



POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



**VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DEL FLUJO DE MATERIA TOTAL
PARTICULADA EN UN LAGO MONOMÍCTICO CÁLIDO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTORADO EN CIENCIAS
(LIMNOLOGÍA)

P R E S E N T A :

M. EN C. LUIS ALBERTO OSEGUERA PÉREZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. JAVIER ALCO CER DURAND

JURADO

DR. JAVIER CARMONA JIMÉNEZ
DRA. ELVA G. ESCOBAR BRIONES
DR. OSCAR ESCOLER FUENTES
DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ

MÉXICO D.F.

SEPTIEMBRE 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**“Para formularse una pregunta,
debe conocerse ya la mayor
parte de la respuesta”**

(Haga una pregunta estúpida,
Robert Sheckley)

**La vida es como un juego de ajedrez,
Todos le quieren hacer jaque al rey,
Pero es difícil, difícil la primera vez.
Ya estando arriba se ve muy fácil,
Pero la neta no cualquiera la hace,
Porque es difícil, difícil poderla hacer.
Si quieres llegar a la mesa puesta,
Nadie te la va a poner,
Lo que no hagas por ti mismo,
nunca nadie lo va hacer.
El chiste no es llegar hasta arriba,
Si no quedarse ahí toda la vida,
Pero es difícil, difícil poder llegar.**

(Difícil, A.L.)

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento al Dr. Javier Alcocer, por todo el tiempo que ha dedicado a mi formación como Biólogo, como M. en C. y ahora como Doctor. Gracias, por seguir creyendo en mí y por tenerme la confianza para tomar decisiones en algunas cuestiones de laboratorio y de campo, que espero hayan sido acertadas. Sé que aún no estoy completamente listo, pero gracias a ti estoy más cerca de ser lo que he soñado durante todo este tiempo, un “Investigador”.

A la Dra. Elva Escobar por enriquecer el presente trabajo con sus acertados comentarios, pero sobre todo por el tiempo que me brindo a lo largo de mi formación académica.

A los miembros del jurado, Dra. Gloria Vilaclara, Dr. Javier Carmona y Dr. Oscar Escolero, por sus atinados comentarios y sugerencias que contribuyeron a enriquecer este trabajo de tesis.

Al Dr. Alfonso Lugo Vázquez por el constante intercambio de ideas que me han enriquecido durante toda mi formación académica, pero sobre todo por su gran amistad.

Al CONACyT por el apoyo financiero otorgado a través de la beca para la realización de mis estudios de posgrado en el Programa de Ciencias del Mar y Limnología.

Al Programa de Becas Tesis para Posgrado, COMECyT (2009) por la beca que me otorgó para la culminación de este trabajo.

A los proyectos “Estudios Ecológicos a largo plazo en lagos Mexicanos: Lago Alchichica, Puebla” (PAPIIT IN221009) y “Dinámica Ecológica a largo plazo Alchichica, Puebla” (CONACyT 103332), por el financiamiento para la realización de este proyecto de investigación.

A la M. en C. Laura Peralta (FES Iztacala, UNAM), por su apoyo en el campo y laboratorio y por su incondicional amistad.

Al M. en C. Armando Rodríguez Rocha (FES Iztacala) y la M. en C. Brenda Hernández Hernández (FES Iztacala) por el apoyo logístico en campo y laboratorio.

Al personal del Posgrado en CMYL por todo el apoyo que me brindaron durante estos años: Gaby, Diana, Chantal y Lupita.

A todos los integrantes del Proyecto de Investigación en Limnología Tropical (PILT), quienes siempre me apoyaron a lo largo de este trabajo, en especial a la Dra. Ma. del Rosario Sánchez. Asimismo a todos los estudiantes con los que he convivido, por los gratos momentos en el laboratorio y todas las aventuras vividas en campo.

DEDICATORIA

A mi Madre, Nora Martha Pérez Cortés, por todo el amor que me ha brindado a lo largo de mi vida, y por el cual he podido lograr mi sueño. Te quiero mucho Margarita!!!

A mi Padre, Luis Oseguera Barragán, que aunque ya no está presente sé que de donde está siempre me ha apoyado. Gracias Papá!!!

A mi Hermana, Mayra Selene Oseguera Pérez, quien me ha enseñado que a pesar de que la vida no es fácil, luchando siempre se puede salir adelante. Con admiración y cariño para ti, Enana!!!

A mi Sobrina, Denis Berenice Calderón Oseguera, por siempre demostrarme su cariño y hacerme más divertida la vida. Espero que este logro te sirva de aliciente para que logres tu sueño, sin importar cual sea. Échale muchas ganas Moustro!!!

A mis familiares (Sra. Chelo, Tía Paty, Ramiro, Vanano, China) y amigos (Tere, Alejandro, Javier, Paty y Diana) por siempre estar cuando los necesito.

A mi Esposa, Cristina González Ruiz, por su gran amor y enorme confianza, que me han inspirado para poder llegar hasta aquí. Te Amo Preciosa!!!

En muchos sueños soñé, en muchos cuerpos viví,
mil veces me enamoré, otras mil veces morí,
de pronto escucho tu voz, tu voz que se hace canción
y puedo ver que eres tú lo que buscaba mi corazón
(Siempre te busque, Monocordio)



TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos..... ii

Dedicatoria..... iii

Tabla de contenido iv

Índice de Figuras..... vi

Índice de Tablas..... viii

RESUMEN..... - 1 -

ABSTRACT - 3 -

1. INTRODUCCIÓN..... - 5 -

2. ANTECEDENTES..... - 11 -

3. HIPÓTESIS..... - 14 -

4. OBJETIVO GENERAL..... - 16 -

 4.1 Objetivos particulares - 17 -

5. ÁREA DE ESTUDIO..... - 18 -

6. MÉTODOS..... - 22 -

 6.1 Trabajo de campo - 22 -

 6.1.2. Columna de Agua - 22 -

 6.1.2. Aire - 25 -

Flujo de Materia Total Particulada en un Lago Monomóctico Cálido

6.2. Trabajo de Laboratorio.....	- 26 -
6.2.1. Columna de Agua.....	- 26 -
6.2.2. Aire.....	- 31 -
6.2.3. Tratamiento de datos.....	- 34 -
7. RESULTADOS.....	- 35 -
7.1. Columna de agua.....	- 35 -
7.1.1 Flujos de Materia Total Particulada (MTP).....	- 35 -
7.1.2. Flujos de Carbono Total Particulado (CTP).....	- 39 -
7.1.3. Flujos de Carbono Orgánico (COP) e Inorgánico Particulado (CIP).....	- 40 -
7.1.4. Flujos de Clorofila “a” (Clor-a).....	- 44 -
7.1.5. Correlaciones.....	- 45 -
7.1.6. Tipo de Partículas.....	- 47 -
7.2. TRAMPAS AÉREAS.....	- 53 -
7.2.1. Flujo de Materia Total Particulada Aérea (MTPA).....	- 53 -
7.2.3. Flujos de Carbono Total Aéreo (CTPA) y sus fracciones (COPA y CIPA).....	- 54 -
7.2.4. Tipo de Partículas.....	- 57 -
8. DISCUSIÓN.....	- 58 -
9. CONCLUSIONES.....	- 75 -
10. LITERATURA CITADA.....	- 78 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista área del lago de Alchichica, México.....	21
Figura 2. Arriba. Ubicación del anclaje y la posición de las trampas de sedimento en el lago Alchichica, México. Abajo. Posición de las trampas durante el periodo de estudio. ● superficie, ▼media y ■fondo. La barra negra indica el periodo de circulación y la línea el límite inferior de la zona de mezcla.....	23
Figura 3. Variación temporal y espacial de los flujos de MTP en el lago Alchichica. Sup= superficie, Med = media y Fon = fondo.....	36
Figura 4. Materia total particulada (MTP) exportada mensualmente al fondo del lago Alchichica. DCM = Máximo Profundo de Clorofila, F. Ditomeas = Florecimiento de diatomeas y N. spumigena = Florecimiento de <i>N. cf spumigena</i> . La barra negra indica el periodo de circulación.....	37
Figura 5. Variación temporal y espacial de los porcentajes de los flujos de MOP (Oscuro) y MIP (Claro) en el lago Alchichica.....	38
Figura 6. Variación temporal y espacial de los flujos de CTP (arriba) y COP (abajo) en lago Alchichica. Sup= superior, Med = media agua y Fon = fondo.....	41
Figura 7. Variación temporal y espacial de los porcentajes de los flujos de COP (Oscuro) y CIP (Claro) en lago Alchichica.....	42
Figura 8. Carbono orgánico particulado (COP) exportada mensualmente al fondo del lago Alchichica. DCM = Máximo Profundo de Clorofila, F. Ditomeas = Florecimiento de diatomeas y N. spumigena = Florecimiento de <i>N. cf. spumigena</i> . La barra negra indica el periodo de circulación.....	43
Figura 9. Variación temporal y espacial de los flujos de clorofila a en el lago Alchichica. Sup= superficie, Med = media y Fon = fondo. La barra negra indica el periodo de circulación.....	44
Figura 10. Correlaciones de los flujos de materia total particulada con los flujos de carbono total particulado (a), carbono orgánico particulado (b) y clorofila a (c). ● superficie, ▼media y ■fondo.....	46
Figura 11. Correlaciones de los flujos de carbono total particulado con los flujos de carbono orgánico particulado (a) y carbono inorgánico particulado (b). ● superficie, ▼media y ■fondo.....	47
Figura 12. Correlaciones de los flujos de carbono orgánico particulad con los flujos de clorofila a con tres niveles (a), en superficie (b), en media agua (c) y fondo (d). ● superficie, ▼media y ■fondo.....	48

Flujo de Materia Total Particulada en un Lago Monomíctico Cálido

Figura 13. Composición del material particulado capturado en las trampas de superficie (Sup), media agua (Med) y fondo (fon) expresado en porcentaje relativo. MONI = materia orgánica no identificada.....	49
Figura 14. Variación temporal de los flujos de materia total particulada aérea en el lago Alchichica.....	53
Figura 15. Materia total particulada aérea que se deposita mensualmente en la orilla del lago Alchichica. La barra negra indica la época fría y seca.....	54
Figura 16. Variación temporal y espacial de los flujos de carbono total particulado aéreo (arriba) y de carbono orgánico particulado aéreo (abajo) en lago Alchichica.....	55
Figura 17. Carbono orgánico particulado aéreo que se deposita mensualmente en la orilla del lago Alchichica. La barra negra indica la época fría y seca.....	56
Figura 18. Variación temporal de los porcentajes de los flujos de carbono orgánico particulado aéreo (Oscuro) y carbono inorgánico particulado (Claro) en lago Alchichica.....	57
Figura 19. Formación de agregados en las trampas media agua (derecha) y fondo (izquierda) posterior al florecimiento de diatomeas en lago Alchichica.....	65
Figura 20. Resumen esquemático de la variación temporal de la MTP y COP en el lago Alchichica. El número y grosor de las flechas indica la intensidad y dirección de la exportación.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor mínimo (Mín.), máximo (Máx.), promedio anual de los flujos de materia total particulada (MTP), carbono total particuladao (CTP) y carbono orgánico particulado (COP) en el lago Alchichica. Promedios en el primer renglón y desviación estándar en el segundo.....	36
Tabla 2. Composición química promedio de la materia particulada capturada en las trampas para la columna de agua y para el aire. En el lago Alchichica. Los valores están dados en porcentaje atómico determinado por la microsonda del MEB.....	52
Tabla 3. Rango de variación y origen de los flujos de MTP en diferentes lagos.....	59
Tabla 4. Rango de variación y origen de los flujos de COP en diferentes lagos.....	61
Tabla 5. Rango de variación y origen de los flujos de MTPA en diferentes regiones. * Influenciado por tormentas de arena del Sahara.....	71

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la dinámica temporal y espacial de los flujos de la materia total particulada (MTP) y del carbono orgánico particulado (COP) procedentes de fuentes tanto autóctonas como alóctonas en Alchichica, un lago monomíctico cálido tropical. Para medir los flujos se colocaron tres estaciones con anclajes de trampas de sedimento en la parte central y más profunda del lago, así como una estación a la orilla del mismo con trampas aéreas. El material colectado en las trampas fue recuperando mensualmente durante un año (junio 2006-junio 2007). El intervalo de flujos de MTP (398 ± 90 a $3,284 \pm 109 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y COP (74 ± 5 a $451 \pm 7 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) encontrados en Alchichica fueron mayores a los reportados para otros lagos oligotróficos e incluso de mayor nivel trófico. Los principales flujos de MTP y COP se presentaron en las trampas de fondo durante el periodo de circulación (floreCIMIENTO de diatomeas, constituidos principalmente por *Cyclotella alchichicana*) y en las trampas de superficie durante la estratificación temprana (floreCIMIENTO de la cianobacteria *Nodularia cf. spumigena*); adicionalmente se observó un incremento en ambos flujos asociado al desarrollo del máximo profundo de clorofila en el metalimnion. La fracción inorgánica fue el constituyente principal de la MTP; sin embargo, esta materia inorgánica es de origen biogénico, con inclusión de frústulos de diatomeas, y no litogénico (p.ej., arcillas, vidrio volcánico)

