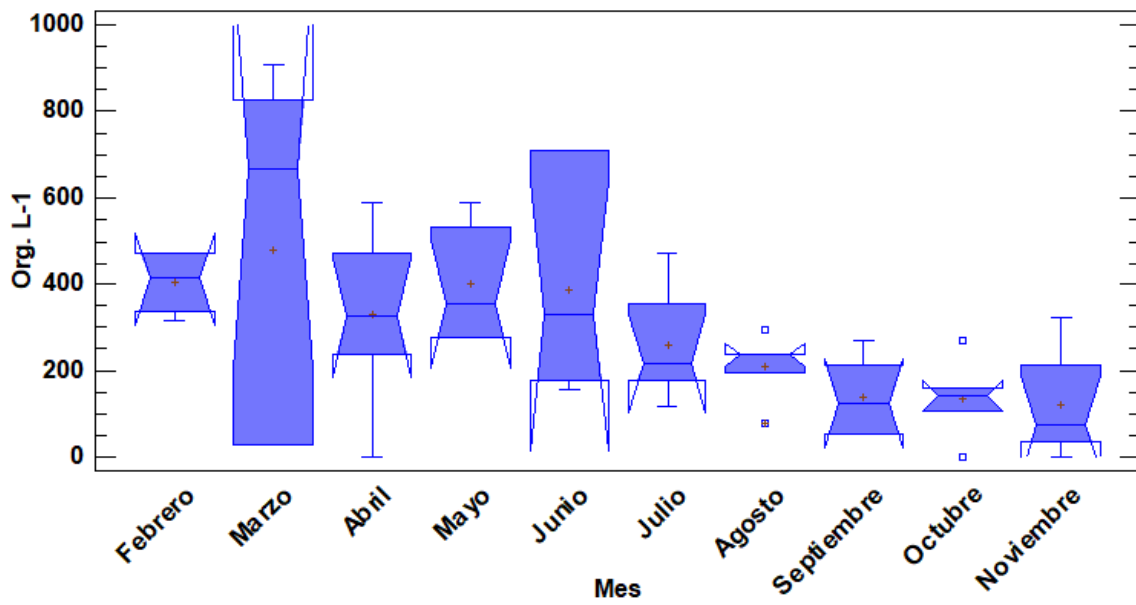


Fig. 25. Diagrama de cajas múltiples con muesca densidad de nanoflagelados heterotróficos (NFH) por mes en el lago Atexcac.

La densidad por estrato de los nanoflagelados heterotróficos mostró que no corresponden con una distribución normal. Con la prueba de Kruskal-Wallis para densidad por estrato se comprobó ($p < 0.021$) que existen diferencias estadísticamente significativas entre estratos, los cuales se observaron con el diagrama de cajas múltiples con muesca, observando que la mezcla tiene diferencia en comparación con el hipolimnion (Fig. 26).

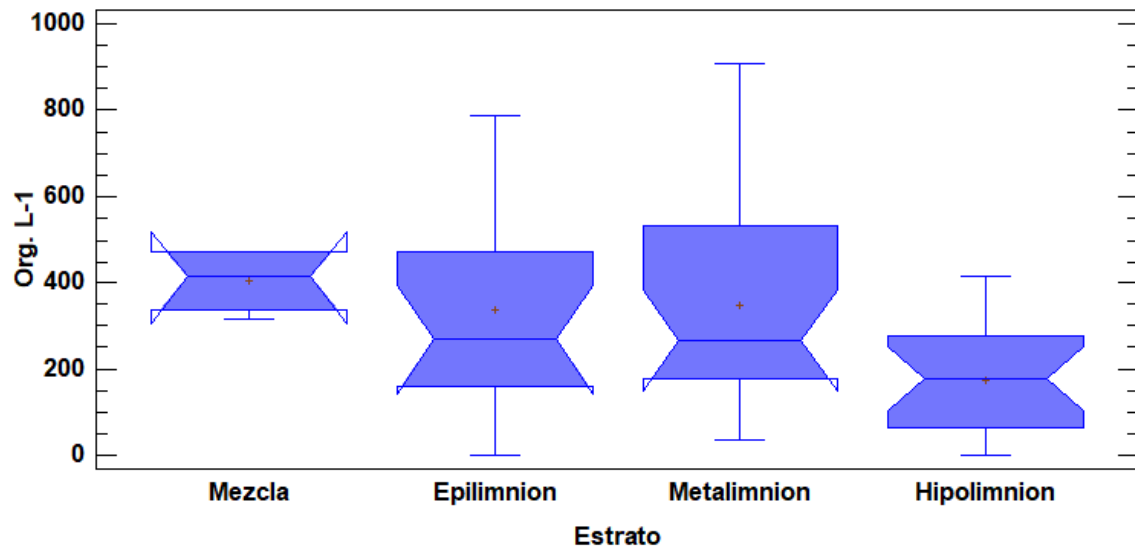


Fig. 26. Diagrama de cajas múltiples con muesca para la densidad de los nanoflagelados heterotróficos (NFH) por estrato en el lago Atexcac.

La biomasa de los NFH en el lago Atexcac registró una concentración promedio de 0.3799 mg C L⁻¹ a lo largo de la columna de agua durante el periodo de la mezcla (Fig. 27). En la estratificación temprana el epilimnion registró una biomasa de 0.4148 mg C L⁻¹, en el metalimnion la concentración osciló de 0.5743 mg C L⁻¹ y el hipolimnion descendió a 0.2321 mg C L⁻¹ (Fig. 27). En la estratificación bien establecida la mayor concentración de biomasa se registró en el epilimnion 0.5137 mg C L⁻¹, mientras que en el metalimnion y en el hipolimnion la concentración de biomasa osciló de 0.2482 a 0.1825 mg C L⁻¹. En la estratificación tardía, el estrato que mostró la mayor concentración fue el epilimnion (0.2976 mg C L⁻¹), tanto el metalimnion como el hipolimnion mostraron un patrón decreciente con respecto al metalimnion, las concentraciones de biomasa registradas para estos estratos fueron las siguientes 0.2801 mg CL⁻¹ y 0.1971 mg C L⁻¹ (Fig. 27).

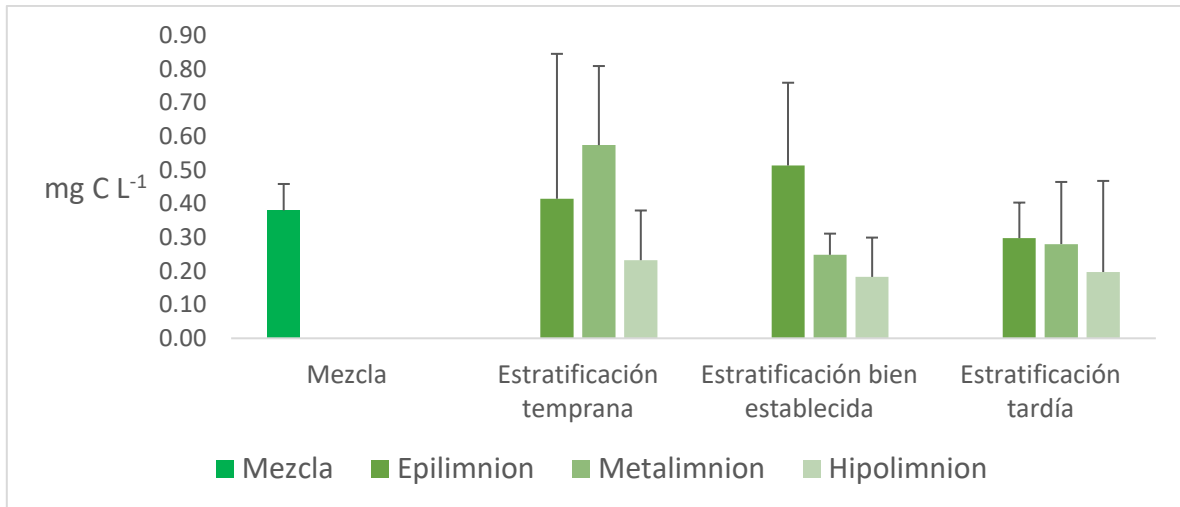


Fig. 27. Biomasa de nanoflagelados heterotróficos. Se indican las etapas hidrodinámicas (mezcla y estratificación) durante un ciclo anual, asimismo se representan los estratos (epilimnion, metalimnion e hipolimnion) en los que se divide el lago Atexcac cuando se encuentra estratificado.

La concentración de biomasa de nanoflagelados heterotróficos del lago Atexcac al comportarse los datos como no paramétricos se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa por mes obteniendo una $p > 0.092$ observando que existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza, para su comprobación también se analizó en el diagrama de cajas múltiples con muesca en donde el mes de febrero presenta diferencia con el mes de agosto y octubre, así como el mes de septiembre con agosto y octubre (Fig.28).

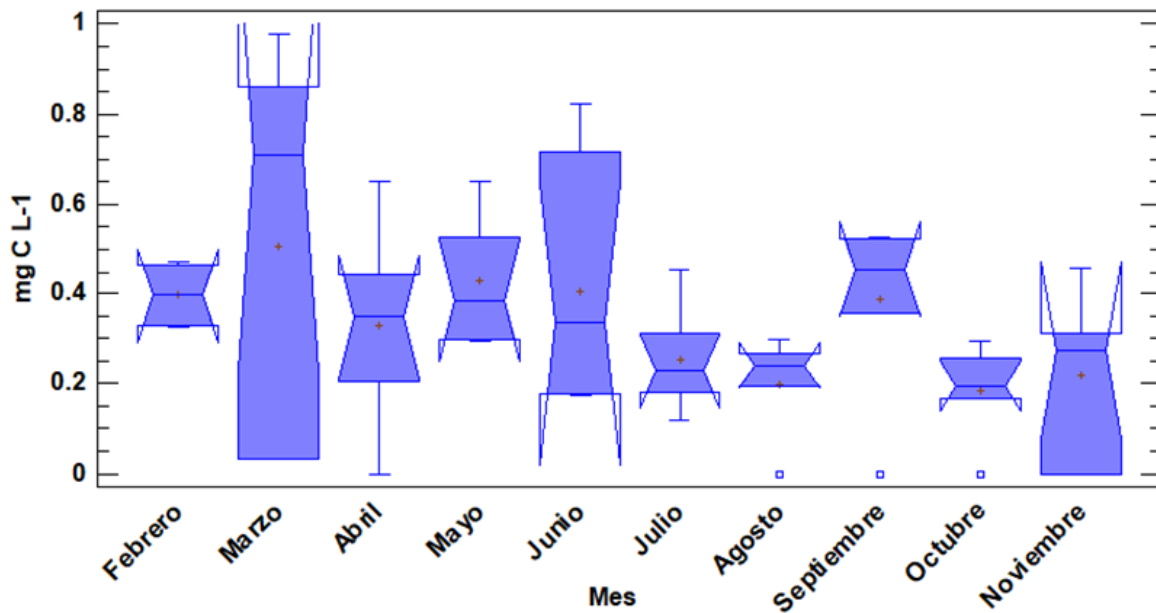


Fig. 28. Diagrama de cajas múltiples con muesca de la biomasa de nanoflagelados heterotróficos (NFH) del lago Atexcac. Se indica la biomasa registrada para cada mes del año.

La biomasa de NFH por estrato al comportarse como datos no paramétricos se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para la biomasa por estrato, con una $p < 0.024$ se encontró que existía diferencia estadísticamente significativa con un 95% de confianza; para visualizar estas diferencias se realizó un diagrama de caja y bigote con muesca donde se observa que la diferencia más evidente se encuentra entre la mezcla con el hipolimnion (Fig. 29).

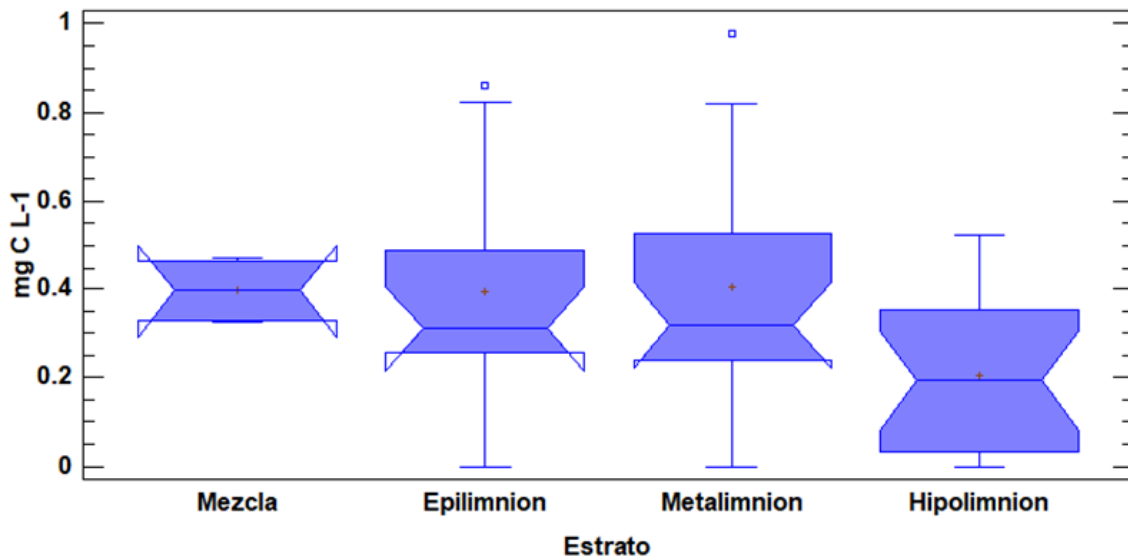


Fig. 29. Diagrama de cajas múltiples con muesca de la biomasa de nanoflagelados heterotróficos (NFH) del lago La Preciosa. Se representa en cada caja la biomasa del NFH registrada para la etapa de mezcla y es comparada con los estratos que se forman durante la etapa de estratificación (epilimnion, metalimnion e hipolimnion).