El intervalo de los flujos de MTP en las trampas aéreas (MTPA = 111 ± 33 - $1211 \pm 224 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) fueron similares a los observados en otras zonas áridas y semiáridas, con influencia de las fuentes locales de polvo similares a las de Alchichica. Los flujos más importantes de MTPA se presentaron en la época fría-seca, asociados principalmente a la dirección de donde proceden los vientos dominantes durante este periodo (cruzan zonas con fuentes de polvo). El intervalo de los flujos del COP aéreo (COPA = 7 ± 2 - $40 \pm 2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) fue reducido (3 %) en comparación con la MTPA. El COP aéreo no presentó un patrón temporal bien definido. El material capturado en las trampas aéreas estuvo compuesto principalmente por material litogénico ($92 \pm 17\%$) y en menor proporción de biogénico ($8 \pm 5\%$), siendo el polen el componente orgánico más abundante, con un 6%. A pesar de que MTPA medida en la orilla del lago está constituida principalmente por material litogénico, la mayor parte (97%) de la materia particulada que sedimenta al fondo del lago Alchichica se produce

dentro de la columna de agua y tan sólo una proporción menor (3%) es de origen alóctono (aéreo); es decir, la contribución del carbono particulado alóctono es insignificante comparado con el autóctono. Lo anterior se debe a que los remolinos que transportan el material litogénico y que llegan al lago, se desvanecen al contacto con las aguas frías, que disipan su energía y favorecen la depositación del material en la orilla, impidiendo que éste alcance a llegar a la zona pelágica. La gran cantidad de COP que se deposita en el fondo de Alchichica sugiere que este lago puede ser considerado como un sumidero de carbono orgánico y, por lo tanto coadyuva –aun a tan pequeña escala- a regular el clima.

ABSTRACT

The present study evaluated the temporal and spatial dynamics of the autochthonous and allochthonous total particulate matter (TPM) and particulate organic carbon (POC) fluxes in a warm monomictic lake. To measure within the lake as well as aerial fluxes, three sediment trap stations were placed in the central and deepest part of Lake Alchichica and one station on the shoreline (aerial trap), respectively. The collected material was recovered monthly along one year (June 2006-June 2007). The TPM (398 ± 90 to $3284 \pm 109 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) and POC (74 ± 5 to $451 \pm 7 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) flux ranges measured in Alchichica were higher than those reported for other oligotrophic lakes and even of higher trophic level. The higher TPM and POC fluxes were measured in the bottom and upper traps respectively during the diatom (consisting mainly of *Cyclotella alchichicana*) and the cyanobacteria *Nodularia cf. spumigena* blooms. Additionally, there was an increase in both fluxes associated with the development of a deep chlorophyll maximum at the metalimnion. TPM and POC fluxes were higher in the epilimnion (mixing zone) during the early stratification while both fluxes were higher below the metalimnion (below the thermocline) and close to the bottom (hypolimnion) during the well-established and late stratification. The inorganic fraction of the TPM was the main constituent; however, this inorganic material is biogenic in origin consisting of diatom frustules and not of lithogenic composition (e.g., clay, volcanic glass).

Regarding the aerial traps, the TPM flux range (ATPM = 111 ± 33 - $1211 \pm 224 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) was comparable to those observed in other arid and semiarid areas influenced by local dust sources similar to Lake Alchichica. The higher ATPM fluxes were found in the cold-dry season, mainly associated with the direction where the dominant winds come from (blowing through the local dust source). The aerial COP flux (COPA = 7 ± 2 - $40 \pm 2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) was small (3%) in comparison with the ATPM. The aerial POC did not present a well defined seasonal pattern. The material captured in aerial traps was mostly lithogenic ($92 \pm 17\%$) while a lower proportion ($8 \pm 5\%$) was biogenic. Pollen was the most important biogenic component with 6% of the total amount. In spite that the ATPM measured at the lake shoreline is mostly of lithogenic origin, most of the particulate matter (97%) that settled into the bottom of Lake Alchichica was originated in the water column, and only a small proportion (3%) was of allochthonous origin (air). As result of this the contribution of allochthonous

particulate carbon was irrelevant in comparison with the autochthonous portion. Whirlwinds transporting lithogenic material disappear upon reaching the edge of the lake where the cold water removes their energy and the dust is deposited at the littoral fringe without reaching ever the pelagic zone. The large amount of POC that is deposited in the bottom of Lake Alchichica suggests that the lake could be considered as an organic carbon sink and, therefore, a potential climate regulator.

1. INTRODUCCIÓN

La materia total particulada (MTP) o seston en los cuerpos acuáticos está integrada por componentes tanto vivos como no vivos. Dentro de los no vivos se incluye la fracción orgánica (MOP) y la inorgánica (MIP) (Lenz 1977, Karl et al. 1991a, Margalef 1983, Wetzel y Likens 2000, Wotton 2004). El seston tiene un papel importante dentro de los ecosistemas acuáticos, pues sus componentes pueden formar parte de las redes tróficas, además de que determinan la profundidad de penetración de la luz y, por lo tanto, influyen en la tasa de producción de la zona pelágica y bentónica; también puede funcionar como substrato para las poblaciones bacterianas y aumentar sus condiciones de crecimiento; finalmente, el seston que se sedimenta a través de la columna de agua afecta las condiciones de vida (p.e., comida, consumo de oxígeno disuelto) de la fauna bentónica de una forma decisiva (Lenz 1977).

El origen de las dos fracciones del seston puede ser tanto alóctono (precipitación seca y húmeda) como autóctono (p.e., la producción de fitoplancton), incluyendo la resuspensión de sedimentos del fondo y de la zona litoral de los lagos (Lenz 1977, Peng et al. 2004). La importancia de cada una de estos orígenes dependerá de las características del cuerpo acuático y de las

condiciones climáticas de la zona (Karl et al. 1991a, Weyhenmeyer y Bloesch 2001, Eckert et al. 2003, Peng et al. 2004, Wotton 2004).

La materia particulada de origen alóctono tiene una gran importancia en la biogeoquímica de los océanos y sistemas epicontinentales (Rutten et al. 2000, Torres-Padrón et al. 2002), baste mencionar las implicaciones del aporte de polvo de los desiertos africanos en la productividad primaria del océano (p.e., Jickells et al. 2005, Prospero y Lamb 2003). Los sistemas epicontinentales están expuestos a una mayor entrada de partículas litogénicas (p.e., arcillas, material volcánico) y biogénicas (p.e., polen). Este tipo de partículas tienen también un papel relevante en la ecología y calidad del agua de los sistemas acuáticos, ya que muchas de ellas presentan superficies activas que intervienen en procesos metabólicos de los organismos (p.e., fotosíntesis); del mismo modo, producen una mayor turbidez en la columna de agua y, por lo tanto, reducen la capa fótica (Peng et al. 2004).

Las fuentes de materia particulada autóctona son principalmente dos, la asociada con la precipitación de minerales sobresaturados (p.e., calcita o aragonita -“lake whitening”-) y la producción de fitoplancton, siendo ésta última la más estudiada (Karl et al. 1991a, Legendre y Michaud 1998, Legendre y Rivkin 2002). Sin embargo, dentro de la MTP también se han encontrado restos

y desechos (p.e., "fecal pellets") de zooplancton (Ferrante y Parker 1977, Bloesch y Bürgi 1989, Dagg et al. 2003), así como agregados orgánicos ("marine" o "lake snow") que son generados en la zona fótica (Alldredge y Gotschalk 1988, Alldredge et al. 1990, Romero et al. 2000).

Una fuente de partículas autóctonas de gran relevancia en la columna de agua es la resuspensión de los sedimentos provenientes del fondo y/o de la zona litoral. Tanto en los lagos someros como en los profundos ($Z_{media} > 9m$, Weyhenmeyer 1997) la resuspensión de sedimentos puede tener un aporte substancial de partículas a la columna de agua; particularmente, es importante la actividad del oleaje cerca de la zona litoral (Evans 1994, Stheinman y Parparov 1997, Weyhenmeyer et al. 1997). La falta de evaluación de la resuspensión puede conducir a cálculos erróneos de los flujos de MTP. En los lagos profundos que presentan estratificación térmica, la actividad de las ondas internas es la causa principal de la resuspensión (Weyhenmeyer 1996, Antenucci y Imberger 2003).

La producción fitoplanctónica en los ecosistemas acuáticos tiene gran relevancia como fuente de aporte de MOP, incluyendo no sólo el fitoplancton mismo, sino también su restos, así como los desechos del zooplancton, su principal consumidor (Yamaguchi et al. 2003). La producción fitoplanctónica se

determina, esencialmente, en función de la luz, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes (Reynolds 1984), lo cual genera una gran variación en el perfil vertical, presentándose la mayor producción en la zona fótica y, usualmente, por encima de la termoclina.

Desde el empleo de las trampas de sedimento a finales de los 1970's (Honjo 1997), se ha venido ampliando el conocimiento acerca de los flujos verticales de la MTP y sus componentes (MOP y MIP) en los cuerpos acuáticos. La MOP es frecuentemente la fracción que más contribuye en los flujos de MTP (Simon et al. 2002), y sigue diferentes rutas dentro de los lagos (Legendre 1999, Simon et al. 2002): 1) transferencia dentro de las redes alimenticias, 2) la exportación hacia el fondo y 3) la descomposición y remineralización a través del circuito microbiano dentro de la columna de agua. Asimismo, se ha encontrado en diversos lagos que los flujos de MTP en la zona fótica son mayores a los de las capas profundas y aproximadamente el 75% de la producción primaria se recicla en la capa superior de la columna de agua (Lehmann et al. 2002, Chung et al. 2004).

Las tallas pequeñas del fitoplancton se remineralizan en la zona fótica y las tallas grandes se exportan al fondo (Legendre 1999). Por lo anterior, se considera que la cantidad de materia particulada que se exporta hacia el fondo

depende del tamaño de las partículas que se generan e incorporan (precipitación seca y húmeda) en las capas superficiales de la columna de agua (Simon et al. 2002, Poister y DeGuelle 2005). Sin embargo, también otras características - tales como la forma y la densidad de las partículas- intervienen en la velocidad de sedimentación (Callieri 1997, Effler et al. 2001, Veronesi et al. 2002, Wotton 2004). Por otro lado, el consumo del fitoplancton por parte del zooplancton reduce la cantidad de materia particulada que se exporta a las capas profundas de los cuerpos acuáticos (Chung et al. 2004, Viner-Mozzini et al. 2003, Devol y Hartnett 2001, Veronesi et al. 2002).

Cuando se presenta una dominancia de la fracción de talla mayor de partículas en los lagos (principalmente de fitoplancton), ésta tiene implicaciones importantes en el sistema debido a que: a) se hunden rápidamente, b) disminuye el alimento (tanto nutrientes como alimento para el zooplancton) de la capa fótica, y c) contribuye a la desoxigenación de las capas profundas (Legendre 1999, Devol y Hartnett 2001).

Otros factores que determinan la variación vertical de los flujos de MTP son las condiciones presentes en cada tipo de lago y su hidrodinámica característica (i.e., épocas de estratificación y circulación). Se ha observado que cuando un lago se encuentra estratificado, los flujos de MTP son mucho

mayores en el epilimnion que en el hipolimnion debido a que la termoclina funciona como una barrera física que retrasa el paso de las partículas hacia el fondo (Stemmann et al. 2002).

El viento también juega un papel importante en la sedimentación de las partículas, ya que cuando éste es de gran intensidad, produce turbulencia en la zona de mezcla, lo que puede propiciar la agregación o desagregación de partículas que van a ser remineralizadas o exportadas dependiendo de su tamaño final (MacIntyre y Jellison 2001, Pesant et al. 2002). Otro efecto de los vientos fuertes es la ruptura parcial (atelmixis) o total de la termoclina, permitiendo la liberación parcial de las partículas retenidas en ella (Lewis 1996, Doyon et al. 2000). Estas partículas pueden seguir dos caminos dependiendo de su tamaño: las grandes se hundirán, mientras que las pequeñas se reintegrarán a la zona de mezcla. Asimismo, existe una variación temporal de los flujos de la MTP y sus fracciones respectivas (MOP y MIP). Esta variación temporal está regulada principalmente por las condiciones fisicoquímicas del lago y meteorológicas de la zona donde se ubica el cuerpo acuático (Effler et al. 2001, Weyhenmeyer y Bloesch 2001, Veronesi et al. 2002, Wotton 2004). Estas condiciones regulan la producción de las partículas (principalmente las de fitoplancton) en los lagos. Por ejemplo, los mayores flujos de MTP -y

principalmente los de MOP- se han relacionado con los eventos de florecimiento de fitoplancton (Viner-Mazzini et al. 2003).

El estudio de los flujos de la MTP en los lagos ha sido de gran importancia para entender el origen y la circulación de la materia orgánica e inorgánica dentro los ambientes acuáticos, así como la remineralización de los nutrientes y su relación con los contaminantes. La cuantificación de los flujos y la sedimentación de la MTP y su variación espacio-temporal son fundamentales para entender los ciclos biogeoquímicos y de nutrimentos dentro de estos sistemas epicontinentales (Punning et al. 2003, Effler et al. 2001, Weyhenmeyer y Bloesch 2001), en especial el del carbono orgánico particulado (Callieri et al. 1986, Callieri 1997).

2. ANTECEDENTES

El conocimiento de los flujos de la materia particulada y, en especial, del carbono orgánico en el océano, se ha considerado de gran importancia y, por lo tanto, existe abundante información sobre el tema (Karl et al. 1991b, Ittekkot et al. 1996). Sin embargo, en lo referente a los cuerpos acuáticos epicontinentales, la información acerca de la composición, transporte y destino

de la materia particulada que se forma y/o entra a la zona fótica es escasa (Kempe y Schaumburg 1996) y aún más la referente al carbono orgánico.

La mayoría de los trabajos realizados en lagos se limitan a las zonas templadas, en los cuales los intervalos de los flujos de MTP tienen una variación amplia a lo largo del ciclo anual y entre lagos. Sin embargo, es muy poco el conocimiento acerca de los flujos de MTP en los lagos de regiones tropicales. En el lago Kinneret (Israel), Viner-Mozzini et al. (2003) estudiaron la relación de los florecimientos de fitoplancton con los flujos de carbono orgánico particulado, encontrado precisamente que éste se incrementa cuando se presentan los florecimientos.

En México, los trabajos referentes a flujos de MTP son escasos y todos ellos se han realizado en el océano (p.e. Smoak et al. 1999, Voss et al. 2001), siendo inexistentes para los sistemas epicontinentales. Por tal motivo, el presente estudio constituye una contribución pionera de su tipo para México. Asimismo, también es una primicia para México el evaluar la importancia de los aportes alóctonos inorgánicos *versus* los autóctonos orgánicos del lago Alchichica, ubicado en una zona semiárida.

Alchichica es un lago tropical, monomíctico cálido que está siendo estudiado en forma regular y del que se cuenta con antecedentes limnológicos

diversos. A manera de ejemplo se pueden citar estudios sobre el bacterioplancton (Lugo et al. 2001), fitoplancton (Oliva et al. 2001) y zooplancton (Lugo et al. 1999), así como de su hidrodinámica (Alcocer et al. 2000, Filonov y Alcocer 2002, Filonov et al. 2006). También existen trabajos sobre los cambios en la biomasa fitoplanctónica total, expresada como clorofila “a”, y por tallas ($< 2 \mu\text{m}$ y $> 2 \mu\text{m}$) (Sánchez 2000, Adame et al. 2008, Rosiles 2005). Adame et al. (2008) reconocieron que a diferencia de lo que sucede en la mayoría de los cuerpos acuáticos oligotróficos, la biomasa fitoplanctónica en el lago Alchichica está dominada por fitoplancton de talla grande. Debido a esta dominancia, la ruta predominante que sigue el fitoplancton es la exportación hacia el fondo.

Con base en los trabajos mencionadas anteriormente, el presente estudio pretende dar seguimiento a las variaciones espaciales y temporales del flujo de MTP en el lago Alchichica, así como establecer si existe una relación de estas variaciones con la hidrodinámica del lago y con los factores ambientales (climáticos, geológicos, etc.) de la zona.

3. HIPÓTESIS

De acuerdo a lo encontrado en estudios previos (p.e., Adame et al. 2008), y a pesar de su condición oligotrófica, el lago Alchichica presenta una predominancia de fitoplancton de talla grande, principalmente de diatomeas.

Con base en lo anterior, la primera hipótesis planteada fue:

H1. Los flujos de MTP y carbono orgánico particulado serán más elevados en el lago Alchichica que los encontrados en otros lagos de condiciones tróficas similares (oligotróficos) en donde predomina el fitoplancton de talla pequeña.

Se ha observado que existe una variación tanto vertical como temporal en los flujos de MTP y carbono particulado en los lagos. La variación temporal se atribuye al desarrollo de florecimientos de fitoplancton (Viner-Mozzini et al. 2003). Por otro lado, la variación vertical de estos flujos está relacionada principalmente con las épocas de estratificación y mezcla. Durante la estratificación se presenta un flujo mayor en el epilimnion que en el hipolimnion, mientras que durante la mezcla el flujo hacia el fondo es similar a lo largo de la columna de agua (Stemmann et al. 2002). Por lo anterior, se establecieron las siguientes hipótesis alternas:

H2. Los flujos mayores de MTP y carbono orgánico particulado en el ciclo anual se presentan durante el florecimiento invernal de diatomeas (p.e., *Cyclotella*

alchichicana) y primaveral de cianobacterias (i.e., *Nodularia spumigena*), cuando se producen grandes cantidades de fitoplancton de talla grande.

H3. Los flujos de MTP y carbono orgánico particulado en el epilimnion son mayores a los del hipolimnion, siendo más marcada esta diferencia en la época de estratificación plena, en donde la barrera de densidad es mayor.

Viner-Mozzini et al. (2003) y Simon et al. (2002) han observado que la MOP constituye el aporte mayor de la MTP, mientras que la contribución de la MIP es menor. Además y como se mencionó anteriormente, el aporte de MOP se incrementa durante los periodos de florecimiento de fitoplancton. En referencia a lo anterior, se plantearon las siguientes hipótesis:

H4. La MOP tiene una contribución mayor a la MTP, mientras que el aporte de la MIP es menor durante todo el año.

H5. La contribución de MOP a la MTP se incrementa durante los periodos en los que se presentan florecimientos fitoplanctónicos.

En relación con el origen de la MTP, no se han realizado estudios que determinen la proporción que existe entre las partículas que se generan dentro de la zona fótica (i.e., autóctonas) con relación a las que entran a ésta procedentes del exterior (i.e., alóctonas). Con base en lo anterior, se formularon las siguientes hipótesis:

H6. Los flujos de MTP que caen sobre el lago son similares a los reportados para otras regiones áridas y semiáridas.

H7. Si el viento es la principal vía de transporte de la MTP alóctona, ésta se incrementará en las épocas de secas y con mayor viento.

El lago Alchichica se encuentra en un área semiárida, por lo que se esperaría que el aporte mayor de MTP fuera de origen alóctono (Prospero et al. 2001, Ganor et al. 2003); sin embargo, la talla de fitoplancton dominante en el lago es la grande y su principal ruta sería la sedimentación hacia el fondo, por lo que se planteó la siguiente hipótesis:

H8. La mayor proporción de MTP es autóctona, esto es, la generada dentro de la zona fótica, y la MTP alóctona representa una proporción menor.

4. OBJETIVO GENERAL

Por un lado, Alchichica es un lago oligotrófico con una predominancia de fitoplancton de talla grande que conlleva a pensar que la materia total particulada será predominantemente autóctona; sin embargo, por el otro lado, el lago se encuentra en una cuenca semiárida donde la vegetación original ha sido sustituida por la agricultura, lo que indica que el aporte de material total particulado alóctono será el predominante.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue reconocer la dinámica temporal y espacial de los flujos de la materia total particulada y del carbono total particulado en el lago Alchichica, así como establecer su origen (alóctono o autóctono) y destino.

4.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Describir la variación temporal y vertical de los flujos de materia total particulada (MTP) en el lago Alchichica.
- Describir la variación temporal y espacial de los flujos de carbono total particulado (CTP) y sus dos fracciones (COP y CIP) en el lago Alchichica.
- Determinar la dinámica de los flujos de clorofila “a” en el lago Alchichica.
- Identificar las diferentes clases de partículas que constituyen el material en sedimentación, determinar la proporción que existe entre la MOP y la MIP, así como su variación espacial y temporal.
- Evaluar la relevancia de las fuentes aéreas alóctonas (precipitación seca, por viento, y húmeda, por lluvia) en la contribución de materia particulada al lago Alchichica.
- Estimar la relevancia de las condiciones meteorológicas e hidrográficas del lago Alchichica con respecto a la dinámica temporal y espacial de los flujos de MTP, COP y CIP.

5. ÁREA DE ESTUDIO

Alchichica es el mayor de los seis lagos “maars” o cráter que se localizan en la cuenca endorreica Oriental (4,982 km²) en el extremo SE del Altiplano Mexicano (19° 24.7' N, 97° 24.0' W), entre los estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala (Alcocer et al. 2000, Filonov et al. 2006) (Fig. 1). Esta zona se originó hace aproximadamente un millón de años durante el Cuaternario (Gasca 1981).

El lago Alchichica se ubica en una latitud tropical. El clima en la región es templado seco debido a que se encuentra a una elevada altitud (~ 2,300 m s.n.m.). La temperatura ambiental media es de 12.9°C (Alcocer et al. 2000). Presenta dos épocas climáticas bien definidas: una de lluvias con temperaturas más altas (14.5-15.4 °C) y otra de secas con temperaturas bajas (9.2-13.0 °C). El clima de la región es árido con una tasa de evaporación anual de 1,690 mm y una precipitación menor de 500 (promedio de 1966-2002, Servicio Meteorológico Nacional). La velocidad del viento varía entre 3 y 5 cm s⁻¹ con rachas de hasta 15 cm s⁻¹ (Filonov et al. 2006). Los vientos dominantes inducen la presencia de dos giros principales de circulación en dirección opuesta: uno ciclónico en la parte suroeste del lago y uno anticiclónico en la parte noreste (Filonov et al. 2006).

Alchichica es uno de los lagos más profundo de México, con una profundidad máxima de 62 m y una profundidad media de 40.9 m. Su forma es casi circular (diámetro de 1,733 m), con un área de 2.3 km² y un perímetro de 5.1 km (Fig. 1) (Filonov et al. 2006). La zona litoral está prácticamente ausente debido al descenso del nivel del lago durante los últimos años (Filonov et al. 2006). El principal aporte de agua es por manto freático, en menor cantidad por lluvia. Este lago presenta aguas hiposalinas ($\sim 8.5 \text{ g L}^{-1}$) y un pH básico (~ 9), siendo los iones dominantes el sodio y el cloruro, aunque también son importantes los bicarbonatos, los carbonatos, los sulfatos y el magnesio (Vilaclara et al. 1993).

Alchichica es un lago monomíctico cálido con dos épocas bien delimitadas hidrodinámicamente, la de mezcla -que va de finales de diciembre o inicios de enero a finales de marzo o principios de abril- y la de estratificación -que va de finales de abril a principios de diciembre-. La estratificación se caracteriza por el desarrollo de un hipolimnion anóxico (Alcocer et al. 2000). La zona fótica (1% PAR superficial, o radiación fotosintéticamente activa por sus siglas en inglés) varía entre 15 y 35 m profundizándose a medida que avanza la época de estratificación (Oliva et al. 2001).

Con base en el criterio de Margalef (1983), Alchichica es un lago

oligotrófico, ya que la concentración de clorofila “a” en la columna de agua es generalmente inferior a $5 \mu\text{g L}^{-1}$ durante la mayor parte del año. Pertenecientes al fitoplancton se han registrado 23 especies, siendo las diatomeas las mejor representadas en cuanto a riqueza específica (Rosiles 2005, Oliva et al. 2001). Alrededor del mes de enero se genera un florecimiento de éstas, principalmente *Cyclotella* spp., distribuido en toda la columna de agua, registrándose entonces los valores más altos de clorofila “a” en el año (Lugo et al. 1999, Adame et al. 2008). Aproximadamente durante el mes de mayo se presenta un florecimiento de la cianobacteria fijadora de nitrógeno *Nodularia* cf. *spumigena* Mertens (Oliva et al. 2009).

Con respecto al zooplancton, dominan dos especies de protozoos (el flagelado incoloro *Bodo caudatus* (Dujardin) Stein y el ciliado *Cyclidium glaucoma* Müller), dos especies de rotíferos (*Brachionus rotundiformis* Tschugunoff y *Hexarthra jenkiniae* De Beauchamp) y una sola especie de copépodo (*Leptodiaptomus garciai* Osorio-Tafall). La distribución temporal del copépodo varía durante el año, siendo más abundante después de los florecimientos (Lugo et al. 1999). Existen dos especies de vertebrados endémicos, el pez *Poblana alchichica* (Atherinidae, De Buen 1945) y el “ajolote” *Ambystoma taylorii* (Amphibia, Ambystomidae, Brandon et al. 1981). Finalmente, el bentos de la

zona profunda está compuesto por una especie de ostrácodo (*Candona* sp.