Distribución espacio-temporal de nanoflagelados heterotróficos en el lago La Preciosa.

La densidad de los nanoflagelados heterotróficos (NFH) en el lago La Preciosa durante el periodo de muestreo se observó una concentración de 5.04×10^2 Org. L⁻¹ durante la mezcla a lo largo de la columna de agua (Fig. 30). Durante la estratificación temprana el NFH su densidad se registró de 5.91×10^2 Org. L⁻¹ en el epilimnion, observándose un ligero incremento de 6.47×10^2 Org. L⁻¹ sobre el metalimnion y un marcado descenso de la abundancia en el hipolimnion de 2.66×10^2 Org. L⁻¹ (Fig. 30). En la estratificación bien establecida los dos primeros estratos observaron similitud en la densidad de los organismos, para el epilimnion 5.79×10^2 Org. L⁻¹ y para el metalimnion 5.65×10^2 Org. L⁻¹, se observó un marcado descenso hacia el hipolimnion de 1.52×10^2 Org. L⁻¹. Por último, en la estratificación bien establecida la mayor concentración se registró en el epilimnion con 9.94×10^2 Org. L⁻¹, se observó un descenso hacia el metalimnion de 9.08×10^2 Org. L⁻¹ y en el hipolimnion la concentración osciló de 1.61×10^2 Org. L⁻¹ (Fig. 30).

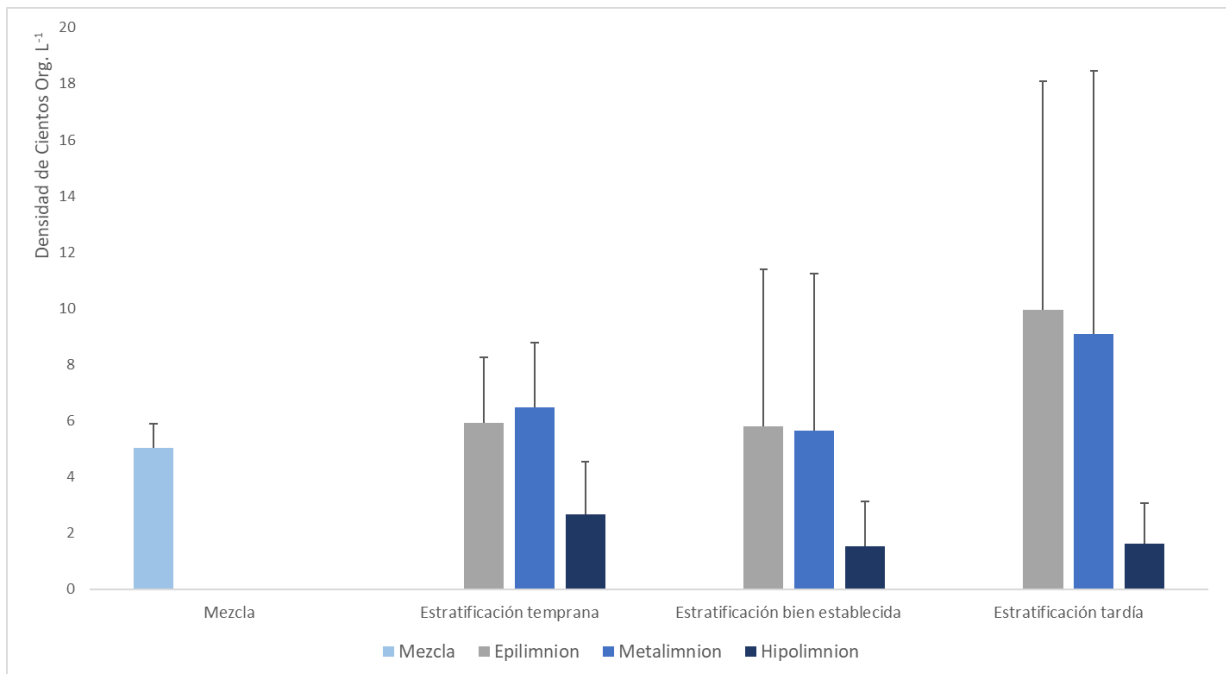


Fig. 30. Densidad y distribución de nanoflagelados heterotróficos (NFH) en sus etapas hidrodinámicas espacial y temporal en el lago La Preciosa.

Las observaciones con la curva de probabilidad normal para los NFH en el lago La Preciosa mostraron que la densidad por mes correspondía con una distribución normal solo si se realizaba un ajuste obteniendo el logaritmo de la densidad para que correspondiera dentro de los límites del sesgo y curtosis. Al realizar un análisis de la varianza y transformar el logaritmo de la densidad de los NFH por mes, se encontró con un 95% de nivel de significancia diferencias significativas [$F_{(9,45)}=2.66, p<0.014$]. En la prueba de rangos múltiples de Tukey se indica que las diferencias encontradas para la densidad de los NFH corresponden para el mes de agosto respecto a todos los demás meses de muestreo, como se observa también con el análisis de cajas múltiples con muesca (Fig. 31).

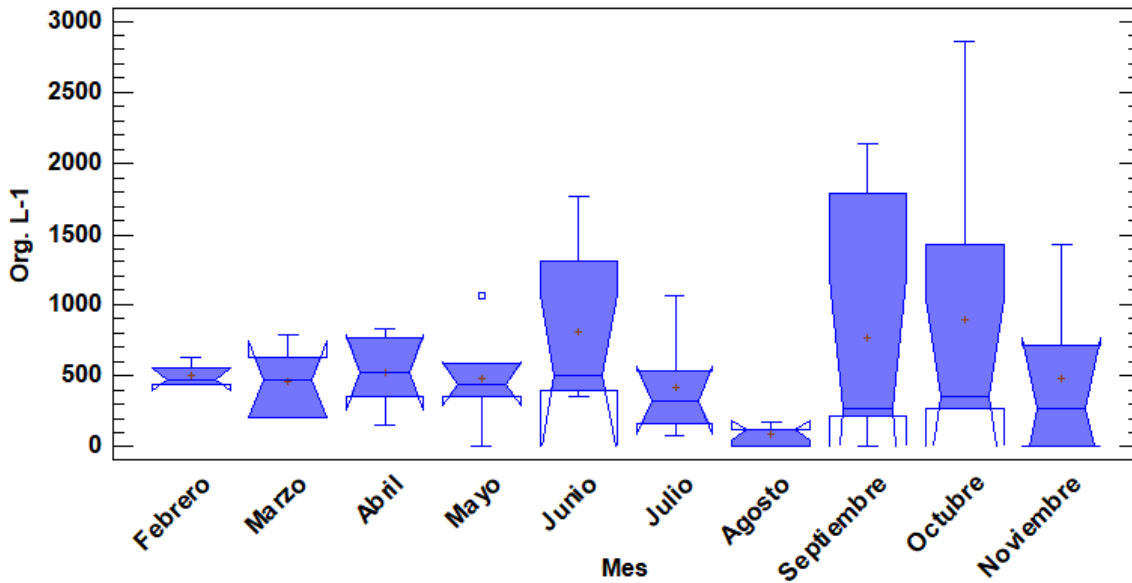


Fig. 31. Diagrama de cajas múltiples con muesca en la densidad de nanoflagelados heterotróficos por mes de en lago La Preciosa.

En la densidad del NFH por estrato en el lago La Preciosa se observó que los datos corresponden a una distribución normal con un ajuste a logaritmo de la densidad. Al realizar el análisis de la varianza con el logaritmo de la densidad del NFH por estrato, se encontró con un 95% de confianza que existe una diferencia estadísticamente significativa [$F_{(3,51)}=4.74$, $p<0.0054$], la prueba de rangos múltiples de Tukey mostró las diferencias en las densidades de los NFH ubicadas en la mezcla y metalimnion con respecto al hipolimnion y se muestran en el diagrama de cajas múltiples (Fig. 32).

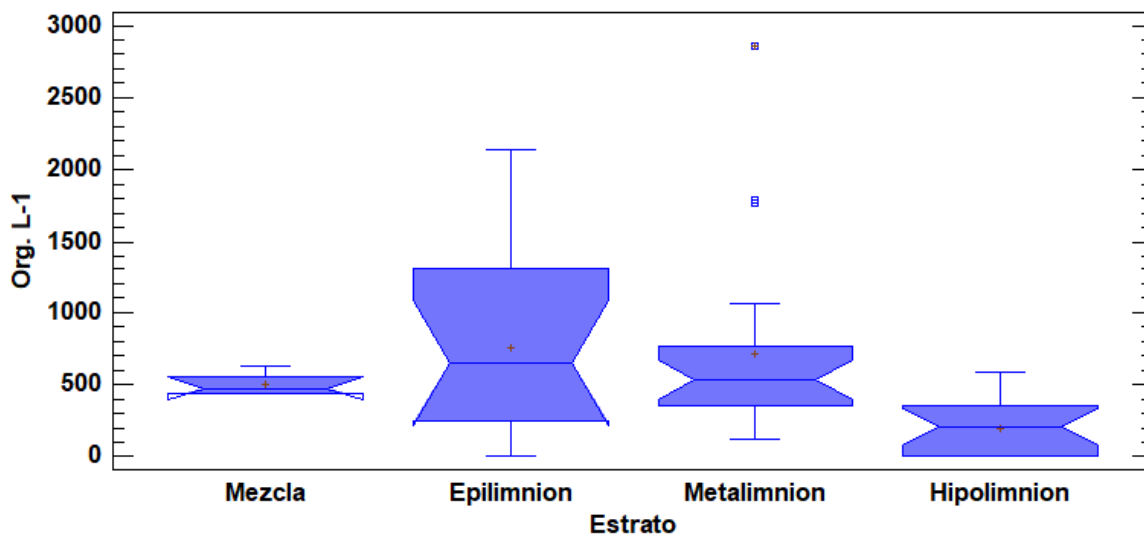


Fig. 32. Diagrama de cajas múltiples con muesca para la densidad de nanoflagelados heterotróficos por estrato en el lago La Preciosa.

En el lago La Preciosa las concentraciones de biomasa para los NFH registraron para el periodo de mezcla se obtuvo una oscilación $0.3711 \text{ mg C L}^{-1}$ a lo largo de la columna de agua (Fig. 33). Durante las etapas hidrodinámicas en el año de muestreo se observó en todas las estratificaciones una mayor cantidad de biomasa en el metalimnion y al revisar cada una de las etapas, en la estratificación temprana sobre el epilimnion la concentración osciló de $0.5653 \text{ mg C L}^{-1}$, para el metalimnion se registró una biomasa $0.7197 \text{ mg C L}^{-1}$ y el hipolimnion $0.3618 \text{ mg C L}^{-1}$ (Fig. 33). En la estratificación bien establecida el epilimnion osciló una biomasa de $0.5453 \text{ mg C L}^{-1}$, aumentando muy ligeramente en el metalimnion en $0.5796 \text{ mg C L}^{-1}$ y en el hipolimnion $0.1498 \text{ mg C L}^{-1}$; Para la estratificación bien establecida sobre el epilimnion se observó una biomasa de $0.1469 \text{ mg C L}^{-1}$, en el metalimnion un aumento muy marcado que osciló en $0.6546 \text{ mg C L}^{-1}$ y por último un descenso hacia el hipolimnion de $0.0580 \text{ mg C L}^{-1}$ (Fig.33).

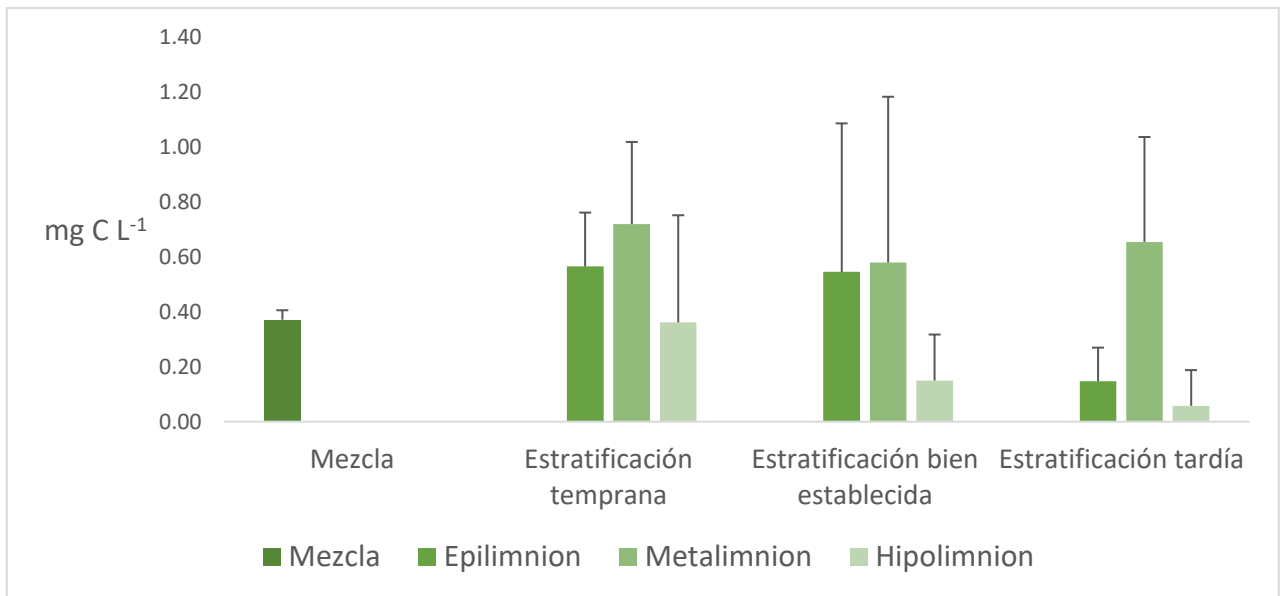


Fig. 33. Biomasa de nanoflagelados heterotróficos. Se indican las etapas hidrodinámicas (mezcla y estratificación) durante un ciclo anual, asimismo se representan los estratos (epilimnion, metalimnion e hipolimnion) en los que se divide el lago La Preciosa cuando se encuentra estratificado.