Baird) (Hernández et al. 2010) y quirónomido (*Chironomus stigmaterus* Say).

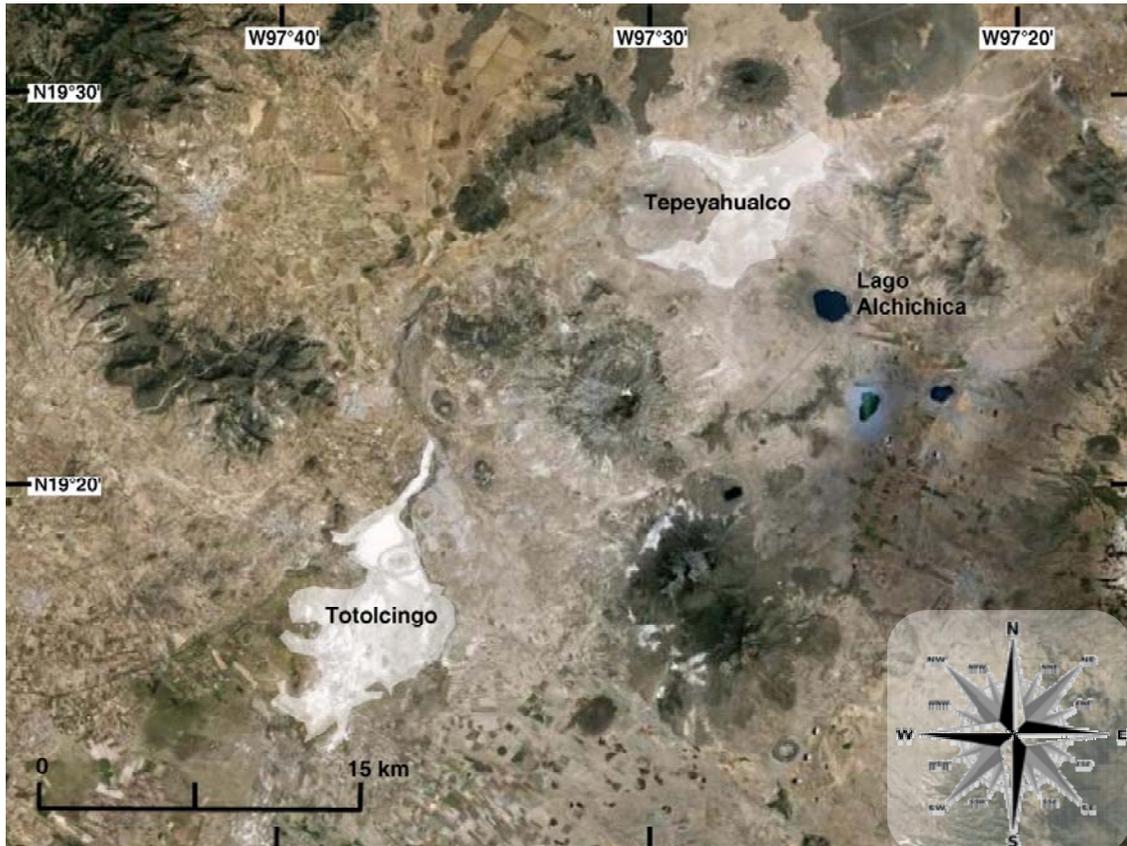


Figura 1. Vista área del lago de Alchichica, México

6. MÉTODOS

6.1 TRABAJO DE CAMPO

6.1.2. COLUMNA DE AGUA

Para la obtención de la materia en sedimentación se emplearon tres estaciones de trampas de sedimento (KC-Denmark sediment trap 4-tube station). Las estaciones constan de cuatro tubos de acrílico ($\varnothing = 80/74$ mm, L = 450 mm, V = 1.9 L) con una proporción L: \varnothing de 6, la cual garantiza que el material atrapado no se resuspenda (Callieri 1997, Weyhenmeyer 1997, Punning et al. 2003, Wotton 2004).

Un anclaje con las tres estaciones se colocó en la parte central y más profunda del lago. Durante la época de estratificación (abril-diciembre, Alcocer et al. 2000) se ubicó una estación en la base del epilimnion (superficie de aquí en adelante), otra justo por debajo del metalimnion (media de aquí en adelante) y la tercera en la base del hipolimnion (fondo de aquí en adelante) cerca del fondo (Fig. 2). La estación de la capa profunda siempre se colocó a tres metros del sedimento para evitar la captura de sedimento resuspendido. Para los meses en que el lago estaba mezclado, las profundidades de las dos primeras estaciones

del anclaje se distribuyeron equidistantemente a lo largo de la columna de agua permaneciendo la del fondo a 59 m. En la figura 2 se muestra la variación de la ubicación mensual de las trampas durante el periodo de muestreo (junio de 2006 a junio de 2007).

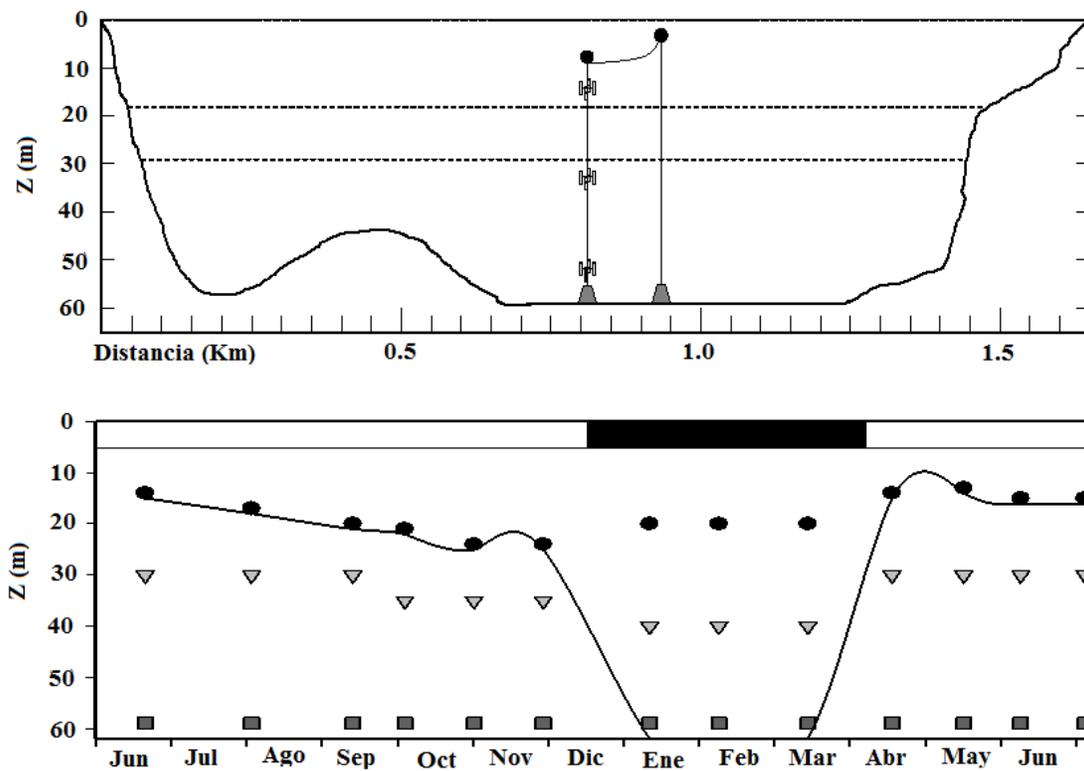


Figura 2. Arriba. Ubicación del anclaje y la posición de las trampas de sedimento en el lago Alchichica, México. Abajo. Posición de las trampas durante el periodo de estudio. ● superficie, ▼ media y ■ fondo. La barra negra indica el periodo de circulación y la línea el límite inferior de la zona de mezcla

Las trampas se llenaron con agua filtrada (malla de nilón de 100 μm de apertura) de la profundidad de donde se colocaron. La concentración de seston se obtuvo en cada una de las profundidades y se le restó al total del material

capturado (Callieri et al. 1986). La preservación de los sedimentos capturados en las trampas no requirió fijador para evitar interferir con los análisis que se realizaron al material particulado (p.e., microscopía electrónica de barrido, análisis elemental de COP). Es importante tomar en cuenta que para estos procedimientos y de acuerdo con varios autores (p.e., Callieri 1997, Veronesi et al. 2002), en tiempos de exposición corta (días a semanas) y a temperaturas bajas ($< 18^{\circ}\text{C}$) -como en el estudio actual- no hay actividad bacteriana a considerar dentro de las trampas.

Una vez recuperadas las trampas, el agua y material capturado se homogenizaron y filtraron a través de una malla de $100\ \mu\text{m}$ para eliminar el zooplancton y otros organismos nadadores ("swimmers", PilskaIn 2004, Karl et al. 1991b, Lee et al. 1988). Enseguida, el contenido -agua y material atrapado- de cada trampa se colocó en recipientes de plástico de 2.0 L previamente lavados con HCl al 2 % y enjuagados tres veces con agua desionizada para evitar que las muestras se contaminaran (Karl et al. 1991b). Las muestras se transportaron al laboratorio en oscuridad y con hielo para evitar su alteración (Karl et al. 1991a, Veronesi et al. 2002).

6.1.2. AIRE

Para calcular la MTP que se depositó (seca y húmeda) se utilizaron cuatro tubos de PVC ($\varnothing = 90/84$ mm, L = 500 mm, V = 2.8 L) con una proporción L: \varnothing de 6.6, con la cual se garantizó que el material atrapado no se pierdan (Anon 1982). Las trampas se fijaron verticalmente a cada esquina de una jaba de plástico y se colocaron aproximadamente a 73 m de la orilla y a 10 m de altura para evitar la interferencia humana y animal. Las trampas se limpiaron previamente con HCl al 2% y se enjuagaron tres veces con agua desionizada.

La extracción del material atrapado en los contenedores se realizó con ayuda de agua desionizada. Las trampas se enjuagaron tres veces para garantizar que no se quedara material pegado en el fondo ni en las paredes. El contenido de las trampas se filtró a través de una malla de 100 μ m para eliminar los insectos capturados (McGowan et al. 1996). Al igual que en las trampas de agua el material capturado se trasladó a recipientes de plástico de 2.0 L, lavados previamente. Las muestras se transportaron en frío y oscuridad para evitar su alteración.

6.2. TRABAJO DE LABORATORIO

6.2.1. COLUMNA DE AGUA

Para la determinación de los flujos de materia total particulada, carbono total particulado, carbono orgánico particulado y clorofila “a” depositada se tomó una alícuota de cada una de los tres tubos de cada estación para tener un total de tres réplicas por nivel (superficie, media y fondo). El material de la cuarta trampa se ocupó para las observaciones al microscopio óptico y microscopio electrónico de barrido con microsonda. Para el caso de los microscopios invertido y de barrido se tomaron fotografías para la identificación posterior de las partículas capturadas en las trampas, con el fin de poder discernir su origen (Callieri 1997, Romero et al. 2000, Peng et al. 2004).

6.2.1.1. MATERIA TOTAL PARTICULADA

Para este fin se tomó una alícuota de cada trampa de agua entre 100 y 300 mL dependiendo de la cantidad de material capturado. La filtración se realizó con ayuda de equipos de filtración (47 mm) marca Millipore®. Los equipos empleados tuvieron el mismo tratamiento de limpieza que los

recipientes donde se colocaron las muestras. El filtrado se realizó con ayuda de una bomba de vacío a una presión entre 0.3 y 0.5 atmósferas para evitar la pérdida de material por la lixiviación de las células (Karl et al. 1991a).

El material se retuvo en filtros de fibra de vidrio marca Whatman® GF/F (47 mm de diámetro, 0.7 µm de retención nominal) previamente calcinados (550 °C durante cuatro horas) y pesados a temperatura ambiente (Callieri et al. 1986, Weyhenmeyer 1997, Pilskan 2004) con un comparador de masas marca Mettler Toledo®.

Para determinar y corregir la posible contaminación por manipulación y almacenamiento de las muestras, así como la retención de sales en la matriz del filtro se utilizó un filtro como blanco por cada profundidad. Este filtro se colocó debajo del filtro en el que se retuvo la muestra (Karl et al. 1991a).

Después de la filtración de las muestras, los filtros se colocaron en una estufa de secado a 60 °C durante 48 hrs (Weyhenmeyer 1997, Wetzel y Likens 2000, Jellison y Melack 2001) y se pesaron nuevamente a temperatura ambiente.