En la biomasa de nanoflagelados heterotróficos en el lago La Preciosa al ser datos no paramétricos se procedió a realizar una prueba de Kruskal-Wallis para biomasa por mes obteniendo una $p < 0.017$ comprobando que existe una diferencia estadísticamente significativa con un 95% de confianza. Usando al diagrama de cajas múltiples con muesca se puede observar las diferencias en febrero, marzo, abril y junio en comparación con el mes de agosto (Fig. 34).

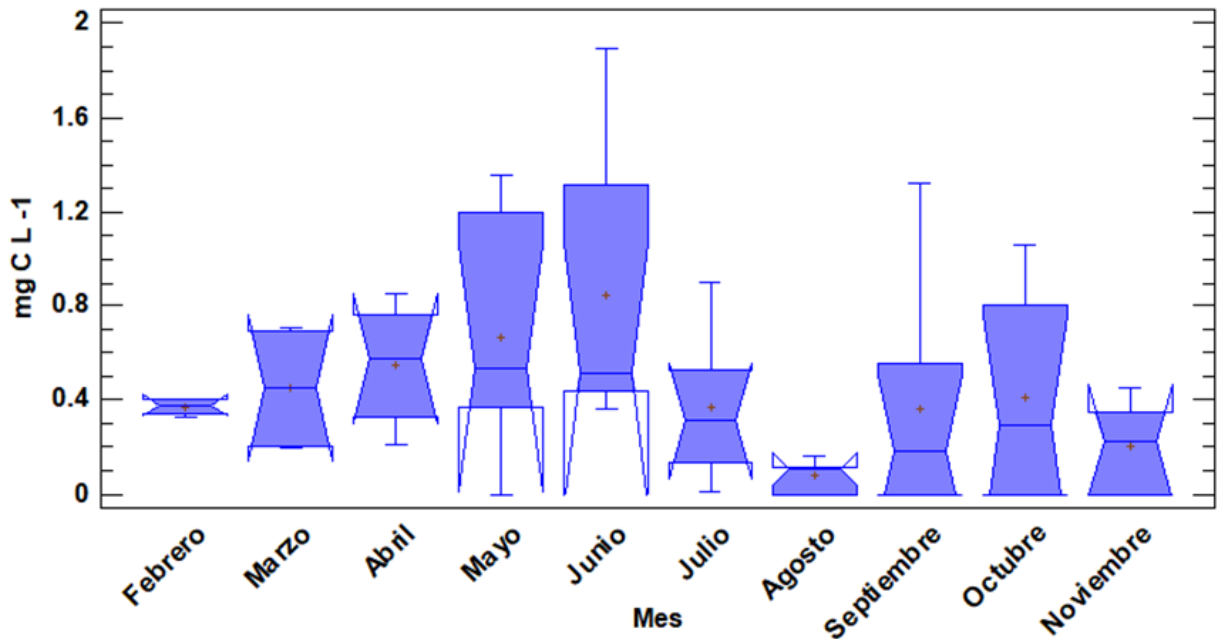


Fig. 34. Diagrama de cajas múltiples con muesca de (NFH) por cada mes de muestreo en el lago La Preciosa. Se indica la biomasa registrada para cada mes del año.

Para los NFH por estrato en el lago La Preciosa con la curva de probabilidad normal al ser datos no paramétricos se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para biomasa por estrato con un 95% de confianza existen diferencias estadísticamente significativas con una $p < 0.0002$ las cuales se apoyó en el diagrama de cajas múltiples con muesca para identificar las diferencias entre estratos obteniendo que la mezcla y el metalimnion existen diferencias respecto al hipolimnion (Fig. 35).

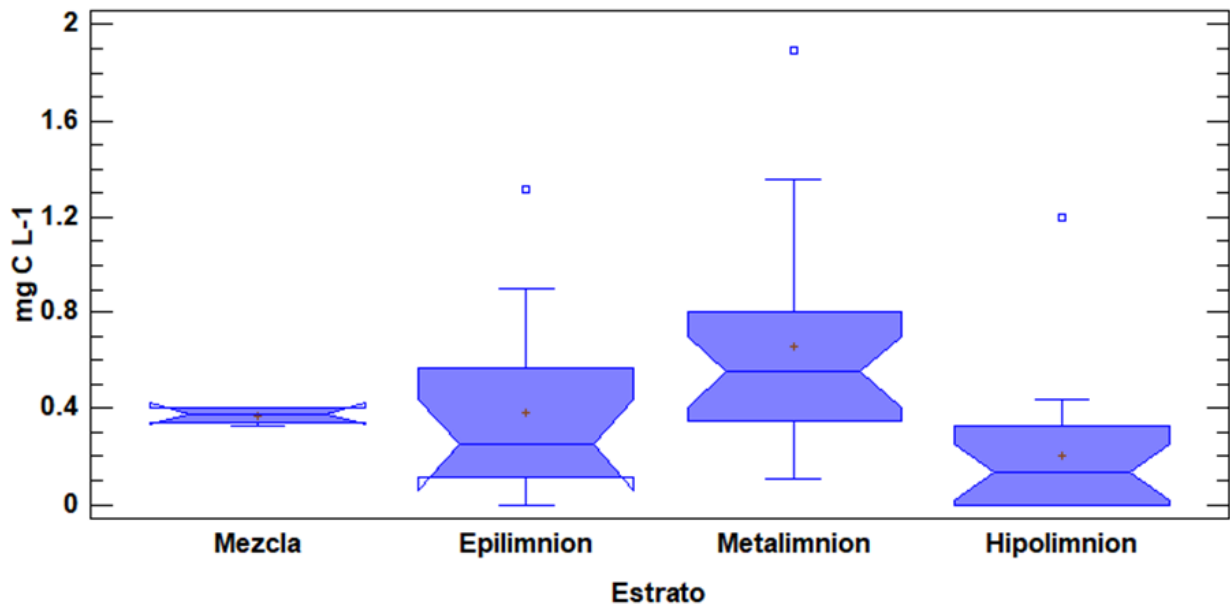


Fig. 35. Diagrama de cajas múltiples con muesca en la biomasa de nanoflagelados heterotróficos (NFH) por estrato en el lago La Preciosa.

En el análisis estadístico para encontrar el grado de asociación de la componente biológica con los parámetros limnológicos fue a la correlación ordinal de Spearman, ya que estas variables no se ajustaban a la distribución normal (Cuadro 3, 4, 5, 6).

Correlaciones entre la densidad y biomasa del picoplancton heterotrófico en el lago Atexcac.

Al aplicar la prueba de correlación de Spearman, la densidad del picoplancton heterotrófico (PPH) se presentó relación positivamente con la biomasa del PPH, densidad de los nanoflagelados heterotróficos (NFH) y la biomasa de los NFH, donde se observó una relación lineal entre las variables donde una variable al aumentar la otra variable aumenta con un soporte de 61 pares de datos, se puede decir que en los mayores picos en la densidad de PPH también aumentaron los NFH en profundidad y tiempo en el lago Atexcac (Cuadro 3). Los datos obtenidos en la temperatura, el oxígeno disuelto y la conductividad muestran

una correlación positiva con la densidad del PPH, así se observó que entre mayor sea la temperatura, oxígeno disuelto y conductividad mayor será la abundancia del PPH. En comparación con el pH y la dureza total se encontró una correlación negativa con la densidad del PPH, observando que la mayor abundancia corresponde con una disminución de la dureza total y con el pH (Cuadro 3). Para los nutrientes se encontró una correlación negativa con el fósforo total y los nitratos con la densidad del PPH, indicando que en los puntos de menor concentración de estos nutrientes disminuyen con el incremento de la densidad del PPH (Cuadro 3).

Las correlaciones en la biomasa del PPH fueron pocas las que resultaron significativas. Así se encontró correlación con la temperatura y el oxígeno disuelto de forma positiva cuando la temperatura y el oxígeno aumentan la biomasa del PPH también incrementa (Cuadro 3).

Cuadro 3. Correlación ordinal de Spearman entre la densidad del PPH, biomasa del PPH y los NFH y los parámetros limnológicos del lago Atexcac. Las correlaciones se estimaron con una ($p < 0.05$) con un nivel de confianza del 95%. Número de pares de datos analizados de 54 a 61. En el cuadro sólo se citan aquellas correlaciones que fueron significativas.

		Densidad PPH			Biomasa PPH					
		r	No. datos	P	r	No. datos	P			
Organismos	Biomasa PPH $\mu\text{g C L}^{-1}$	0.3688	61	0.0043	Organismos	Densidad PPH cel/ml	0.3688	61	0.0043	
	Densidad NFH Org L^{-1}	0.5825	61	0.0000		Parámetros Físico-Químicos	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	0.4502	61	0.0005
	Biomasa NFH mg C L^{-1}	0.3105	61	0.0162			Oxígeno mgL^{-1}	0.5808	61	0.0000
Parámetros Físico-Químicos	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	0.3916	61	0.0024	Nutrientes	Fosforo total mg L^{-1}	-0.5111	60	0.0001	
	Oxígeno mgL^{-1}	0.3222	61	0.0126		Nitratos mg L^{-1}	-0.2884	54	0.0358	
	pH	-0.5309	61	0.0000						
	Conductividad mS cm^{-1}	0.4004	61	0.0019						
	Dureza total $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$	-0.3643	61	0.0048						

Correlaciones en la densidad y biomasa de nanoflagelados heterotróficos en el lago Atexcac.

Para las densidades de los nanoflagelados heterotróficos (NFH) en relación con los parámetros biológicos las correlaciones que se encontraron fueron con la densidad del picoplancton heterotrófico (PPH) ya mencionada previamente y correlación positiva con la biomasa de los NFH (Cuadro 4). Las correlaciones estudiadas en los parámetros físico-químicos se encontró una asociación positiva con la temperatura y la conductividad donde los NFH responden a los incrementos de estos parámetros; así como una correlación negativa en el pH, los bicarbonatos y la dureza total, donde al bajar las concentraciones de estos parámetros la densidad de los NFH incrementan (Cuadro 4). Para las correlaciones en los nutrimentos con el fósforo total y los nitratos se correlacionaron de manera negativa con la densidad de NFH (Cuadro 4).

Las correlaciones observadas para la biomasa de NFH se encontraron con la densidad del PPH y la densidad de los NFH de forma positiva; Dentro de los parámetros físico-químicos se obtuvo una correlación negativa con los bicarbonatos y estos bicarbonatos al disminuir su concentración aumenta la biomasa de los NFH (Cuadro 4). Por último, en un análisis en los nutrimentos se encontró una correlación negativa para el fósforo total y los nitratos en relación con la biomasa de NFH, observando entre menor es la concentración de estos nutrimentos, la densidad de la biomasa de NFH aumenta. Por último, se observa una correlación positiva en los nitritos con respecto a este parámetro biológico.

Cuadro 4. Correlación ordinal de Spearman entre la densidad del NFH, biomasa del NFH y los organismos biológicos de los PPH y los parámetros limnológicos del lago Atexcac. Las correlaciones se estimaron con una ($p < 0.05$) con un nivel de confianza del 95%. Numero de pares de datos analizados de 54 a 61.

		Densidad NFH					Biomasa NFH		
		r	No. datos	P			r	No. datos	P
Organismos	Densidad PPH cel/ml	0.5825	61	0.0000	Organismos	Densidad PPH cel/ml	0.3105	61	0.0162
	Biomasa NFH mg C L ⁻¹	0.8150	61	0.0000		Densidad NFH Org L ⁻¹	0.8150	61	0.0000
Parámetros Físico-Químicos	Temperatura °C	0.2965	61	0.0216	Parámetros Físico-Químicos	HCO ₃ ⁻	-0.3980	61	0.0021
	pH	-0.2899	61	0.0247		Nutrientes	Fosforo total mg L ⁻¹	-0.3851	60
	Conductividad mS cm ⁻¹	0.4193	61	0.0012	Nitritos mg L ⁻¹		0.2602	60	0.0457
	HCO ₃ ⁻	-0.3946	61	0.0022	Nitratos mg L ⁻¹		-0.3899	54	0.0045
	Dureza total mg CaCO ₃ /L	-0.2884	61	0.0255					
Nutrientes	Fosforo total mg L ⁻¹	-0.4900	60	0.0002					
	Nitratos mg L ⁻¹	-0.3993	54	0.0036					

Correlaciones en la densidad y biomasa del picoplancton heterotrófico en el lago La Preciosa.

Los datos analizados en la densidad del PPH se encontró correlaciones positivas con la biomasa del PPH, la densidad y la biomasa de los NFH, observando que los dos grupos biológicos aumentan de manera directa, indicando que existe una relación lineal entre las dos variables (Cuadro 5). Para las correlaciones analizadas en los parámetros físico-químicos con la densidad de PPH se encontró correlación positiva con la temperatura, oxígeno disuelto y carbonatos donde la densidad del PPH se ve favorecida al aumentar este parámetro físico y las concentraciones de estos parámetros. Así también se encontró una correlación negativa con los bicarbonatos y se observa que la densidad del PPH se ve disminuida al aumentar la concentración de bicarbonatos (Cuadro 5). Por último, sólo se encontró una correlación negativa con el amonio, donde al disminuir la concentración del amonio, aumenta la densidad del PPH en el lago La Preciosa (Cuadro 5).