Para calcular los flujos de (MTP) se empleó la siguiente fórmula, de acuerdo con Karl et al. (1991b):

$$FMTP = \frac{[(PF_a - PF_f) - \text{Blanco}]V_t}{A_t T}$$

Donde:

$FMTP$ = Flujo de MTP ($mg\ m^{-2}\ d^{-1}$)

PF_a = Peso seco del filtro después del filtrado de la muestra (mg)

PF_f = Peso seco del filtro antes del filtrado de la muestra (mg)

V_t = Volumen de la trampa (mL)

V_f = Volumen filtrado (mL)

A_t = Área de la boca de la trampa (m^{-2})

T = Tiempo de exposición de las trampas (días)

6.2.1.2. MATERIA ORGÁNICA E INORGÁNICA PARTICULADA

La materia orgánica particulada (MOP) se obtuvo de multiplicar la por el factor 2 como lo sugiere Lenz (1997) y ha sido utilizado por diversos autores (p.e., Callieri 1997). Para calcular los flujos se utilizó la misma fórmula que para la MTP. Los flujos de Materia Inorgánica Particulada (MIP) se calcularon a través de la diferencia entre los de MTP y MOP (Weyhenmeyer 1997, Chung et al. 2004).

6.2.1.3. CARBONO TOTAL PARTICULADO

Para el Carbono Total Particulado (CTP) se tomó una alícuota de cada trampa de agua entre 10 y 20 mL dependiendo de la cantidad de material recolectado. La muestra se filtró con ayuda de un equipo de filtración (13 mm) marca Millipore®. Para ello se utilizaron filtros de fibra de vidrio (Whatman® GF/F, 13 mm de diámetro, 0.7 µm de retención nominal) previamente calcinados a 550 °C durante cuatro horas para eliminar cualquier residuo de carbono (Veronesi et al. 2002). Los filtros se guardaron en cajas de Petri y se pusieron a secar a 60°C durante cuatro días para su posterior medición con ayuda de un analizador elemental Carlo Erba® modelo NC2100 (Veronesi et al. 2002). Al igual que para la MTP se obtuvo un blanco el cual fue utilizado para corregir los valores de carbono. Para la determinación de los flujos de carbono se sustituyeron los valores del analizador elemental en la fórmula para la MTP.

6.2.1.4. CARBONO ORGÁNICO E INORGÁNICO PARTICULADO

Para el COP se tomó una alícuota de cada trampa de agua entre 10 y 20 mL dependiendo del material capturado. La filtración se realizó de manera similar a la del CTP. Después de la filtración, los filtros se acidificaron con HCl al 10 % para eliminar la fracción inorgánica del carbono (carbonatos) en la muestra

(Karl et al. 1991a, Veronesi et al. 2002). Posteriormente éstos se secaron (60 °C) y guardaron hasta su análisis en el mismo analizador elemental. En este caso el analizador elemental proporcionó la cantidad de COP. Los flujos se calcularon con la fórmula utilizada para el CTP. Los flujos de CIP se calcularon de sustraer los flujos COP a los de CTP (Karl et al. 1991a). Este cálculo consideró que una fracción era dominante si su porcentaje era mayor al 60 % y codominante si su porcentaje estaba entre 40 y 60%.

6.2.1.5. CLOROFILA "A"

Para la evaluación de la concentración de clorofila "a" (Clor-a) se filtraron 10 mL tomados de cada una de tres trampas en cada profundidad a través de un filtro de fibra de vidrio GF/F (Whatman®, 13 mm de diámetro, apertura de poro nominal 0.7 µm). Posteriormente, se extrajo la clorofila "a" de los filtros con acetona al 90% durante un periodo entre 18 y 20 hrs. en oscuridad y refrigeración. La clorofila "a" extraída se leyó en un fluorómetro digital Turner Designs 10-AU. Las lecturas obtenidas se convirtieron a µg de clorofila "a" por litro con la siguiente fórmula de acuerdo al método 445.0 de la EPA (Arar y Collins 1997):

$$\text{Clor-a} = \frac{(C_e V_e FD)}{V_m}$$

Donde:

Clor-a = concentración de clorofila "a" ($\mu\text{g L}^{-1}$)

C_e = concentración de clorofila "a" ($\mu\text{g L}^{-1}$) obtenida de la solución

extractora

V_e = volumen (L) utilizado para la extracción

FD= factor de dilución

V_m = volumen (L) de la muestra de agua

Para la obtención de los flujos de clorofila "a" se acopló la concentración final a la fórmula utilizada para la MTP.

6.2.2. AIRE

Para el caso de las trampas de aire se ocupó el material de tres trampas para la determinación de la materia total particulada, el carbono total particulado y el carbono orgánico particulado. El material de cada trampa se consideró como una réplica. El material del cuarto tubo se observó con el microscopio invertido y el microscopio electrónico de barrido con microsonda.

Para la identificación de las partículas capturadas en los contenedores se tomaron fotografías posteriormente.

6.2.2.1 MATERIA TOTAL PARTICULADA AÉREA

El contenido de las trampas se filtró a través de filtros de fibra de vidrio marca Whatman® GF/F (47 mm de diámetro, 0.7 µm de retención nominal) previamente calcinados y pesados en un comparador de masas marca Mettler Toledo®. Posterior a la filtración de las muestras los filtros se colocaron en una estufa de a 60°C durante 48 hrs. y se pesaron nuevamente. Para calcular el flujo de Materia Total Particulada Aérea (MTPA) se utilizó la siguiente fórmula:

$$FMTPA = \frac{[(PF_a - PF_f) - \text{Blanco}]}{A_t \cdot T}$$

donde:

FMTPA = flujo de materia total particulada ($mg\ m^{-2}\ d^{-1}$)

PF_a = Peso del filtro después del filtrado de la muestra (mg)

PF_f = Peso del filtro antes del filtrado de la muestra (mg)

A_t = Área de la boca de la trampa (m^{-2})

T = Tiempo de exposición de las trampas (días)

6.2.2.2. CARBONO TOTAL PARTICULADO AÉREO

Para calcular el Carbono Total Particulado Aéreo (CTPA) que entra al lago se tomaron alícuotas entre 10 y 20 mL del material capturado. Cada alícuota se filtró con ayuda de un equipo de filtración (13 mm) marca Millipore®. Los filtros (Whatman® GF/F, 13 mm de diámetro, 0.7 µm de retención nominal) utilizados se calcinaron a 550 °C durante cuatro horas para eliminar el carbono que pudieran tener. Los filtros se secaron a 60 °C durante 48 hrs. y analizados con un analizador elemental Carlo Erba® modelo NC2100. También se corrigieron los valores obtenidos por medio de un blanco y los flujos fueron calculados dividiendo el Carbono Particulado Total entre el área de la trampa por el tiempo.

6.2.2.3. CARBONO ORGÁNICO E INORGÁNICO PARTICULADO AÉREO

El Carbono Orgánico Particulado Aéreo (COPA) se obtuvo de filtrar una alícuota entre 10 y 20 mL de cada una de las tres trampas. Para el filtrado se utilizaron filtros previamente calcinados (550 °C) y un equipo de filtración de 13 mm. Los filtros se secaron a 60 °C durante 48 hrs. y fueron guardados hasta ser procesados en analizador elemental. Los flujos de Carbono Orgánico Particulado se calcularon con la misma fórmula utilizada para el Carbono Total

Particulado. Para calcular la cantidad de de Carbono Inorgánico Particulado Alóctono (CIPA) se restó el COPA al CTPA. Al igual que para la columna de agua se consideró que una fracción era dominante si su porcentaje era mayor al 60 % y codominante si su porcentaje estaba entre 40 y 60 %.

6.2.3. TRATAMIENTO DE DATOS

Las bases para el análisis de los datos generados en el presente trabajo se realizaron con el programa Microsoft Excel (2010), mientras que los análisis estadísticos se efectuaron con el programa SPSS (v. 13.0). Los datos utilizados presentaron una distribución normal (Smirnov – Kolmogorov, $p > 0.05$) por lo que para las comparaciones entre profundidades se corrió un análisis de varianza de una vía y las correlaciones entre las variables fueron con R de Pearson.

7. RESULTADOS

7.1. COLUMNA DE AGUA

7.1.1 FLUJOS DE MATERIA TOTAL PARTICULADA (MTP)

Los flujos de MTP variaron de 398 ± 90 a $3,284 \pm 109 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Tabla 1) con un promedio anual de $1,147 \pm 649 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. El flujo mayor se presentó durante la época de circulación (febrero) en la trampa de fondo. Los flujos de las trampas de superficie y media de este mes también fueron elevados ($2,129 \pm 209 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $2,353 \pm 101 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente) pero significativamente menores ($p < 0.05$) al de la trampa de fondo (Fig. 3). A finales de la estratificación temprana se registró un segundo pico (junio 2007). En este caso, los flujos más importantes de MTP se presentaron en las trampas de superficie ($2,259 \pm 179 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y media ($2,351 \pm 261 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) siendo significativamente ($p < 0.05$) mayores al flujo de fondo (Fig. 3). Los flujos máximos encontrados en febrero y junio para las trampas de superficie y media fueron de magnitud similar sin observarse una diferencia significativa ($p > 0.05$), sin embargo si se reconoció una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los flujos de fondo.

Flujo de Materia Total Particulada en un Lago Monomítico Cálido

Capa	Flujo de MTP ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)			Flujo de CTP ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)			Flujo de COP ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)		
	Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio
SUP	398	2,259	1,173	94	463	252	74	436	223
	90	179	606	13	17	129	5	5	114
MED	460	2,353	1,082	109	388	214	65	336	182
	26	101	632	5	31	82	4	35	78
FON	522	3,284	1,187	137	490	242	116	451	206
	37	109	717	12	15	87	4	7	82
Aire	111	1211	591	11	46	23	7	40	19
	33	224	398	2	4	10	2	2	9

Tabla 1. Valor mínimo (Mín.), máximo (Máx.), promedio anual de los flujos de materia total particulada (MTP), carbono total particuladao (CTP) y carbono orgánico particulado (COP) en el lago Alchichica. Promedios en el primer renglón y desviación estándar en el segundo.

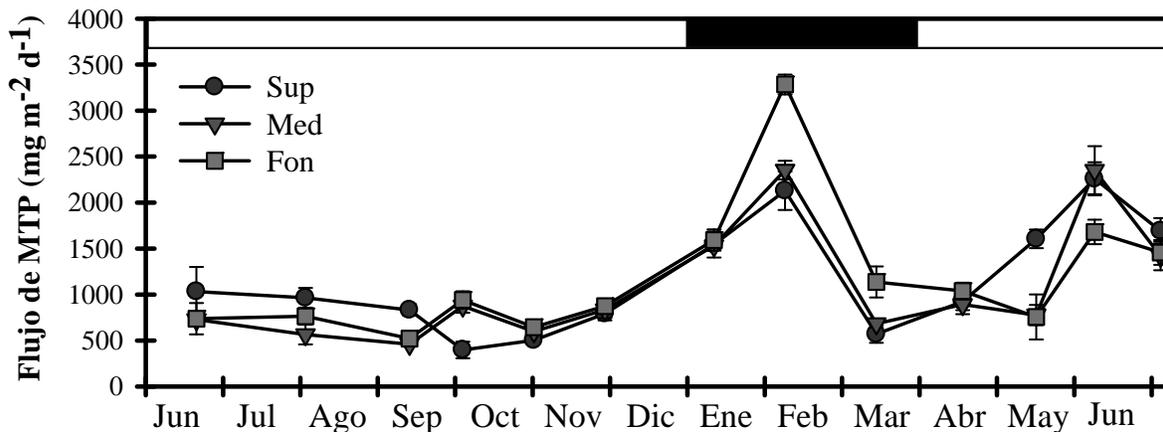


Figura 3. Variación temporal y espacial de los flujos de MTP en el lago Alchichica. Sup= superficie, Med = media y Fon = fondo.

En la estratificación bien establecida (julio a septiembre) los flujos fueron bajos, presentándose en la superficie valores más altos, pero sin mostrar una diferencia significativa ($p > 0.05$) entre los tres niveles (Fig. 3). Durante la

estratificación tardía (octubre a diciembre) los flujos se mantuvieron bajos; sin embargo, a principios de este periodo las trampas de media y fondo aumentaron sus flujos ($875 \pm 73 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $941 \pm 95 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente), siendo significativamente ($p < 0.05$) superiores al flujo que la trampa de superficie; durante esta época se presentó el flujo más bajo ($398 \pm 90 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) del periodo de estudio (Fig. 3).

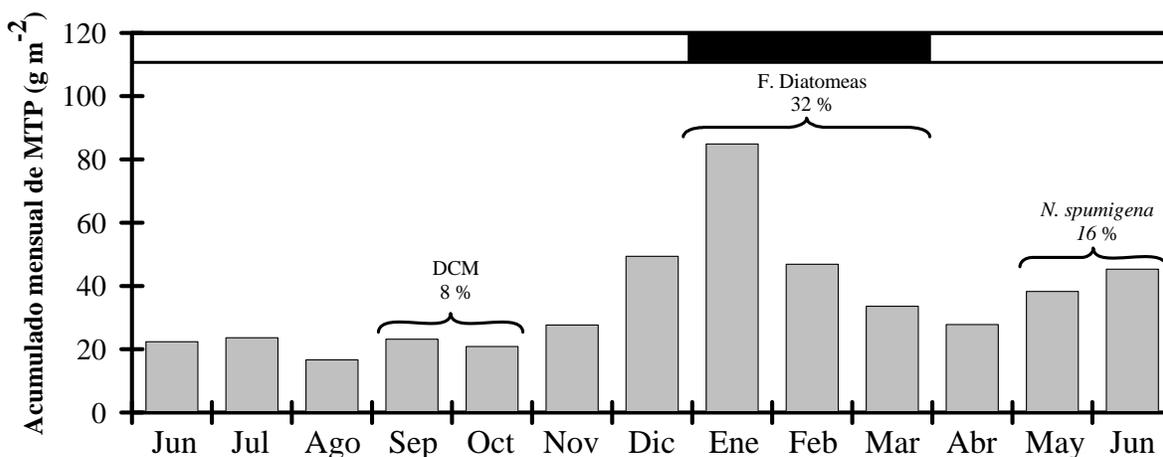


Figura 4. Materia total particulada (MTP) exportada mensualmente al fondo del lago Alchichica. DCM = Máximo Profundo de Clorofila, F. Diatomeas = Florecimiento de diatomeas y N. spumigena = Florecimiento de *N. cf spumigena*. La barra negra indica el periodo de circulación.

La suma de la MTP que alcanza el fondo del lago durante los trece meses de muestreo fue de 460 g m^{-2} y la de un año (junio 2006 a mayo 2007) fue de 415 g m^{-2} . Durante el florecimiento de diatomeas (enero a marzo) se presentó el mayor depósito (32%) del periodo de muestreo, siendo enero el mes que más

contribuyó con 85 g m^{-2} . En los meses en los que se presentó el florecimiento de *N. cf. spumigena* (mayo y junio 2007) se sedimentó un 16 % del total del periodo de muestreo. Cuando estuvo presente el DCM (septiembre y octubre), la MTP que llegó al fondo representó el 8% del total sedimentado (Fig. 4).

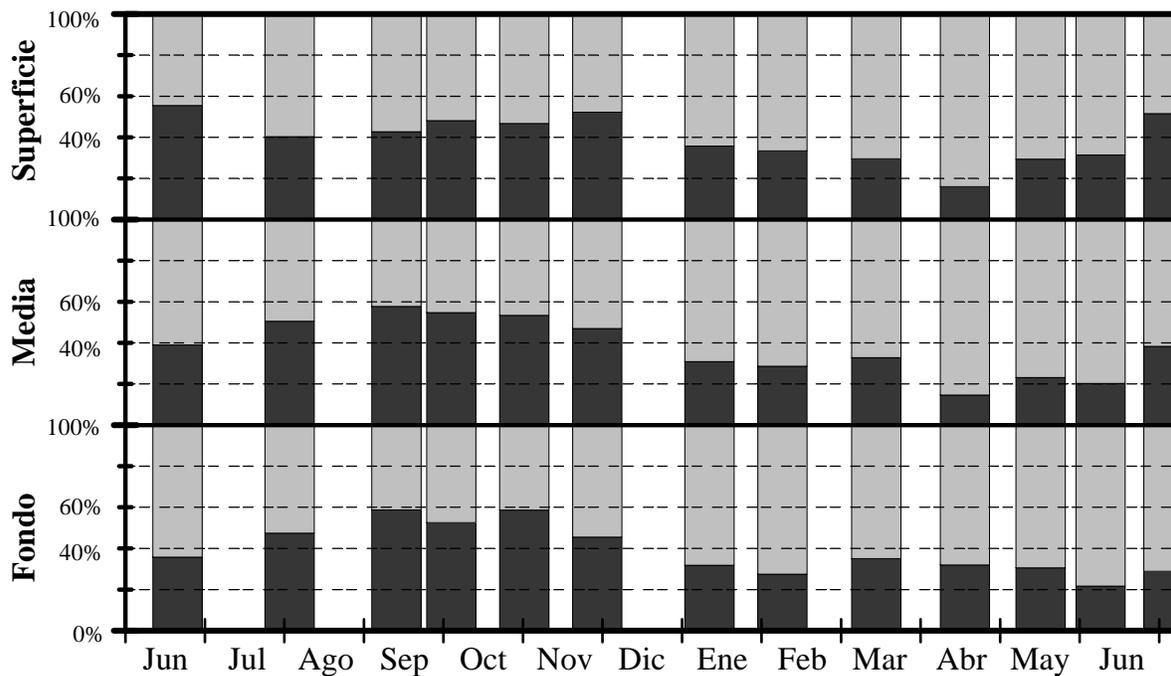


Figura 5. Variación temporal y espacial de los porcentajes de los flujos de MOP (Oscuro) y MIP (Claro) en el lago Alchichica.

La fracción inorgánica fue la dominante, con un promedio anual muy similar para los tres niveles (superficie = $61 \pm 11 \%$, media = $62 \pm 14 \%$ y fondo = $61 \pm 12 \%$). Así mismo, la variación temporal fue muy parecida en los tres niveles. Durante la época de circulación, la fracción inorgánica dominó con un intervalo

entre 64 y 72 %, presentándose el menor porcentaje en la trampa de superficie y el más alto en la de fondo (Fig. 5). Al inicio de la estratificación, la fracción inorgánica alcanzó los mayores porcentajes en las trampas de superficie y media (84 % y 85 %, respectivamente). Ni en la estratificación bien establecida ni en la tardía se encontró una dominancia mayor al 60 % de alguna de las dos fracciones en ninguno de los tres niveles (Fig. 5), presentándose una zcodominancia entre ambas fracciones.

7.1.2. FLUJOS DE CARBONO TOTAL PARTICULADO (CTP)

Los flujos de CTP fluctuaron entre 94 ± 13 y 490 ± 15 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$, con un promedio de 236 ± 102 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Tabla 1). En febrero (circulación), los flujos de CTP fueron elevados en los tres niveles, siendo más alto el del fondo (490 ± 15 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Sin embargo, sólo los flujos de las trampas de media y fondo fueron diferentes significativamente ($p < 0.05$) (Fig. 6).

En la estratificación temprana se encontraron los flujos menores para las trampas de superficie (96 ± 19 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$, abril) y media (109 ± 5 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$, mayo). A finales de esta época (junio 2007) se halló el flujo máximo para la trampa de superficie (Fig. 6), siendo significativamente ($p < 0.05$) mayor a los flujos de las trampas de media y fondo. Este pico fue similar en magnitud al

encontrado en la trampa de fondo en febrero durante la época de circulación. Durante la estratificación bien establecida, los flujos disminuyeron gradualmente en los tres niveles sin mostrar una diferencia significativa entre los tres. Al inicio de la estratificación tardía (octubre), los flujos de las trampas de media y fondo fueron mayores significativamente ($p < 0.05$) que los de la trampa de superficie. Sin embargo, a finales de esta época (diciembre) ya no se presentó una diferencia entre los flujos de los tres niveles.

7.1.3. FLUJOS DE CARBONO ORGÁNICO (COP) E INORGÁNICO PARTICULADO (CIP)

El valor promedio del flujo de COP fue de $203 \pm 93 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con un intervalo entre 74 ± 5 y $451 \pm 7 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Tabla 1). Al igual que para el CTP, los flujos máximos se encontraron en dos épocas a diferentes profundidades. El flujo máximo se presentó en la trampa de fondo durante el periodo de circulación (febrero). Los flujos de las trampas de media y fondo también fueron elevados en febrero, sin embargo fueron significativamente menores al flujo de la trampa de fondo (Fig. 6). El segundo flujo más alto se observó en superficie a finales de la estratificación temprana (junio 2007), siendo casi el doble al encontrado en las trampas de media y fondo (Fig. 6). En esta ocasión se presentó una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tres niveles. Los flujos encontrados fueron

disminuyendo a lo largo de la estratificación bien establecida, sin encontrarse una diferencia significativa entre los tres niveles. Al inicio de la estratificación tardía se observó una disminución en el flujo de la trampa de superficie y un aumento en los flujos de las trampas de media y fondo, siendo significativamente diferentes ($p < 0.05$) entre sí (Fig. 6).

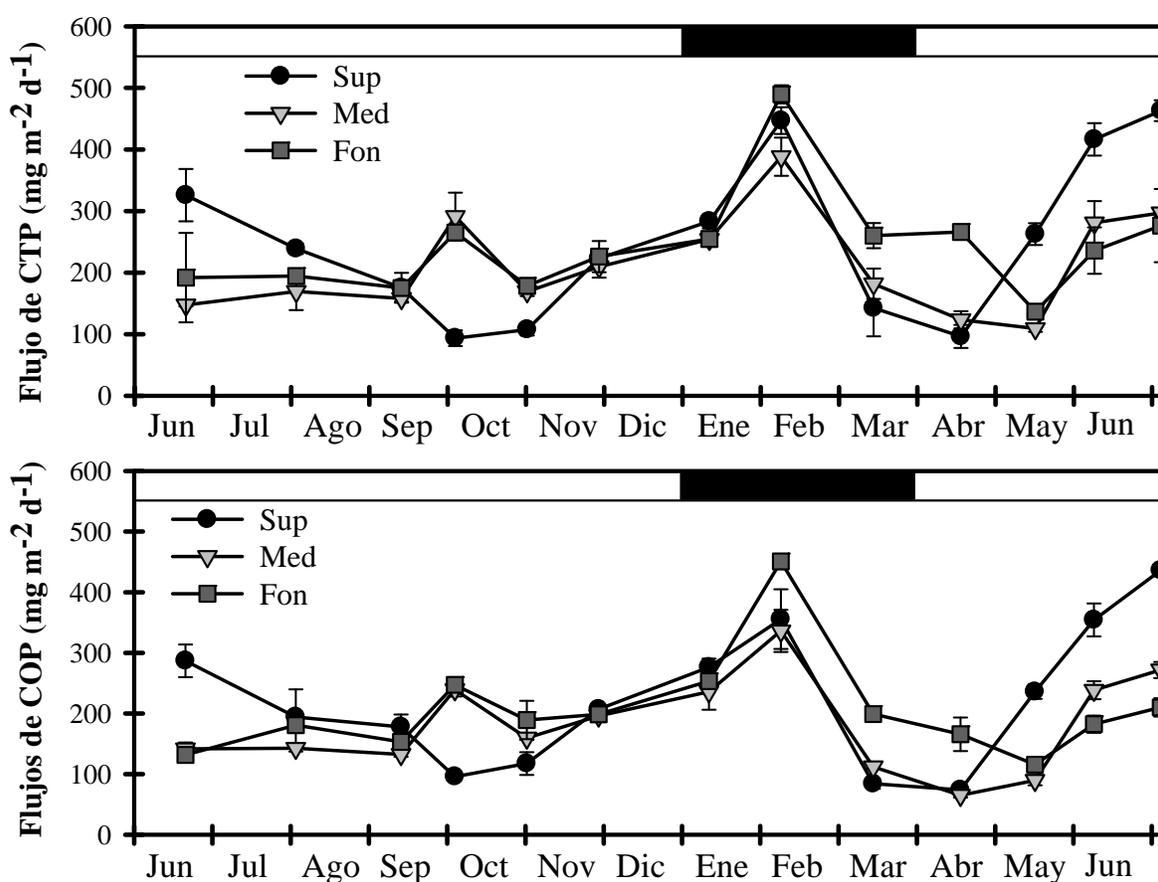


Figura 6. Variación temporal y espacial de los flujos de CTP (arriba) y COP (abajo) en lago Alchichica. Sup= superior, Med = media agua y Fon = fondo.

El CIP constituyó entre un 0 a un 47% del CTP. El intervalo de variación de los flujos del CIP fue de 0 ± 0 a $100 \pm 18 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con un promedio de $34 \pm$

32 mgC m⁻² d⁻¹. Los flujos mayores se encontraron a finales de la mezcla y principios de estratificación temprana, sin embargo no se observó ningún patrón en la variación temporal. Asimismo, no se encontraron diferencias significativas entre los meses de muestreo ni entre los flujos de las tres profundidades.