La correlación analizada para la biomasa del PPH se encontró una correlación positiva con los grupos de organismos estudiados en la densidad del PPH, densidad de NFH y biomasa de NFH (Cuadro 5). En el análisis de los parámetros físico-químicos se observó correlación positiva con la temperatura, oxígeno y carbonatos. Por último, sólo se encontró una correlación negativa del amonio con la biomasa del PPH (Cuadro 5).

Cuadro 5. Correlación ordinal de Spearman entre la densidad del PPH, biomasa del PPH y los organismos biológicos de los NFH y los parámetros limnológicos del lago La Preciosa. Las correlaciones se estimaron con una ($p < 0.05$) con un nivel de confianza del 95%. Numero de grupos analizados de 59 a 61. En el cuadro solo se citan aquellas correlaciones que fueron significativas.

		Densidad PPH		
		r	No. datos	P
Organismos	Biomasa PPH $\mu\text{g C L}^{-1}$	0.9945	61	0.0000
	Densidad NFH Org L^{-1}	0.4943	61	0.0001
	Biomasa NFH mg C L^{-1}	0.4799	60	0.0002
Parámetros Físico-Químicos	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	0.5287	62	0.0000
	Oxígeno mgL^{-1}	0.4617	62	0.0003
	CO_3^-	0.4278	62	0.0008
	HCO_3^-	-0.2546	62	0.0468
Nutrientes	Amonio mgL^{-1}	-0.3541	62	0.0057

		Biomasa PPH		
		r	No. datos	P
Organismos	Densidad PPH cel/ml	0.9945	61	0.0000
	Densidad NFH Org L^{-1}	0.5286	60	0.0000
	Biomasa NFH mg C L^{-1}	0.5019	59	0.0001
Parámetros Físico-Químicos	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	0.5312	61	0.0000
	Oxígeno mgL^{-1}	0.4585	61	0.0004
	CO_3^-	0.4147	61	0.0013
Nutrientes	Amonio mgL^{-1}	-0.3354	61	0.0094

Correlaciones en la densidad y biomasa de nanoflagelados heterotróficos en el lago La Preciosa.

El análisis aplicado a la densidad de los NFH se encontró correlación positiva con los parámetros biológicos de la densidad y biomasa del PPH, así como la biomasa de los NFH, se observa que el incremento de los dos organismos se da en una relación directa a lo largo del ciclo anual (Cuadro 6). Para la densidad de los NFH en análisis con los parámetros físico-químicos se encontraron correlaciones positivas en la temperatura, oxígeno disuelto, pH y

conductividad (Cuadro 6). Por último, en los nutrimentos se encontró correlación negativa con el fósforo total y los nitratos con 61 grupos, se observa que al disminuir la cantidad de estos nutrimentos la densidad de nos NFH aumenta (Cuadro 6).

Para el análisis de correlación con la biomasa de los NFH, se encontró que el PPH en densidad y biomasa, así como la densidad del NFH se correlacionan de manera significativa (Cuadro 6). En los parámetros fisicoquímicos la correlación positiva es con la temperatura y el pH mientras que de manera negativa se observó en los carbonatos y bicarbonatos. Por último, para los nutrimentos el análisis solo mostró correlación con el fósforo total y los nitratos de forma negativa con la biomasa de NFH en el lago La Preciosa (Cuadro 6).

Cuadro 6. Correlación ordinal de Spearman entre la densidad de los NFH, biomasa de los NFH y los organismos biológicos del PPH y los parámetros limnológicos del lago La Preciosa. Las correlaciones se estimaron con una ($p < 0.05$) con un nivel de confianza del 95%. Numero de grupos analizados de 59 a 61. En el cuadro solo se citan aquellas correlaciones que fueron significativas.

		Densidad NFH		
		r	No. datos	P
Organismos	Densidad PPH cel/ml	0.4943	61	0.0001
	Biomasa PPH $\mu\text{g C L}^{-1}$	0.5286	60	0.0000
	Biomasa NFH mg C L^{-1}	0.7612	60	0.0000
Parámetros Físico-Químicos	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	0.3527	61	0.0063
	Oxígeno mg L^{-1}	0.3972	61	0.0021
	pH	0.3560	61	0.0058
	Conductividad mS cm^{-1}	0.3559	61	0.0058
Nutrientes	Fosforo total mg L^{-1}	-0.3043	61	0.0184
	Nitratos mg L^{-1}	-0.2720	61	0.0351

		Biomasa NFH		
		r	No. datos	P
Organismos	Densidad PPH cel/ml	0.4799	60	0.0002
	Biomasa PPH $\mu\text{g C L}^{-1}$	0.5019	59	0.0001
	Densidad NFH Org L^{-1}	0.7612	60	0.0000
Parámetros Físico-Químicos	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	0.2837	60	0.0293
	pH	0.3018	60	0.0204
	Dureza total $\text{mg CaCO}_3 / \text{L}$	-0.4328	60	0.0009
	Dureza Ca $\text{mg CaCO}_3 / \text{L}$	-0.2657	60	0.0412
Nutrientes	Fosforo total mg L^{-1}	-0.4481	60	0.0006
	Nitratos mg L^{-1}	-0.4207	60	0.0012

Comparación de la componente biológica entre el lago Atexcac y el lago La Preciosa.

Para poder comparar la componente biológica entre ambos lagos y saber si existía diferencia estadísticamente significativa entre las medias se tomaron los promedios de cada

una de las abundancias y biomásas del PPH y de los NFH por cada mes del año estudiado y por estrato de acuerdo con los gradientes de temperatura de cada etapa hidrodinámica y mezcla.

Obteniendo como resultado que en las abundancias del PPH entre el lago Atexcac y el lago La Preciosa, por medio de una prueba de "t" para comparar medias se obtuvo un valor $P=0.3422$, puesto que el valor P calculado no es menor que 0.05 no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras de datos, con un nivel de confianza del 95.0%. De la misma forma se realizó un análisis con las muestras obtenidas de las biomásas del PPH en los dos lagos, la prueba de "t" para comparar las medias obtuvo un valor de $P=0.5286$ lo cual asegura que no existe diferencia significativa entre las medias.

En el caso de los NFH se revisaron que las abundancias de ambos lagos correspondieran a una distribución normal, al observar que el caso del lago de Atexcac las abundancias observadas no correspondían a una distribución normal se procedió a realizar una prueba no paramétrica para comparar las medianas de ambos lagos con la prueba de Wilcoxon, en donde se obtuvo el valor de $P=0.0077$ por lo tanto, debido a que el valor P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95.0%. Para la comparación en las biomásas de los NFH el lago Atexcac no correspondía a una distribución normal por lo tanto, al comparar las medianas de la biomasa de los NFH en ambos lagos con la prueba de Wilcoxon, se obtuvo el valor de $P=0.3805$ por lo tanto, debido a que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un 95.0%.

DISCUSIÓN.

Temperatura, oxígeno y zona eufótica.

De acuerdo con la dinámica de temperatura y oxígeno durante el año de muestreo en el 2015 (Fig. 4 y 5); debido a que los dos lagos se encuentran en la misma latitud son denominados tropicales, además de una profundidad mayor a los 30 m se clasifican como monomícticos cálidos, correspondiendo a lo propuesto por Lewis (1983). Su temperatura no es nunca menor a los 4°C y tiene una sola recirculación a lo largo del año como lo menciona Wetzel (2001), que corresponde con el periodo invernal hemisférico. Esta dinámica térmica correspondió con lo descrito por Alcocer *et al.* (2000) con un periodo de mezcla y uno de estratificación dividida en estratificación temprana, bien establecida y tardía, de igual manera como lo reporta para el lago maar Alchichica, perteneciente a la misma cuenca.

En el lago Atexcac durante el periodo de la mezcla enero y febrero 2015, la temperatura promedio en el cuerpo de agua se registró de 17.7°C, más alta que lo registrado por López (2018) en su estudio del 2014 donde la temperatura fue de 17 °C; lo reportado por Arellano-Posadas y González-Flores (2011) en su estudio del 2010 con una temperatura de 16°C. En el lago La Preciosa durante el periodo de la mezcla la temperatura se registró de 17.5°C, contraste con lo que reporta González (2017) en donde la temperatura registrada para el año 2014 fue de 16.5°C y lo reportado por Benítez-Hernández y Contreras-Tapia, (2016) en donde la temperatura máxima en el periodo de la mezcla fue de 16.8°C. El reporte anual del clima global realizado por la NOAA (2018) afirma que el 2015 fue el segundo año más cálido del que se tiene registro desde 1880, este reporte da sustento a la comparación en el aumento de cerca de un grado de diferencia con el año anterior de muestreo y que a mediano o largo plazo pueda causar cambios en la dinámica de la comunidad microbiana en los dos lagos de estudio, aportando así información descriptiva sobre el cambio acelerado y el impacto a nivel global, por lo tanto se tiene sustento para futuras investigaciones que busquen frenar estos cambios de manera acelerada del cambio climático.

Al término de la estación invernal los dos lagos comienzan el proceso de estratificación térmica, estas siguientes etapas hidrodinámicas, con la interrupción de los vientos helados del invierno y una inversión en el flujo calórico (Lewis, 1996) y este intercambio de temperatura sobre la atmosfera hace notar y delimitar la termoclina y oxiclina a lo largo de la columna de agua (Fig. 4 y 5). Observando que en cada una de las etapas existía una relación entre el perfil de temperatura y oxígeno disuelto, aunque la oxiclina se profundiza más como resultado de la acumulación de materia orgánica hacia el hipolimnion y su oxidación microbiana. En los dos lagos se observó que la termoclina se situaba por debajo de la zona eufótica o en algunos meses al límite de la zona eufótica. Cabría mencionar que en el lago Atexcac durante la estratificación tardía se observó un distanciamiento pronunciado de la zona eufótica y de la termoclina como lo publica Rosas (2018), donde menciona que la zona de mezcla y la zona eufótica al encontrarse en el mismo nivel de profundidad se considera que es la condición ideal de los organismos fotoautotróficos en el intercambio y consumo de nutrimentos, así como la utilización de la luz solar.

En el lago Atexcac durante los periodos de estratificación y con una temperatura ideal, además de registrar excedentes de fósforo y concentraciones bajas de nitrógeno en el sistema, se desarrolla una cianobacteria filamentosas *Nodularia* *fc. spumigena* (Cook y Hollan, 2012; Hollan *et al.*, 2012). Así como lo reportado por Rojas (2017) López (2018) en donde el florecimiento se observó a partir del inicio de la estratificación, este suceso no se observó en el lago La Preciosa al ser subsalino, por lo que, al parecer esta cianobacteria, solo se presenta en los lagos hiposalinos como Atexcac y Alchichica. Es importante mencionar la sucesión estacional de esta cianobacteria por su importancia en el aprovechamiento de las concentraciones de nutrimentos como el fósforo, porque al parecer no presenta una variación que afecte en la abundancia del picoplancton heterotrófico y de los nanoflagelados heterotóxicos. Lo que reporta Moran-Ventura (2016) es la abundancia de las algas verdes durante el periodo de la estratificación este florecimiento se produce comúnmente en lagos templados (Wehr y Sheath, 2003), como en lagos tropicales (Olivia *et al.*, 2001; Hernández-Morales *et al.*, 2011). Se puede mencionar que durante el periodo de muestreo en el lago Atexcac el florecimiento de esta

cianobacteria no influyó en la profundidad de la zona eufótica. En el lago La Preciosa la zona eufótica durante el periodo de estratificación se ve beneficiada por la abundancia de algas verdes como *Oocysts parva* y *O. submarina* (Cárcamo, 2017).

En el lago Atexcac y el lago La Preciosa durante el periodo de mezcla, la concentración de oxígeno fue homogénea a lo largo de la columna de agua, este proceso de redistribución de nutrimentos desde el fondo de los lagos permite el florecimiento de organismos fitoplanctónicos durante la época invernal específicamente en lagos tropicales Vinner-Mozzini *et al.*, (2003); para ambos lagos se reporta un florecimiento invernal de diatomeas (López, 2018) y (Moran-Ventura, 2016).

El oxígeno disuelto en ambos lagos durante las etapas de estratificación mostró un perfil clinógrafo, en donde la mayor parte de saturación del oxígeno disuelto se observó en el epilimnion y una disminución marcada por debajo de la termoclina hacia el hipolimnion, esto se debe a que la temperatura y la salinidad tienen un papel importante en la solubilidad del oxígeno en el agua (Alcocer *et al.*, 2000). Además, el estrato del hipolimnion corresponde con la zona trofólítica en donde dominan los procesos de respiración sobre los de producción (Wetzel, 2001). En donde el hundimiento de organismos provoca una mayor oxidación bacteriana de la materia orgánica en descomposición (Ducklow, 2000). En ambos lagos durante los periodos de muestreo la concentración más baja de oxígeno disuelto se localizó en la estratificación bien establecida con un valor mínimo de 0.11 mgL^{-1} en Atexcac y 0.14 mgL^{-1} en el lago La Preciosa. Este mismo comportamiento se ha reportado en estudios realizados por Macek *et al.* (1994, 2000), Arellano-Posadas y González-Flores (2011), Arellano-Posadas (2017) y González-Flores (2017) confirman que los dos lagos en el hipolimnion pueden tener concentraciones muy bajas de oxígeno disuelto, sin llegar a la completa anoxia; como lo reportado por Alcocer *et al.* (2000) en el lago Alchichica donde se reporta anoxia completa durante la estratificación bien establecida en la zona del hipolimnion.