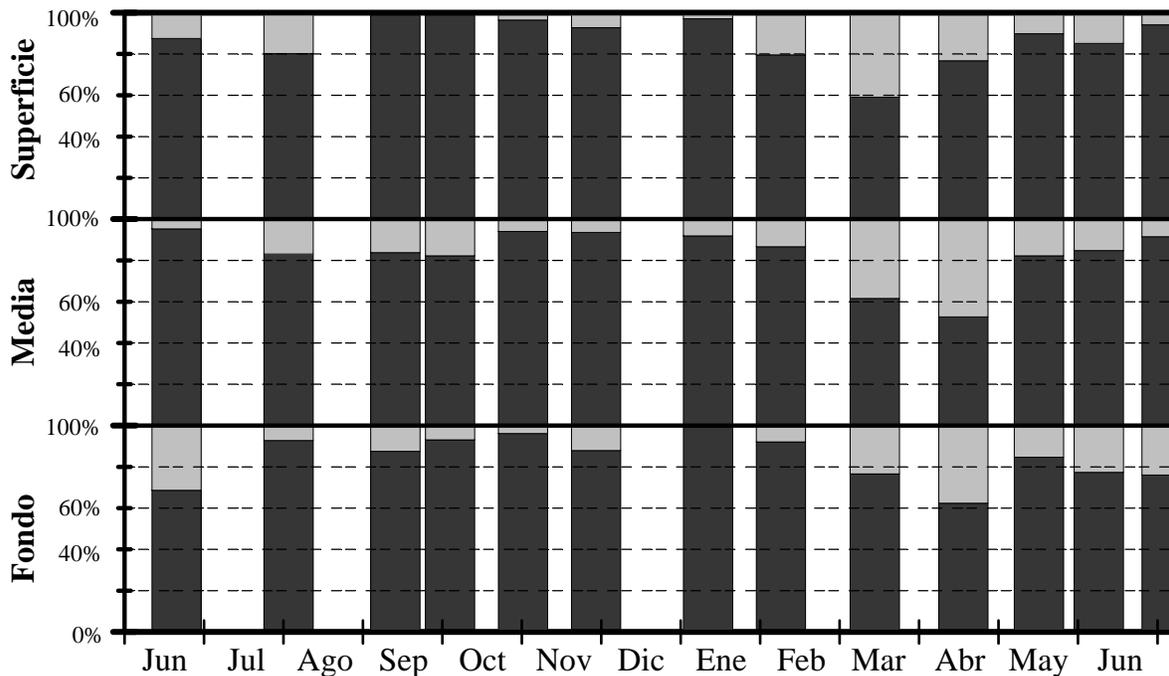


Figura 7. Variación temporal y espacial de los porcentajes de los flujos de COP (Oscuro) y CIP (Claro) en lago Alchichica.

El COP fue dominante, con un promedio similar para los tres niveles, con un $88 \pm 12\%$ para superficie, $83 \pm 13\%$ para media y $84 \pm 11\%$ para fondo. Tanto temporalmente como espacialmente, el carbono biogénico dominó el CTP con más del 60%. Sin embargo, durante los meses de marzo y abril se observó un

incremento en el porcentaje del CIP e incluso en las trampas de superficie y media llegó a ser codominante (Fig. 7).

La cantidad de COP exportada al fondo del lago durante un año (junio 2006 a mayo 2007) fue de 75.1 gC m^{-2} y la de todo el periodo de estudio fue de 88.4 gC m^{-2} . El 28 % del COP exportado en los 13 meses se acumuló durante el florecimiento de diatomeas, siendo enero el mes que más aportó con 12 gC m^{-2} . Se exportó el 12 % durante el florecimiento de *N. cf. spumigena* (mayo a junio 2007), mientras que se exportó el 14 % cuando el DCM fue más intenso (septiembre a octubre 2007) (Fig. 8).

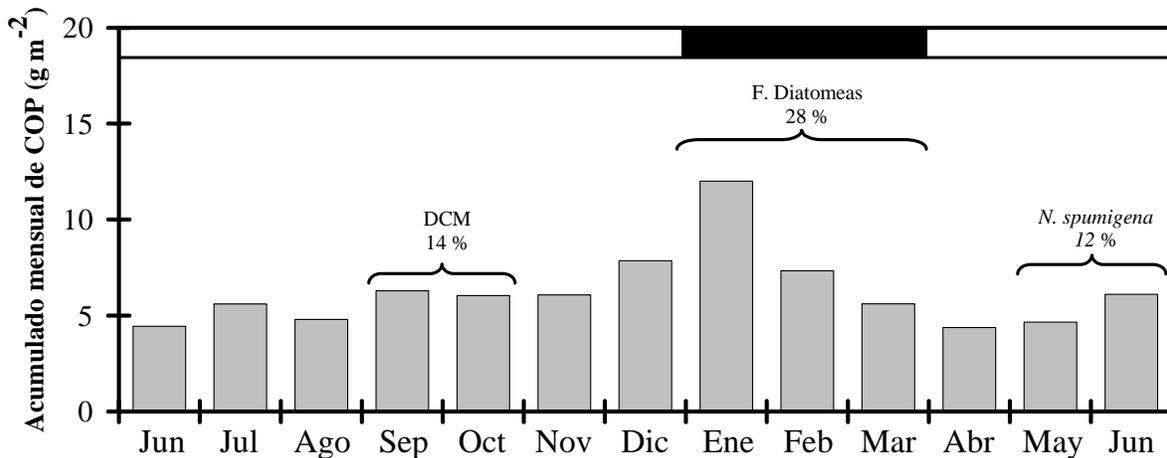


Figura 8. Carbono orgánico particulado (COP) exportada mensualmente al fondo del lago Alchichica. DCM = Máximo Profundo de Clorofila, F. Diatomeas = Florecimiento de diatomeas y *N. spumigena* = Florecimiento de *N. cf. spumigena*. La barra negra indica el periodo de circulación.

7.1.4. FLUJOS DE CLOROFILA "A" (CLOR-A)

El promedio anual del flujo de Clor-a fue de $2.9 \pm 3.2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con valor mínimo de $0.1 \pm 0.0 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y máximo de $13.3 \pm 1.7 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Los flujos mayores se presentaron durante el periodo de circulación en las trampas de media y fondo. Estos flujos fueron significativamente ($p < 0.05$) mayores a los registrados en la trampa de superficie (Fig. 9).

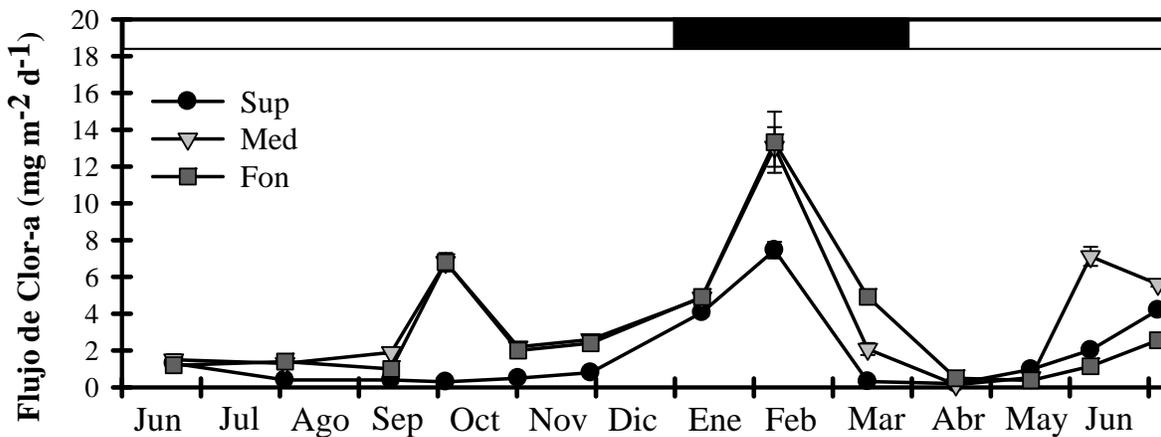


Figura 9. Variación temporal y espacial de los flujos de clorofila a en el lago Alchichica. Sup= superficie, Med = media y Fon = fondo. La barra negra indica el periodo de circulación.

A principios de la estratificación temprana, los flujos de Clor-a fueron bajos y no se presentaron diferencias significativas entre las tres profundidades. Sin embargo, al final de esta época los flujos de la trampa de media se incrementó, alcanzado una magnitud similar a la encontrada en la

trampa de superficie durante el periodo de mezcla (Fig. 9). Los flujos de mantuvieron bajos durante la estratificación bien establecida sin encontrarse ninguna diferencia significativa ($p > 0.05$) entre los tres niveles. Los flujos de las trampas de media y fondo presentaron un incremento al inicio de la estratificación tardía, siendo significativamente mayor al encontrado en la trampa de superficie (Fig. 9).

7.15. CORRELACIONES

Los flujos de MTP se correlacionaron positivamente con los flujos de CTP y COP (Fig. 10a y b). No obstante que los flujos de COP presentaron una correlación significativa ($p < 0.0001$) con los flujos de MTP, ésta sólo explica el 55% de la variación, mientras que los flujos de CTP explican mejor el comportamiento de los flujos de MTP con una r^2 mayor (66 %). Por otro lado, los flujos de MTP presentaron una correlación baja, pero significativa, con respecto a los flujos de Clor-a, explicando sólo el 42% de la variación (Fig. 10c).

Contrariamente a lo encontrado para los flujos de MTP, el comportamiento de los flujos de CTP estuvieron mejor explicados por los flujos de COP ($r^2 = 88$ %) que por los flujos de CIP ($r^2 = 19$ %) (Fig. 11a y b). En el caso de los flujos de COP y los flujos de Clor-a presentaron una correlación

significativa ($p < 0.0001$) cuando se realizó con todos los niveles, no obstante, sólo se explicó el 59% de la variación (Fig. 12a).

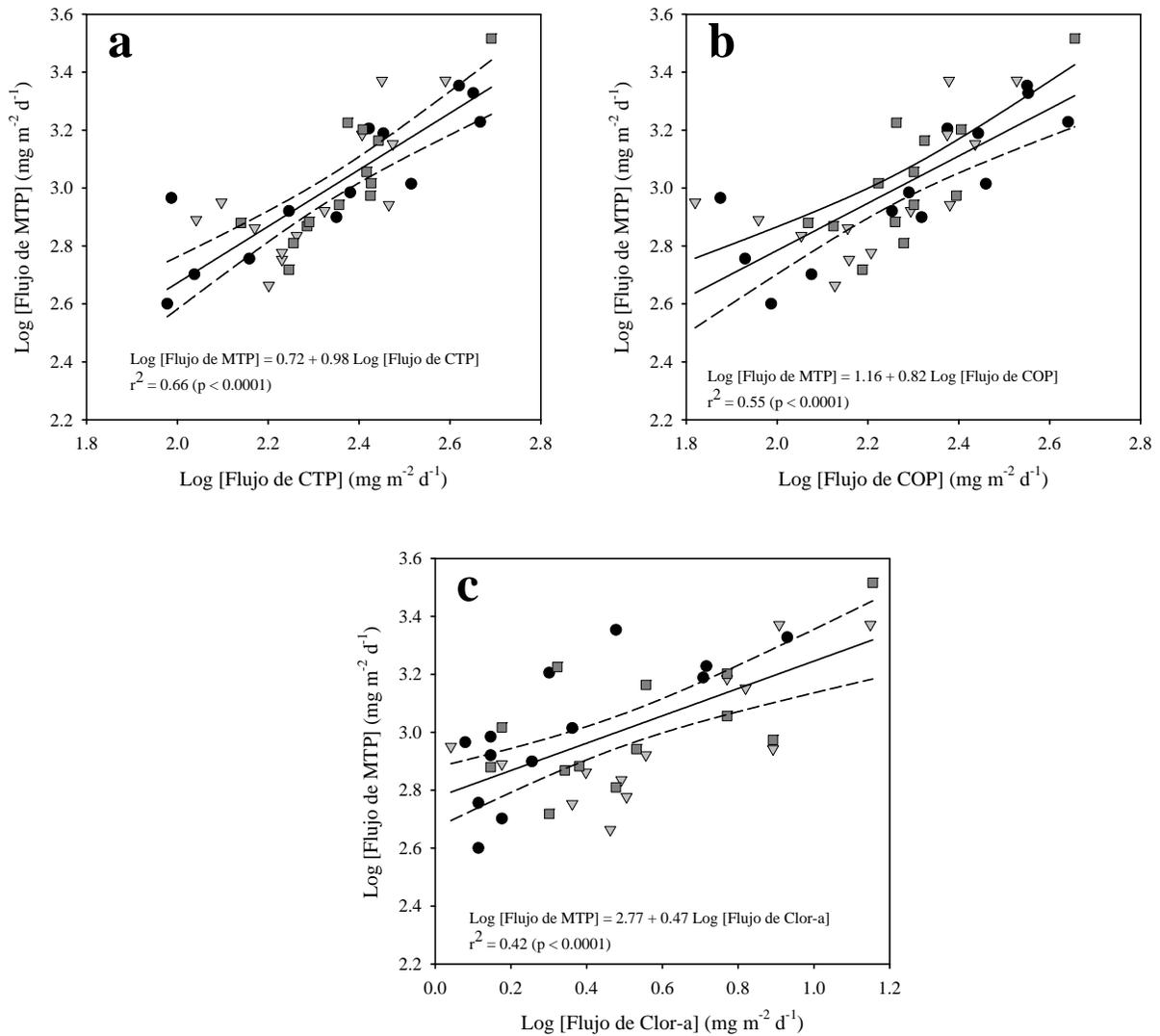


Figura 10. Correlaciones de los flujos de materia total particulada con los flujos de carbono total particulado (a), carbono orgánico particulado (b) y clorofila a (c). ● superficie, ▼ media y ■ fondo.