Alcalinidad y pH

De acuerdo con Wetzel *et al.* (2001) el sistema de amortiguamiento del pH está estrechamente relacionado con los valores de dominancia de carbonatos y bicarbonatos. Esta dominancia indicará el valor del pH provocando a su vez condiciones de equilibrio químico. Los bicarbonatos han predominado desde el periodo de formación en los lagos de estudio hasta la actualidad, sus variaciones son producto del intercambio iónico al contacto con los materiales volcánicos (Can, 2011). En el lago Atexcac el pH fue de 8.7 ± 0.2 en promedio durante el año de muestreo y en el lago La Preciosa 8.8 ± 0.2 , esto sugiere que los lagos estudiados son de carácter alcalino con una concentración elevada del ión bicarbonato; en el lago Atexcac se pudo observar una marcada tendencia en la dominancia de los bicarbonatos sobre los carbonatos, en comparación con el lago La Preciosa la dominancia de los bicarbonatos se observó en la estratificación temprana y estratificación bien establecida y una dominancia de carbonatos en la etapa de la mezcla y la estratificación tardía (Fig. 6 y 7). De manera contrastantes al presente estudio se ha reportado una dominancia de los carbonatos sobre los bicarbonatos en el lago Atexcac (Arellano-Posadas, 2017) al igual que La Preciosa (González-Flores, 2017). Estos lagos son considerados de carácter alcalino por su composición iónica que establece una salinidad la cual no tiene origen marino y al situarse en una cuenca endorreica con una precipitación anual (400-500 mm) y la evaporación de (600 mm) provocando la dominancia del sodio y del bicarbonato Armienta, *et al.* (2008). Esta variación entre cada mes o incluso entre años lo atribuyen al whitening event en ambos lagos donde se da una nucleación de carbonatos producida por las picocianobacterias, fenómeno explicado por Zhu y Dittrich (2016). Este fenómeno es de suma importancia por ser indicador y prueba del calentamiento global.

Salinidad y Conductividad.

La concentración de los cationes en los lagos-cráter, sigue el orden de: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ para los lagos Alchichica, Atexcac, aunque en La Preciosa el magnesio es mayor que el

sodio, respecto de los aniones, por lo general siguen el orden de: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$ (Can, 2011). La conductividad en estos lagos se encuentra controlada por factores externos de dilución y concentración de minerales, al igual de la composición iónica del agua subterránea que alimenta los lagos (Armienta *et al.* 2008). La salinidad según Gibbs (1970), se puede encontrar influenciada por tres mecanismos, el primero dependería de los iones dominantes que se encuentran en las rocas, los procesos de evaporación y la precipitación. En estos lagos desempeña un papel importante del proceso de evaporación-cristalización por ser una cuenca cerrada, donde además predomina la evaporación sobre la precipitación pluvial a lo largo del año. Durante todo el periodo de muestreo la conductividad en el lago Atexcac se registró en promedio $11.5 \pm 1.2 \text{ mS cm}^{-1}$ y en el lago La Preciosa $2.0 \pm 0.2 \text{ mS cm}^{-1}$; mientras que la salinidad registrada para el lago Atexcac fue de $5.8 \pm 0.6 \text{ g L}^{-1}$ y para La Preciosa $1.0 \pm 0.1 \text{ g L}^{-1}$. De esta forma se puede clasificar al lago Atexcac según Vilaclara *et al.* (1993) como un lago hiposalino y atalasoalino por presentar sales de origen no marino y en el caso de La Preciosa se considera como un lago sub-salino (Martínez, 2010), en el cual se encuentra entre los límites de ser un cuerpo de agua dulce y salina. Esta tendencia puede ir en aumento, ya que tanto Alcocer y Escobar (1990) y Cruickshank (1992) reportan que la creciente extracción de aguas subterráneas incrementaría el proceso de salinización de los lagos. Estas diferencias en la salinidad no pueden estar relacionada con las abundancias entre ambos lagos con el picoplancton heterotrófico y los nanoflagelados, donde las mayores cantidades de abundancia en estos organismos los localizamos en el lago de La Preciosa y menor en el lago Atexcac, estas diferencias pueden estar más relacionadas con la depredación y los mecanismos que operan en el circuito microbiano.

Nutrientes.

Los nutrientes estudiados en ambos lagos mostraron un gradiente de concentraciones desde la parte superficial hasta el fondo a lo largo de todas las etapas hidrodinámicas. Danielidis *et al.* (1996) mencionan que los nutrientes responderían a la dinámica térmica de los lagos, así como a la abundancia en el fitoplancton. Estos comportamientos provocados por un gradiente en la densidad limitan el flujo de estos nutrientes en las

partes más superficiales, manteniendo el sistema en condiciones de oligotrofia tal como lo reportan Camacho *et al.* (2003). Las mayores concentraciones tanto del fósforo como del amonio y el nitrógeno inorgánico disuelto se localizaron hacia el fondo de ambos sistemas y conforme avanza las estratificaciones estas concentraciones se encuentran limitadas en el epilimnion, característico con una curva ortograda de un ambiente eutrófico altamente productivo (Wetzel, 2001), en los lagos maar poco productivos se da como resultado de la acumulación de la materia orgánica durante 8 meses del año en que permanece estratificado (Lewis, 1983). Aunque ambos sistemas acuáticos presentan un comportamiento clinogrado durante el año de muestreo, el lago Atexcac se clasifica como un sistema de tipo oligo-mesotrófico de acuerdo con la concentración de clorofila *a* y productividad primaria (López, 2018) y en el caso del lago La Preciosa es de tipo oligotrófico según los criterios publicados por (Cárcamo, 2017). Los nutrientes y sus concentraciones están estrechamente relacionados con el estado trófico del sistema y la limitación de los nutrientes es de suma importancia en su estudio para saber la función que cumple con los organismos como lo observado con el picoplancton heterotrófico y nanoflagelados heterotróficos en donde los nutrientes son parte importante en la remineralización del fósforo y del nitrógeno; mientras que estudios confirman que en los lagos templados el fósforo es el nutriente limitante en los microorganismos, otros estudios realizados por Zaret *et al.*, (1981) Henry y Tundisi (1982) y Davalos *et al.* (1989) sustentaron que en los lagos tropicales el nutriente limitante correspondía al nitrógeno; sin embargo, Hernández-Avilés *et al.* (2001) registra una colimitación de nutrientes entre el fósforo y nitrógeno, para los lagos Atexcac y La Preciosa, siendo un patrón recurrente en sistemas lacustres del altiplano mexicano.

Fósforo reactivo soluble y fósforo total.

Para ambos lagos el comportamiento del fósforo tuvo similitudes a través de las etapas hidrodinámicas, en donde se observó una distribución homogénea a lo largo de la columna en el periodo de la mezcla y con el avance en las etapas de estratificación se observó una mayor concentración hacia la parte del hipolimnion, de acuerdo con Wu *et al.*, (2020) este

comportamiento se debe a que existe una relación en las concentraciones del fósforo con las estratificación térmica además de la concentración de oxígeno disuelto que disminuye hacia el fondo, lo anterior favorece la precipitación de este elemento hacia los sedimentos reducidos. Payne (1986) menciona que, al existir una cierta acumulación de fosfatos al fondo del sistema en las etapas de estratificación y al romperse la termoclina al finalizar la estratificación tardía e iniciar la mezcla, acontece una remoción de este nutrimento a lo largo de la columna. Estos fosfatos se encuentran generalmente disponibles como ortofosfatos que es la principal fuente de aprovechamiento para el fitoplancton y el bacterioplancton. Aunque en la etapa de la mezcla se observa una disminución importante de del fósforo reactivo soluble por el florecimiento de diatomeas tal como se ha reportado para Alchichica (Ardiles, 2011) y Atexcac (Lagunas y Martínez, 2015).

Durante las estratificaciones en el lago de Atexcac y el lago de La Preciosa se observó en más de una ocasión la curva clinógrada (Fig.10 y 11) para el fósforo soluble reactivo y el fósforo total, lo que sugiere su variación vertical relacionada con el gradiente de densidad, que favorece la acumulación de nutrimentos en la termoclina y de los organismos que lo consumen y su posterior acumulación hacia el hipolimnion capturado en los sedimentos de los lagos. Durante la estratificación temprana en el lago Atexcac se observó una acumulación mayor de ortofosfatos en el metalimnion 0.040 mgL^{-1} y de fósforo total en el epilimnion 0.028 mgL^{-1} a comparación del hipolimnion; en el caso del lago La Preciosa se observó un pico alto en la estratificación bien establecida de ortofosfatos en el metalimnion 0.037 mgL^{-1} , estas concentraciones en las parte cercana a la termoclina Fallon y Brock, (1979) y Halemejko y Chrost, (1984) reportan que la liberación de ortofosfatos probablemente tenga efecto en a descomposición de la materia orgánica que quedó por el florecimientos de diatomeas y *Nodularia cf. spumigena* que al ser consumidas por el bacterioplancton lo remineraliza dejándolo de nueva cuenta disponible en el sistema.

Al observar que el fósforo se mantenía en bajas concentraciones en el epilimnion durante las etapas de estratificación, de acuerdo con Fuentes y Massol-Deyá (2002) y Lampert y Sommer, (2007) el fósforo inorgánico como ortofosfatos es el nutrimento más asimilable para el bacterioplancton y el fitoplancton haciéndola parte fundamental en la producción

primaria y secundaria con una gran importancia en el almacenamiento de energía (Björkman *et al.* 2000); además de que lo hace un factor de competencia y limitante por este nutriente entre ambos grupos.

Nitrógeno inorgánico (Amonio, Nitrito y Nitrato).

Los nutrimentos de compuestos nitrogenados durante el periodo de muestreo mostraron marcadas diferencias en ambos lagos a lo largo de las etapas de estratificación; en el caso de la mezcla en ambos lagos las concentraciones de amonio, nitrato y nitrito se mantuvieron distribuidas homogéneamente a lo largo de la columna de agua tal como lo reporta Lewis (1983). Estas bajas de concentraciones de compuestos nitrogenados son a consecuencia de los florecimientos anuales de diatomeas en los dos lagos como lo reportan Rojas (2017) y Cárcamo (2017) y lo descrito para Alchichica por Alcocer *et al.* (2008) y Ardiles *et al.* (2012). Así mismo bajo las condiciones de alta oxigenación en toda la columna de agua, se favorecen los procesos de oxidación por las bacterias de los compuestos reducidos de nitrógeno a nitratos (Sze, 1998), sobre todo porque en estos lagos las concentraciones de amonio son altas.

Para la estratificación temprana las concentraciones de amonio fueron aumentando en la parte del metalimnion 0.053 mg L^{-1} en el caso de Atexcac y en el epilimnion 0.07 mg L^{-1} en el lago La Preciosa y los nitratos se mantuvieron en bajas concentraciones y casi de manera homogénea (Fig. 12 y 13). En el caso del lago Atexcac este incremento gradual de concentraciones de amonio en la parte del metalimnion se debe al florecimiento de *Nodularia cf. spumigena* ya que, al contar con una concentración baja de compuestos nitrogenados, esta alga tiene la facultad de fijar el nitrógeno atmosférico asimilada por estas cianobacterias ingresándolas al sistema en forma de amonio (Haselkorn, 1986; Wetzel, 2001). La importancia de esta cianobacteria al fijar el nitrógeno en esta parte de la estratificación es fundamental para el funcionamiento del ciclo del nitrógeno ya que, al liberarla en forma de amonio, una parte del compuesto es oxidada en su forma de nitratos (Oliva *et al.*, 2001). En condiciones microaerobias o anaerobias el bacterioplancton

desnitrificante reduce los nitratos a nitritos y produce N_2 (Yamasaki *et al.*, 2002). En el caso del lago La Preciosa, el aumento gradual de amonio no es consecuencia directa de la función de organismos fijadores de nitrógeno al no existir *Nodularia cf. spumigena*, el lago cuenta con organismos de cadena trófica superiores como peces los cuales son los que aportan el amonio por sus desechos (Legendre y Rassoulzadegan 1995) y este a su vez es oxidado por el bacterioplancton nitrificante y reducido por el desnitrificante.

Para la estratificación bien establecida y la estratificación tardía ambos lagos presentaron concentraciones de nitratos y amonio completamente diferentes entre ambos lagos. En el caso del lago Atexcac las mayores concentraciones se localizaron en el hipolimnion tanto en la estratificación bien establecida y tardía (0.03 mg L^{-1} y 0.05 mg L^{-1}), de la misma forma los nitratos se observaron en mayor concentración durante estas etapas de estratificación (0.12 mg L^{-1} y 0.21 mg L^{-1}). Esta acumulación se debe a las bajas concentraciones de oxígeno en el fondo resultado de los procesos de descomposición de la materia orgánica entre los que destacan la amonificación bacteriana. Roldan y Ramírez (2008) reportan un aumento de bacterias es ocho veces mayor hacia el fondo del sistema cuando los lagos están estratificados y por tal motivo los procesos de amonificación aumentan sobre el hipolimnion. Arellano-Posadas y González-Flores (2011) indican que no se registró un aumento en la abundancia del bacterioplancton en la etapa de la estratificación tardía, pero sí el incremento en las concentraciones de amonio. Por tanto, las bajas concentraciones de nitritos, nitratos y amonio en estas etapas de estratificación se deben a los procesos de oxidación en el epilimnion y reducción hacia el hipolimnion y una mayor abundancia del PPH que ayudan a la remoción de los compuestos nitrogenados los cuales fueron observados así en los dos lagos de estudio en donde las mayores abundancias de PPH se localizaron en el epilimnion y metalimnion y una reducción hacia el hipolimnion. Asimismo, el fitoplancton utiliza el amonio ya que es la forma más asimilable y posteriormente las formas más oxidadas como nitratos y nitritos (Sze, 1998).

Componente biológica.

Las componentes del PPH participan en las redes tróficas a través del reciclaje de nutrimentos y como una vía alterna a la producción primaria para la generación de carbono orgánico particulado (Pomeroy *et al.*, 2007). El bacterioplancton además de estar limitado por la disposición de nutrimentos inorgánicos y sustratos orgánicos (Pace y Cole, 1994; Chrzanowsky y Grover, 2001) y este a su vez es regulado por el consumo de organismos superiores como el zooplancton (Sherr *et al.*, 1992).

La limitación por nutrimentos y la presión selectiva de organismos superiores como los nanoflagelados y el zooplancton generan cambios sobre la estructura taxonómica del bacterioplancton, así como la biomasa, la distribución de tamaños celulares y algunas características morfológicas (Šimek *et al.*, 1997; Strom, 2000). En los sistemas acuáticos, la presión hacia el bacterioplancton está dominada principalmente por los nanoflagelados heterótrofos (NFH) y en menor proporción por los ciliados y los microcrustáceos (Sherr y Sherr, 1987; Šimek y Chrzanowski, 1992), que depredan bacterias de manera que su remoción determina como se distribuye la biomasa bacteriana en los diferentes grupos funcionales (Jürgens *et al.*, 1999; Pernthaler *et al.*, 1997). Al comparar el lago de Atexcac y el lago La Preciosa se encontró que el PPH en el primer lago tiende a mantener sus abundancias en mayor proporción espacial y temporal durante todas las etapas de estratificación en las partes del epilimnion y el metalimnion, con una abundancia entre los 4.14×10^6 y 4.64×10^6 cél. mL⁻¹, en comparación con la abundancia en el hipolimnion donde se registró la menor concentración en la abundancia del PPH de 3.50×10^6 cél. mL⁻¹, en el periodo de la mezcla la abundancia observada fue de 3.36×10^6 cél. mL⁻¹ (Fig.12). Este reporte contrasta con lo encontrado en trabajos previos por Arellano-Posadas y González-Flores (2011) en donde registraron un máximo de abundancia de PPH al terminó de la mezcla e inicios de la estratificación de 9.5×10^6 cél. mL⁻¹ y de acuerdo con el avance en las estratificaciones bien establecida y tardía, la abundancia decreció por la disminución de los nutrimentos disponibles; y en el trabajo de Arellano-Posadas (2017) en donde reportó abundancias muy bajas en todas las etapas de estratificación y mezcla, su pico más alto se

registró de 2.44×10^6 cél. mL^{-1} . Esto indica que se puede presentar una variación interanual en la abundancia del PPH dependiendo de condiciones particulares asociadas con una mayor o menor actividad biológica y la generación de materia orgánica, que se observa también de manera más directa en los periodos de sucesión fitoplanctónica en cuanto permanencia e intensidad como ha sido reportado previamente; por ejemplo, para el florecimiento de *Nodularia spumigena* por Moran (2016) y López (2018). En el lago La Preciosa, la abundancia del PPH registrándose un comportamiento similar a lago Atexcac en la distribución espacial y temporal, pero con un aumento en las abundancias del epilimnion y metalimnion (4.39×10^6 y 5.00×10^6 cél. mL^{-1}) y en el hipolimnion (2.78×10^6 cél. mL^{-1}) y en el periodo de la mezcla (4.98×10^6 cél. mL^{-1}) (Fig. 13). Los resultados contrastaron con lo reportado por González-Flores (2017) en donde las abundancias en todas las etapas de estratificación fueron muy bajas, encontrando el mayor pico de abundancia en la estratificación bien establecida en el estrato del epilimnion (2.30×10^6 cél. mL^{-1}) y la más baja en el hipolimnion (1.30×10^6 cél. mL^{-1}) en la fase de la mezcla (1.58×10^6 cél. mL^{-1}). El patrón general de concordancia entre los diferentes años estriba en mayores abundancias del PPH en el epilimnion y el metalimnion, con un descenso hacia el hipolimnion. En el epilimnion donde se desarrolla el fitoplancton puede estar aportando materia orgánica disuelta (MOD), que es la fuente principal del bacterioplancton heterotrófico, viéndose además favorecido metabólicamente por las condiciones aeróbicas. Lo que responde por una parte que el metalimnion es una zona de variación de la densidad del agua que favorece a la acumulación de nutrientes y materia orgánica con un mejor desarrollo en las comunidades bacterianas. La materia orgánica tiende a acumularse en el fondo del sistema conforme avanza la fase de estratificación lo que conduce a una reducción del oxígeno disuelto por los procesos de oxidación disminuyendo consecutivamente PPH al bajar su actividad metabólica y por ende los NFH sus principales depredadores.

Las abundancias de los NFH en el lago Atexcac y el lago La Preciosa siguieron un patrón similar al registrar mayor abundancia de NFH sobre los estratos del epilimnion y metalimnion. En el lago Atexcac las abundancias de NFH 5.55 a 2.42×10^2 Org. L^{-1} entre el epilimnion y metalimnion en la estratificación temprana y la estratificación bien establecida

y para el hipolimnion, la abundancia observada fue menor. Mientras en la estratificación tardía se observó un descenso en las abundancias de los NFH en todas las zonas de la columna de agua 2.04×10^2 Org. L⁻¹, este descenso marcado puede ser consecuencia de la limitación por nutrientes, la abundancia y el pequeño tamaño celular como ha sido reportado para este tipo de lagos en comparación con sistemas de latitudes templadas (Hernández-Avilés *et al.* 2012). Por último, en el periodo de la mezcla se encontró una homogeneidad de su abundancia a lo largo de la columna de agua (Fig. 24). En el lago La Preciosa se puede observar una abundancia mayor de NFH que en comparación del lago Atexcac, pero, de igual manera se registraron las mayores abundancias situadas en el epilimnion y metalimnion con un descenso hacia el hipolimnion en todas las etapas de estratificación 9.94 a 5.65×10^2 Org. L⁻¹ y en la mezcla 5.04×10^2 Org. L⁻¹ (Fig. 30) Las mayores abundancias pueden explicarse por la facilidad con la que el lago recibe mayor proporción de materia orgánica alóctona (Vizuet, 2015) ya que el lago se encuentra con una pendiente pronunciada hacia el cuerpo de agua además de abundante vegetación alrededor del lago; su tamaño celular es mayor y su presión de depredación aumenta dentro del lago dándose un incremento en la transferencia de carbono en los niveles superiores y aporte de materia orgánica al sistema.

El tamaño en las células se estudia y se llega a explicar a partir de diferentes componentes con los que interactúa, anteriormente se creía que las células con menor tamaño permanecían inactivas y fue hasta que Wang *et al.* (2009) demostraron que las células bacterianas de menor tamaño también se considerarían activas por el contenido de ATP. Las poblaciones bacterianas con mayores tamaños celulares difícilmente son ingeridas por pequeños NFH, en tanto que células muy pequeñas se escapan y persisten en la columna de agua, lo que resulta en la presencia de tamaños extremos y complejas morfologías resistentes a la depredación (Jürgens y Güde, 1994). Se considera un dato muy importante el tamaño del PPH y de los NFH porque se observó una diferencia significativa en los volúmenes de biomasa obtenidos, en donde se registró en el lago Atexcac una biomasa para el PPH más concentrada entre el epilimnion y metalimnion (1264.71 a 1121.84 $\mu\text{g C L}^{-1}$) (Fig. 15), con una disminución mayor en el hipolimnion, al igual que la biomasa de los

NFH su distribución en biomasa se concentró en los mismos estratos (0.5763 a 0.2482 mg C L⁻¹) (Fig. 27). Por el contrario, en el lago La Preciosa la biomasa del PPH sus volúmenes observados fueron mayores en el epilimnion y metalimnion durante todo el periodo de muestreo 1339.86 a 1180.08 µg C L⁻¹ (Fig. 21), para los NFH las mayores biomásas se encontraron entre el epilimnion y metalimnion 0.7197 a 0.1469 mg C L⁻¹ (Fig. 27). Con estos resultados, se comprobaría que existe una diferencia celular entre ambos lagos en donde se observa que el lago de Atexcac presenta una componente microbiana de menor tamaño en comparación al lago La Preciosa, además de responder a la limitación de los nutrientes disponibles y su correlación analizada de fósforo y nitrógeno para el bacterioplancton, como lo reporta Hernández-Avilés *et al.* (2012) para el lago Alchichica en comparación con el lago Maggiore, donde concluyen que el control *bottom-up* es muy importante para poder determinar el tamaño celular tanto en las zonas tropicales como templadas, sin descartar el efecto del control *top-down*.

Anteriormente se había propuesto que las interacciones entre los protozoarios en los cuerpos acuáticos tenían menos importancia en los sistemas eutróficos que en los sistemas oligotróficos (Bird y Kalff 1984; Sanders *et al.*, 1989; Weisse 1991; Azam y Smith 1991). Al encontrar que el PPH en el lago La Preciosa la concentración de nutrientes y los procesos de oxidación de la materia son limitantes y responsables en la incorporación y distribución de carbono en los niveles superiores y que los NFH al observar correlaciones negativas con nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, estos pudieran tener elementos facultativos de mixotrofia es decir, pueden requerir nutrientes bajo ciertas condiciones a lo largo de las etapas hidrodinámicas o bien, su consumo de depredación sea con mayor afinidad a la comunidad fitoplanctónica o bacterias autotróficas. A la vez al observar sus bajas abundancias no se podría asegurar que participen en los principales procesos de depredación dentro del circuito microbiano. Cabe mencionar que ambos lagos cuentan con una productividad primaria muy baja, es así el caso del lago Atexcac que al ser un lago oligo-mesotrófico el PPH mostró que los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno son limitantes para estos organismos y esta misma correlación negativa se observa con los NFH lo que probablemente podría implicar que en este lago existe también una mixotrofia, es

decir, los NFH tendrían la facultad de realizar fotosíntesis con la finalidad de metabolizar los procesos en la transformación de la materia y que al encontrar una baja abundancia probablemente tampoco participarían directamente en los procesos de depredación de las bacterias.

La abundancia de NFH también puede estar regulada por la disponibilidad de una fuente de alimento como el bacterioplancton, carbono orgánico disuelto y nutrientes inorgánicos, que a su vez también es un efecto de la depredación principalmente de una diversidad de ciliados reportados por (Macek *et al.* 2000) en el lago Atexcac, lago La Preciosa y el lago Alchichica, por cladóceros y copépodos (Güde 1988, 1989; Stoecker y Capuzzo 1990) rotíferos, (Weisse 1991) y la depredación de peces en el lago La Preciosa como el charal *Poblana letholepis* Álvarez, 1950, es un atherinópsido endémico del lago La Preciosa y otros peces exóticos introducidos como la trucha Hernández-Rubio *et al.* (2016). Al realizar las correlaciones de Spearman en ambos lagos se observó que existe una correlación positiva entre la abundancia y en la mayoría de los casos la biomasa del PPH y los NFH lo que probablemente indica, que no hay una elevada depredación como lo registró Sanders *et al.* (1989) para el lago Oglethorpe donde encontró que la depredación de bacterias observada fue entre 19 y 51 % y se debió a organismos distintos a los nanoflagelados heterotróficos. Christoffersen *et al.* (1990) lo que sugirió que no había un acoplamiento perfecto entre el bacterioplancton y los nanoflagelados heterotróficos. En un estudio realizado en el lago Atexcac sobre el control descendente en el circuito microbiano Moreno (2018), encontró que en las incubaciones de NFH con el bacterioplancton ejerció mayor presión de depredación que las demás incubaciones con el zooplancton, lo que podría corresponder con los valores de correlación positivos en ambos lagos donde el NFH pueden depredar con mayor facilidad en las mayores abundancias del PPH al presentarse en el epilimnion y metalimnion. Además, el PPH y los NFH para ambos lagos participaron en la utilización del nitrógeno y del fósforo, al realizar la correlación de Spearman y observar una correlación negativa se infiere que son organismos limitados principalmente por el fósforo total y de los nitritos, con la única excepción que en el lago La Preciosa el nutriente correlacionado negativamente para el PPH fue el amonio, este nutriente puede ser un probable agente

estresor en su desarrollo, dado que con el pH alcalino tiende fácilmente a disociarse en amoníaco (Cuadro 3, 4, 5, 6). En estudios de sistemas con las características similares se propone al bacterioplancton como el principal participe en los procesos de mineralización y reincorporación del C, N y P (Jones *et al.*, 2001; Falcón *et al.*, 2002; Sorokin *et al.*, 2014). En lagos templado reportan que el limitante principal de la productividad primaria es el fósforo, en otros estudios para lagos tropicales se sugiere que el limitante es el nitrógeno; sin embargo, para sistemas lacustres de la meseta central, se ha descrito que existe una colimitación de ambos nutrientes (Hernández-Avilés *et al.*, 2001), infiriéndose que esto también pudiera afectar la abundancia y biomasa del PPH, y de manera indirecta a los NFH a ser estos sus principales depredadores.

Otro factor importante que se observó en ambos lagos fueron las correlaciones positivas que se observaron al asociar la temperatura y el oxígeno con las abundancias y biomásas del PPH y de los NFH, lo que se puede asociar con sus tasas metabólicas de respiración aerobia se incrementan con la temperatura. Con excepción en el lago Atexcac donde el oxígeno no se encontró una correlación para los NFH para su abundancia y biomasa (Cuadro 3, 4, 5, 6). La correlación positiva en el aumento de la temperatura sobre la comunidad del bacterioplancton lo describe White *et al.* (1991), en donde encuentra que la abundancia y la biomasa de las bacterias poseerían una alta coenzima Q₁₀, lo cual le permitiría tener respuesta a estas variaciones a lo largo de la columna de agua.

La salinidad que presenta el lago Atexcac (6 g L⁻¹) no influyó en las abundancias y biomásas del PPH ni tampoco en el lago La Preciosa al presentar una menor salinidad (1 g L⁻¹) ya que al realizar el análisis estadístico con la prueba de “t” se encontró que las densidades en ambos lagos no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sus medias. También se observó el mismo comportamiento con las biomásas del PPH, lo que corresponde a que no existe una variación espacial y temporal de este parámetro entre los dos lagos estudiados. Para los NFH al realizar el análisis estadístico con la prueba de “t” en las abundancias del lago Atexcac mostraron que los datos no seguían una distribución normal, lo más probable se pueda deber a una disminución notoria de estos organismos en toda la etapa de la estratificación tardía, en cambio, los NFH de lago La Preciosa se observó

una distribución normal. Al encontrar que existía diferencia significativa entre las medianas con la prueba de Wilcoxon se comprobó que existía diferencia espacial y temporal entre ambos lagos. De la misma forma se realizó con las biomasa de los NFH y con la prueba estadística se comprueba que existe diferencia entre las medianas de ambos lagos ($p < 0.05$) y por lo tanto, los NFH no se podría suponer que únicamente la salinidad del lago Atexcac influyera sobre las abundancias y biomasa en comparación con el lago La Preciosa, se infiere que existen más factores como la baja participación de depredación por parte de los NFH implicando que actúan como un organismo secundario en los procesos del circuito microbiano y por otra parte por su probable capacidad de ser mixotróficos.

CONCLUSIONES.

La abundancia y biomasa de PPH y de los NFH estuvo asociada con el comportamiento de monomixis cálida de los lagos, por lo cual se evidenció con la correlación encontrada con los gradientes térmicos de oxígeno disuelto durante el periodo de estratificación. Así, durante la mezcla se encontró una homogenización a lo largo de la columna de agua y una distribución diferencial en la estratificación, donde las mayores abundancias y biomasa se registraron en el epilimnion al ser óxico y el metalimnion donde se acumulan los nutrientes por la formación de la termoclina. Con una reducción de estos parámetros biológicos en el hipolimnion por su tendencia a la anoxia por la oxidación de la materia orgánica que se acumula durante la estratificación, que favorece la presencia de bacterias amonificantes aerobias y bacterias con respiración anaerobias como las desnitrificantes, las sulfatoreductoras y las metanogénicas.

Se rechazó la hipótesis de que el lago de menor salinidad La Preciosa subsalino (1 g L^{-1}) presentará una mayor abundancia y biomasa en el PPH en comparación con el lago Atexcac hiposalino (6 g L^{-1}) y esto se debe a que las abundancias y su distribución en ambos lagos no fueron significativamente diferentes espacial y temporalmente y al observar el Lago de La

Preciosa muestra una ligera carga de picoplancton heterotrófico y nanoflagelados, es a consecuencia de los procesos en las interacciones del circuito microbiano.

Mientras que para los NFH si hubo diferencias entre los lagos, donde se infiere que en el lago Atexcac los NFH tienen una participación secundaria en los procesos de depredación bacteriana como parte del circuito microbiano y que otros depredadores como el zooplancton y los ciliados puedan estar participando principalmente en la transferencia de carbono a través del consumo del picoplancton. Mientras para el lago La Preciosa los procesos de presión de depredación parecieran tener una mayor complejidad por la participación de otros depredadores superiores como peces, así como la disponibilidad de mayores concentraciones de nutrimentos que se aportan al sistema al ser un lago más expuesto a las actividades antropogénicas, donde los controles *top-down* y *bottom-up* desempeñan un papel determinante de su dinámica.

Las bajas abundancias de los NFH en ambos lagos determinó una baja participación en el circuito microbiano para la transferencia de carbono a los niveles tróficos superiores, además de la posibilidad de que los NFH tengan la facultad de aprovechar los nutrimentos de manera autotrófica, lo que implica que sean mixotróficos sin necesariamente ser un depredador directo del PPH, sobre todo por las condiciones de estratificación y anoxia hipolimnética en una parte importante del año.

REFERENCIAS

- Adamczewski, T., Chróst, R., Kalinowska, K., Skowrońska, A. (2010). Relationships between bacteria and heterotrophic nanoflagellates in lake water examined by different techniques controlling grazing pressure. *Aquat. Microb. Ecol.*, Vol. 60, 203-213.
- Alcocer J, Escobar E (1990) The drying up of the Mexican plateau axalapazcos. *Salinet* 4:34-36.
- 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, México. *Verh Internat Verein Limnol*, 27, 3166-3169.
- APHA/AWWA/WEF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Standard Methods*, 541.
- 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. UNAM. México.
- 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.
- Arellano-Posadas JA y González-Flores E (2011). *Dinámica espacio-temporal del picoplancton procarionte y su relación con la variabilidad limnológica del lago volcánico Atexcac, Puebla*. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. CDMX

- Arellano-Posadas, J. A. (2017). *Variación espacio-temporal del picoplancton procarionte y su relación con la dinámica limnológica en el lago cráter atalashalino Atexcac, Puebla*. Tesis de Maestría. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. CDMX
- Armienta, M. A., Vilaclara, G., De la Cruz-Reyna, S., Ramos, S., Cenicerros, N., Cruz, O., ... Arcega-Cabrera, F. (2008). Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178(2), 249-258.
- Arredondo-Figueroa, J. L. (2002). Los axalapascos de la Cuenca Oriental, Puebla. pp. 81-107. *In*: G. De la Lanza E. y J. L. García C. (compiladores). *Lagos y presas de México*. AGT. México, D. F.
- Arredondo-Figueroa, J. L., Borrego L., Castillo R. & Valladolid M. (1983) Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca Oriental de Puebla. *Biótica* 8(1): 37-47.
- Azam, F., & D. C. Smith. (1991). Bacterial influence on the variability in the oceans' biogeochemical state: A mechanistic view, p. 213–236. *In* S. Demers [ed.], *Particle análisis in oceanography*. NATO-ISI Series G 27.
- Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, J.S. Gray, L. Meyer-Reil, F. Thingstad. (1983): The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 10: 257-263.
- Benitez-Hernández, M. & Contreras-Tapia, F. (2016). *Composición y dinámica del plancton procarionte en el lago volcánico, monomítico cálido subsalino "La Preciosa", Puebla*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Bird, D. F., & Kalff, J. (1984). Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41: 1015–1023.
- Björkman, K., Thomson-Bulldis, A. L. & Karl D.M. (2000). Phosphorus dynamics in the North pacific subtropical gyre. *Aquat. Microb. Ecol.*, 22: 185-198.
- Børsheim K.Y. and Bratbak G. (1987) Cell volume to carbón conversion factors for bacterivorous *Monas* sp. Enriched from seawater. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 36, 171–175.
- Camacho, A., Wurtsbaught, W.A., Miracle, M.R., Armengol, X., y Vicente, E. (2003). Nitrogen limitation of phytoplankton in a spanish karst lake with a deep chlorophyll maximum: a nutrient enrichment bioassay approach. *J. Plankton Res.*, 25, 397-404.
- Can, C.A. (2011). Origen y calidad del agua subterránea en la cuenca del Oriental, Puebla. *Terra Latinoamericana.*, 29: 189-200.
- Cárcamo, J. R. (2017). *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 de licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. CDMX

- Christoffersen, K., B. Riemann, L. R. Hansen, A. Klysner, and H. B. Sørensen, (1990). Qualitative importance of the microbial loop and plankton community structure in a eutrophic lake during a bloom of cyanobacteria. *Microb. Ecol.*, 20: 253-272.
- Chrzanowsky, T. H. & J. P. Grover. (2001). Effects of mineral nutrients on the growth of bacterio- and phytoplankton in two southern reservoirs. *Limnol. Oceanogr.*, 40 (6): 1319-1330.
- Cook, P. L. M and Holland D. P. (2012). Long-term nutrient loads and chlorophyll dynamics in a large temperate Australian lagoon system affected by recurring blooms of cyanobacteria. *Biogeochemistry*, 107: 261-274.
- Cottrell, M. T. and Kirchman, D. L. (2000) Community composition of marine bacterioplankton determined by 16S rRNA gene clone libraries and fluorescence in situ hybridization. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66, 5116–5122.
- Cruickshank, VLC (1992) Relación entre las aguas superficiales y subterráneas en una Cuenca. *Ing. Hidraul. Mex.*, 7:53-63.
- Danielidis, D. B., Spartinou, M., & Economou-Amilli, A. (1996). Limnological survey of Lake Amvrakia, western Greece. *Hydrobiologia*, 318(3), 207-218.
- Dávalos, L., Lynd O.T. & Doyle, R. D. (1989). Evaluation of phytoplankton- limiting factors in lake Chapala. México: turbidity and the spatial and temporal variation in algal assay response. *Lake Reserv Manag.*, 5(2): 99-104.
- Ducklow HW (2000) "Bacterial production and biomass in the oceans" In: *Microbial Ecology of the Oceans*. Kirchman DL (ed.) Wiley-Liss, 1 st edition, pp. 85-120.
- Falcón L., Escobar-Briones E., & Romero D., (2002). Nitrogen fixation patterns displayed by cyanobacterial consortia in Alchichica crater-lake, Mexico. *Hydrobiologia* 467:71-78.
- Fallon, R. D & Brock, T. D. (1979). Decomposition of bluegreen algal (Cyanobacterial) blooms in lake Mendota, Wisconsin. *Appl. Environ. Microbiol.* 37: 820-830.
- Fenchel t. (1988): Marine plankton food chains. *Ann Rev Ecol Syst.*; 19:19-38
- Fenchel, T. (1986): Protozoan filter feeding. *Prog. Protistol.* 1: 65-113.
- Fuentes, F., y Massol-Deyá, A. (2002). *Manual de laboratorios: Ecología de microorganismos*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- García ME (2004) modificaciones al sistema de clasificación climáticas de Köppen para adaptarlo a las condiciones de México. Quinta edición Ed. García ME., México.
- Gasca D. A. (1982). Génesis de los lagos cráter de la Cuenca de Oriental. *Colec. Cient. Inst. Nal. Antropol. Hist.* 98 México. 45 pp.

- Gasol, J.M. (1994) A framework for the assessment of top-down vs bottom-up control of heterotrophic nanoflagellate abundance. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 113:291-300.
- Gasol, J. M., A. M. Simons & J. Kalff, (1995). Patterns in the top-down versus bottom-up regulation of heterotrophic nanoflagellates in temperate lakes. *J. Plankton Res.*, 17: 1879-1903.
- Gibbs, R. J. (1970). “*Mechanisms controlling world wáter chemistry*”. *Science*, no. 170, pp. 1088-1090.
- González-Flores E. (2017). *Composición y distribución del picoplancton procarionte y su relación con la dinámica Limnológica del lago cráter La Preciosa, cuenca de oriental, México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Güde, H. (1988). Direct and indirect influences of crustacean zooplankton on bacterioplankton of Lake Constance. *Hydrobiologia* 159: 63-73.
- Güde, H. (1989) The role of grazing on bacteria in plankton succession, p. 337-364. *In* U. Sommer [ed.], *Plankton ecology* Springer.
- Halemejko, G. Z. & Chrost, R. J. (1984). The role of phosphatases in phosphorus mineralization during decomposition of lake phytoplankton blooms. *Arch. Hydrobiol.*, 101: 489-502
- Haselkorn, R. (1986). Organization of the genes for nitrogen fixation in photosynthetic bacteria and cyanobacteria. *Ann. Rev. Microbiol.* 40: 525-547.
- Henry, R. & Tundisi, J. G. (1982). Evidence of limitation by molybdenum and nitrogen on the growth of the phytoplankton community of the Lobo Reservoir (Sao Paulo, Brazil). – *Rev. Hydrobiol. Trop.* 15: 201-208.
- Hernández-Avilés, J. S., Bernal-Brooks, F., Velarde, G., Ortíz, D., Lind, O., & Dávalos-Lind, L. (2001). The algal growth potential and algae growth-limiting nutrients for 30 of Mexico’s lakes and reservoirs. *Verh Internat Verein Limnol.*, 27, 3583-3588.
- Hernández-Avilés, J. S., R. Bertoni, M. Macek & C. Callieri. (2012). Why bacteria are smaller in the epilimnion than in the hypolimnion? A hypothesis comparing temperate and tropical lakes. *J. Limnol.*, 71 (1): 104-111.
- Hernández-Morales R., Ortega M. M., Sánchez H. J., Alvarado V. R. & R. M. Aguilera (2011). Distribución estacional del fitoplancton en un lago cálido monomítico en Michoacán, México. *Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo*; 13 (2): 21 – 28.
- Hernández-Rubio M., Frausto-Illescas T., Figueroa-Lucero G. (2016). Ontogenia temprana de *Poblana Letholepis* (Actinopterygii: Atherinopsidae). Instituto de biología UNAM, *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87 (2016) 1118–1123

- Hobbie Je. (1988): A comparison of the ecology of planktonic bacteria in fresh and salt water. *Limnol Oceanogr.*, (33):750-764.
- Hobbie, J. E., R. J. Daley & S. Jasper, (1977). Use of nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* 33: 1225–1228.
- Holland, D. P., Van Erp, I., Berdall, J. & Cook P. L. (2012). Environmental controls on the nitrogen-fixing cyanobacterium *Nodularia spumigena* in a temperate lagoon system in SE Australia. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 461: 47-57.
- Jansson M, Bergström A, Blomqvist P, Drakare S. (2000): Allochthonous organic carbon and phytoplankton/bacterioplankton production relationships in lakes. *Ecology*; 81(11):3250-3255.
- Johannes, R E. (1964). Phosphorus excretion as related to body size in marine animals: the significance of nanozooplankton in nutrient regeneration. *Science*, 146: 923-4.
- Jones R. I., Grey J., Quarmby C., & Sleep D., (2001). Sources and fluxes of inorganic carbon in a deep, oligotrophic lake (Loch Ness, Scotland). *Global Biogeochemical Cycles* 15: 863-870.
- Jürgens, K. & H. Güde. (1994). The potential importance of grazing-resistant bacteria in planktonic systems. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 112 (1): 169-188.
- Jürgens, K., J. Pernthaler, S. Schalla & R. Amann. (1999). Morphological and compositional changes in a planktonic bacterial community in response to enhanced protozoan grazing. *Appl. Environ. Microbiol.*, 65 (3): 1241-1250.
- Kerner M, Hohenberg H, Ertl S, Reckermann M, Spitz A. (2003): Selforganization of dissolved organic matter to micelle-like microparticles in river water. *Nature*; 422:150-154.
- Lagunas, S. & Martínez, D. (2015). Estructura de la comunidad del plancton procarionte en el lago volcánico hipo-salino y monomítico cálido Atexcac, Puebla. Tesis profesional de Licenciatura Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM P.p. 22-35.
- Lampert, W., y Sommer, U. (2007). *Limnoecology* (Segunda ed.). Estados Unidos: Oxford University Press Inc.
- Legendre, L., y Rassoulzadegan, F. (1995). Plankton and nutrient dynamics in marine Waters. *OPHELIA*, 41, 153-172.
- Lewis WM (1983) A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 1779-1787.

- Lewis, W.M. (1996). Tropical lakes: how latitude makes a difference. En F. Schiemer & K.T. Boland (Eds.), *Perspectives in Tropical Limnology* (pp. 43-64). SPB Academic Publishing by Amsterdam.
- Loferer-Krößbacher M., Klima J. & Psenner R. (1998) Determination of bacterial cell dry mass by transmission electron microscopy and densitometric image analysis. *Appl Environ Microbiol.*, 64:688-694.
- López, C. (2018). *Composición y abundancia del fitoplancton antes, durante y después del evento de emblanquecimiento "whiting event" en el Lago Atexcac, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Macek M., Lugo A., Vilaclara G. (2000). Pelagic ciliates assemblage of high altitude lake Atexcac (Puebla, México) In: *Aquatic ecosystems of Mexico: Status and scope*, Munawar M, Lawrence SG, Munawar IF, Malley DF (Eds). *Ecovision World Monograph Series*. Backhuys Publishers b. v., Netherlands, pp. 45-59.
- Macek M, Vilaclara G, Lugo A (1994) Changes in protozoan assemblage structure and activity in a stratified tropical lake. *Marine Microbial Food Webs* 8: 235-249.
- Marcos H., & Reyes M., (2012). *Variabilidad anual del picoplankton procarionte en el lago monomítico cálido La Preciosa, Puebla*. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Margalef, R., (1974). *Ecología*. Omega. Barcelona.
- Martínez, C. (2010). *Efecto de cladóceros y copépodos sobre el fitoplancton del lago La Preciosa, Puebla*. Tesis de maestría. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. UNAM.
- Montagnes, D.J.S., A.B. Barbosa, J. Boenigk, K. Davidson, K. Jürgens, M. Macek, J.D. Parry, E.C. Roberts y K. Šimek. (2008): Selective feeding behaviour of key free-living protists: avenues for continued study. *Aquat. Microb. Ecol.* 53: 83–98.
- Morán-Ventura, M. (2016). *Estructura de la comunidad fitoplanctónica durante las etapas hidrodinámicas del lago La Preciosa, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Moreno, O. (2018). *Evaluación experimental del control descendente "Top-Down" en el circuito microbiano del lago volcánico Atexcac*. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- NOAA (2018). National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for 2018, published online January 2019, retrieved on August 5, 2020 from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201813/supplemental/page-5>.

- Olivia M. G., Lugo A., Alcocer J., Peralta L. & Ma. Del R. Sánchez (2001). Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiología*; 466 (1-3): 299 – 306.
- Pace, M. L. & J. J. Cole. (1994). Comparative and experimental approaches to top-down and bottom-up regulation of bacteria. *Microb. Ecol.*, 28 (2): 181-193.
- Payne A. I. (1986). *The ecology of tropical lakes and rivers*. Willey Chichester. 301p.
- Pernthaler, J., T. Posch, K. Šimek, J. Vrba, R. Amann & R. Psenner. (1997). Contrasting bacterial strategies to coexist with a flagellate predator in an experimental microbial assemblage. *Appl. Environ. Microbiol.*, 63 (2): 596-601.
- Pomeroy, L., Williams, P., Azam, F., & Hobbie, J. (2007). The microbial loop. *Oceanography*, 2, 28-33.
- Pomeroy, L.R. (1974): The Ocean's food web: A changing paradigm. *Bioscience* 24: 499-504.
- Porter, K., Feig, Y. (1980). The use of DAPI for identifying and counting aquatic microfloral. *Limnol. Oceanogr.*, 25(5), 943-948.
- Rojas, C. (2017). *Evaluación anual de la productividad primaria y del contenido de clorofila "a" en el lago cráter, Atexcac, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Roldan, G., y Ramirez, J. (2008). *Fundamentos de limnología tropical* (Segunda ed.). Antioquia: Academia colombiana de Ciencias Exactas.
- Rosas, J. de J. (2018). *Evaluación del potencial productivo de los máximos profundos de clorofila a través de la productividad primaria en el lago volcánico tropical Atexcac, Puebla*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Rzedowski J (1981). *La vegetación de México*. Limusa, México DF. 342 p.
- Salgado-Ugarte, IH (1992). *El análisis exploratorio de datos biológicos, fundamentos y aplicaciones*. ENEP Zaragoza, UNAM. Ediciones Marc. México 243 p.
- Sanders, R., porter, K., Bennet, S., & DeBiase, A. (1989). Seasonal patterns of bacterivory by flagellates, ciliates, rotifers and cladocerans in a freshwater plankton community. *Limnol. Oceanogr.*, 34, 673-687.
- Sanders, R.W. y S.A. Wickham. (1993): Planktonic protozoa and metazoa: predation, food quality and population control. *Mar. Microb. Food Webs*. 7:197-223.
- Sanders, R.W., D.A. Caron y U.G. Berninger. (1992): Relationships between bacteria and heterotrophic nanoplankton in marine and heterotrophic nanoplankton in marine and freshwaters: an interecosystem comparison. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.* 86: 1-14.

- Sherr, B. F., E. B. Sherr & J. McDaniel. (1992). Effect of protistan grazing on the frequency of dividing cells in bacterioplankton assemblages. *Appl. Environ. Microbiol.* 58 (8): 2381-2385.
- Sherr, E.B. y B.F. Sherr. (1987): High rates of consumption of bacteria by pelagic ciliates. *Nature* 325: 710-711.
- Sherr, E.B. y B.F. Sherr. (1988): Role of microbes in pelagic foods webs: a revised concept. *Limnol. Oceanogr.* 33: 1225-1227.
- Sieburth Mc. J., Smetacek V. & Lenz J. (1978) Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.* 23:1256-1263.
- Sigee, D. (2005): *Freshwater Microbiology: Biodiversity and Dynamic Interactions of Microorganisms in the Aquatic Environment.* John Wiley & Sons Ltd. Chichester, Inglaterra 544 pp.
- Šimek, K. & T. H. Chrzanowski. (1992). Direct and indirect evidence of sizeselective grazing on pelagic bacteria by freshwater nanoflagellates. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58 (11): 3715-3720.
- Šimek, K., Hartman, P., Nedoma, J., Vrba, J., Springmann, D., et al. (1997). Community structure, picoplankton grazing and zooplankton control of heterotrophic nanoflagellates in a eutrophic reservoir during the summer phytoplankton maximum. *Aquat. Microb. Ecol.* 12, 49-63.
- Šimek, K., J. Bobková, M. Macek, J. Nedoma. (1995): Ciliate grazing on picoplankton in a eutrophic reservoir during the summer phytoplankton maximum: A study at the species and community level. *Limnol. Oceanogr.* 40(6) 1077-1090.
- Simon, M., B. C. Cho & F. Azam. (1992). Significance of bacterial biomass in lakes and the ocean: comparison to phytoplankton biomass and biogeochemical implications. *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 86: 103-110.
- Sorokin D. Y., Berben T. Melton E. D., Overmars L., Vavourakis C.D., & Muyzer G., (2014). Microbial diversity and biogeochemical cycling in soda lakes. *Extremophiles* 18:791-809.
- Sorokin, Y. I. (1981): Microheterotrophic organisms in marine ecosystems. En: Longhurst, A.R. (ed.) *Analysis of marine ecosystems.* Academic Press. Londres, Inglaterra. 293-342.
- Sorokin, Y.I. (1971): On the role of bacteria in the productivity of tropical oceanic waters. *Int. Rev. Ges. Hydrobio.* 56: 1-48.
- Stabell, T. (1996): Ciliates bacterivory in epilimnetic waters. *Aquat. Microb. Ecol.* 10: 265-272.

- Steele, J. H. (1974). *The Structure of Marine Ecosystems*. Harvard University of Cambridge, M.A.
- Stockner J, Callieri C, Cronberg G (2000). Picoplankton and other non-bloom-forming Cyanobacteria in lakes. En: Whitton, BA, Potts, M (Eds). *The ecology of cyanobacteria*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 195-231.
- Stoecker, D. K., & J. McD. Capuzzo, (1990). Predation on protozoa: Its importance to zooplankton. *J. Plankton Res.* 12: 891-908.
- Straškrabova V., Callieri C., Cruz-Pizarro L., Hartman P., Macek M., Nedoma J. & Simek K. (1999) Investigations on microbial food webs in mountain lakes – aims and methods. In: Straškrabova V., Callieri C. and Fott J. (eds) *Pelagic food web in mountain lakes*. Mountain Lakes Research Program. *J. Limnol.* 58, 77-87
- Strom, S. (2000). Bacterivory: interactions between bacteria and their grazers. In: Kirchman, D.L. (Ed.). *Microbial ecology of the oceans*. Wiley-Liss. New York, pp. 351-386.
- Sze, P. (1998). *A Biology of the Algae* (Tercera ed.). McGraw-Hill.
- Tranvik Lj. (1992): Allochthonous dissolved organic matter as an energy source for pelagic bacteria and the concept of the microbial loop. *Hydrobiologia*; 229:107-114.
- Ventela A, Wiackowski K, Moilanen M, Saarikari V, Vuorio K, Sarvala J. (2002): The effect of small zooplankton on the microbial loop and edible algae during a cyanobacterial bloom. *Fresh. Biol.*, (47):1807-1819.
- Vilaclara G, Chavez M, Lugo A, Gonzalez H, Gaytán M (1993) Comparative description basic chemistry of crater-lakes in Puebla State, Mexico. *Ver Int Limnol.*, 25:435-440.
- Vinner-Mozzini Y, Zohary T, Gasith A (2003). Dinoflagellate Bloom development and collapse in lake Kinneret: A sediment trap study. *J Plankton Res.*, 25:591-602.
- Vizuet, L. A. (2015). *Evaluación de la composición del procarioplancton durante el fenómeno de emblanquecimiento “whiting event” en el lago volcánico Atexcac, Estado de Puebla*. México: Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Wang Y, Hammes F, Boon N, Chami M, and Egli T. (2009). Isolation and characterization of low nucleic acid (LNA)-content bacteria. *ISME J.*, 3:889-902.
- Wehr J. D. and R.G. Sheath (2003). *Freshwater algae of North America: Ecology and Classification*. Academic Press. USA.
- Weisse, T. (1993) Dynamics of autotrophic picoplankton in marine and freshwater ecosystems. In: Jones JG (Ed) *Advances in microbial ecology*, plenum press, New York. 327-370.

- Weisse, T. (1991). The microbial food web and its sensitivity to eutrophication and contaminant enrichment: A cross-system overview. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* **76**: 327–337.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3a ed.). San Diego: Academic Press.
- White, P. A., Kalff, J., Rasmussen, J. B. y Gasol, J.M. (1991). The effects of temperatura and algal biomass on bacterial production oan specific growth rate in freshwater and marine hábitats. *Microb. Ecol.*, 21:99-118.
- Work K, Havens K, Sharfstein B, East T. (2005): How important is bacterial carbon to planktonic grazers in a turbid, subtropical lake?. *J Plankton Res.*, 27(4):357-372.
- Wu, J.F., Sunda, W., Boyle, E.A. & Karl D.M. (2000). Phosphate depletion in the western North Atlantic Ocean. *Science*, 289: 759-762.
- Yamasaki, S., Uneshida, H., Shimada, T., M. y Seok-Kyong. (2002). *Factors controlling Hypolimnetic ammonia accumulation in a lake*. *Limnol.* 3: 43-46.
- Zaret, T. M., Devol, A.H. & Dos Santos, A. (1981). Nutrient addition experiments in lake Jacaretinga, Central Amazon Basin. Brazil. *Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verh.* 21: 721-724.
- Zhu T, Dittrich M (2016) Carbonate Precipitation through Microbial Activites in Natural enviroment, and Their Potential in Biotechnology: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 4: 1-21.