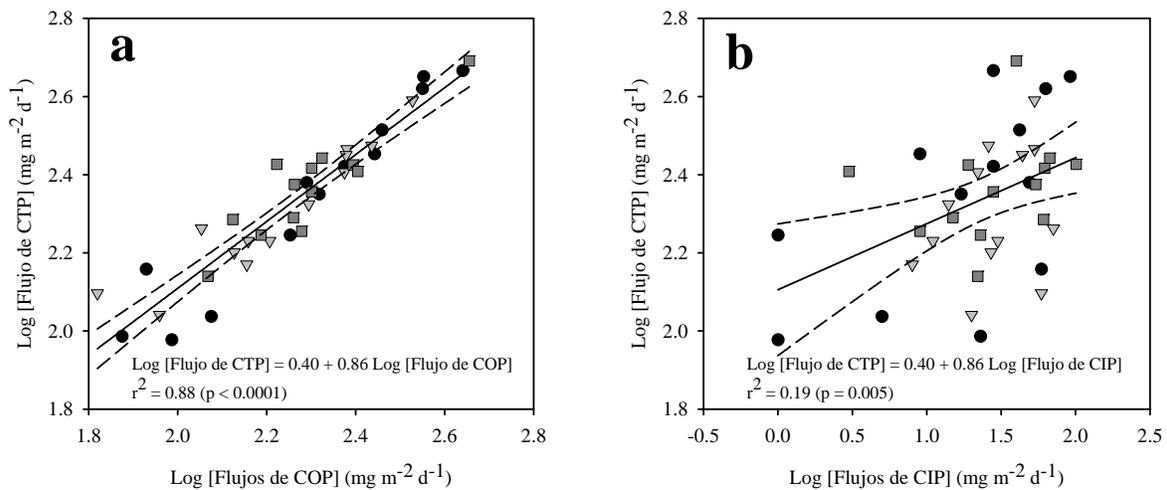


Figura 11. Correlaciones de los flujos de carbono total particulado con los flujos de carbono orgánico particulado (a) y carbono inorgánico particulado (b). ● superficie, ▼ media y ■ fondo.

Al realizar el análisis por profundidad, los valores de las correlaciones aumentaron (Fig. 12b, c y d). Los flujos de COP y Clor-a de las trampas de media y fondo fueron los que presentaron una correlación mejor ($r^2 = 91\%$, $p < 0.0001$ y $r^2 = 83\%$, $p < 0.0001$), mientras que la correlación menor se observó en los flujos de la trampa de superficie ($r^2 = 65\%$, $p = 0.0008$).

7.1.6. TIPO DE PARTÍCULAS

Las partículas capturas en las trampas fueron principalmente de origen biogénico compuestas, particularmente, por diatomeas planctónicas grandes (*Cyclotella alchichicana*, principalmente). Tanto las células vivas como los frústulos vacíos de estas diatomeas fueron muy abundantes durante el periodo

de circulación, con un promedio mayor al 75 % para las tres profundidades.

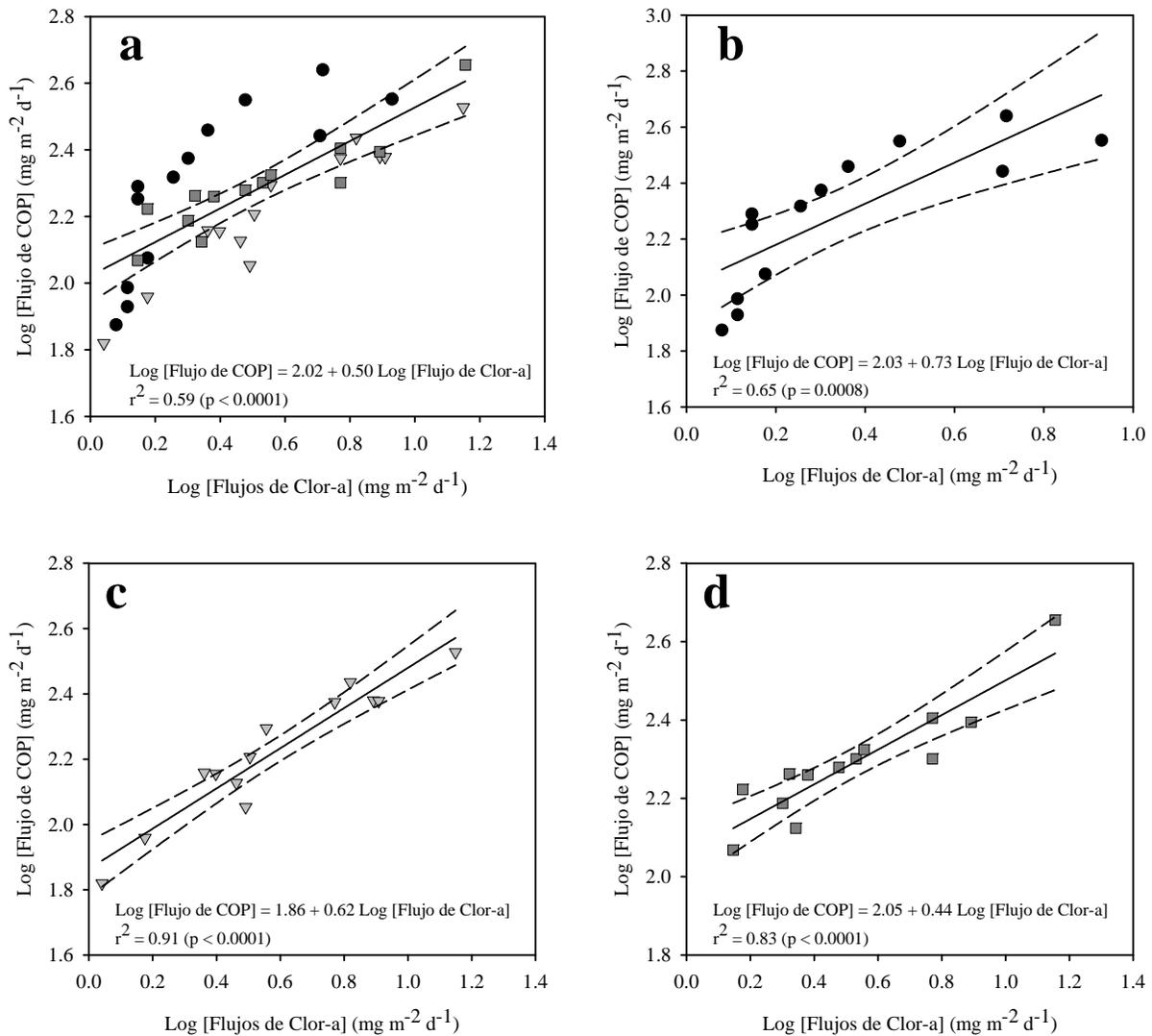


Figura 12. Correlaciones de los flujos de carbono orgánico particulado con los flujos de clorofila a con tres niveles (a), en superficie (b), en media agua (c) y fondo (d). ● superficie, ▼ media y ■ fondo.

En la trampa de superficie las células vivas contribuyeron en promedio con el $53.1 \pm 20.2 \%$, mientras que los frústulos sólo aportaron el $24.9 \pm 20 \%$. En las trampas de media y fondo, los frústulos fueron los que más contribuyeron al

material particulado ($50.5 \pm 2.7\%$ y $48.7 \pm 24.1\%$, respectivamente). Las células vivas representaron el $25.5 \pm 20.7\%$ para la trampa de media y el $28.3 \pm 24.1\%$ para la de fondo (Fig. 13).

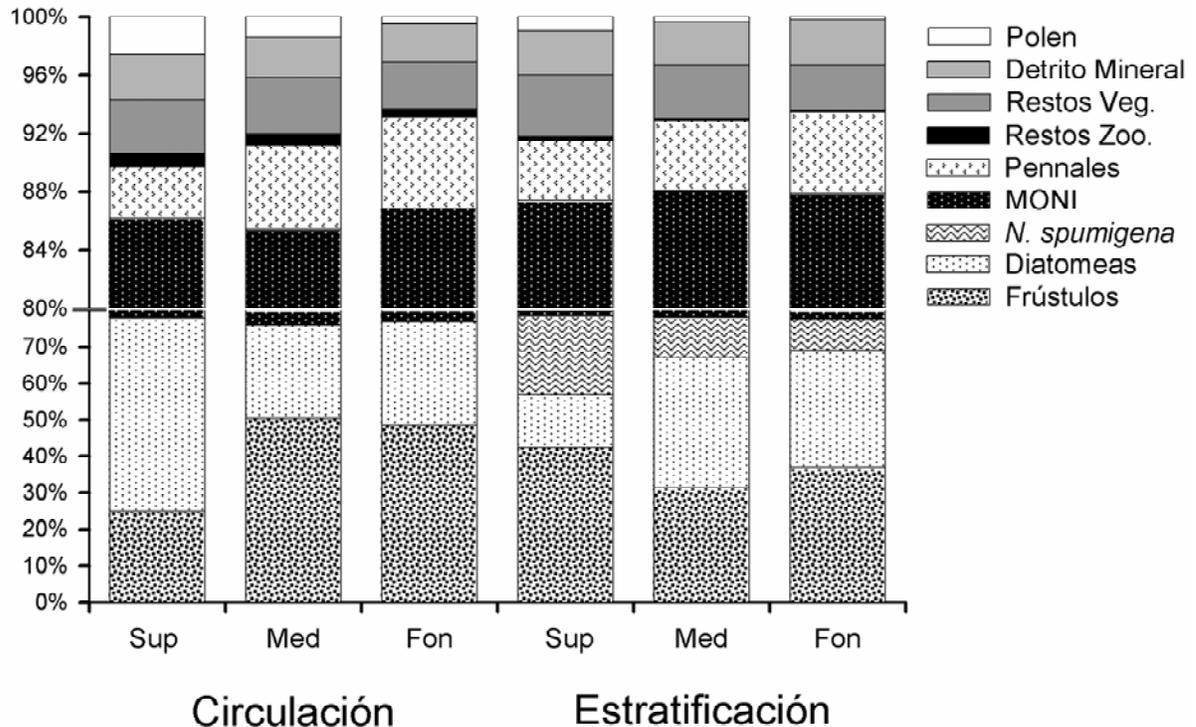


Figura 13. Composición del material particulado capturado en las trampas de superficie (Sup), media agua (Med) y fondo (fon) expresado en porcentaje relativo. MONI = materia orgánica no identificada.

Durante este periodo (circulación) también se encontraron diatomeas pennadas dentro de las trampas, sin embargo su contribución fue menor (superficie = $3.5 \pm 4.3\%$, media = $5.8 \pm 2.5\%$ y fondo = $6.3 \pm 3.4\%$). Así mismo, se observaron agregados de materia orgánica no identificada (MONI), la

cual tuvo un aporte mayor en las trampas de fondo ($9.8 \pm 6.7 \%$) y menor en la trampas de superficie ($8.2 \pm 8.5 \%$). Los restos de vegetación acuática macrofítica aportaron el $3.7 \pm 4.1 \%$ en las trampas de superficie, el $3.8 \pm 4.5 \%$ en las de media y $3.2 \pm 3.9 \%$ en las de fondo. Los restos de zooplancton (p.e. apéndices, antenas) contribuyeron con menos del 1 % en los tres niveles (Fig. 13).

El material de origen alóctono estuvo compuesto principalmente por detrito mineral y polen. Los cristales tuvieron una contribución similar en los tres niveles, con un $3.1 \pm 3.5\%$ para las trampas de superficie, $2.8 \pm 2.9 \%$ para las de media agua y $2.6 \pm 3.2 \%$ para las de fondo. El polen contribuyó más en las trampas de superficie ($2.6 \pm 2.0 \%$) y fue disminuyendo en las trampas de media ($1.4 \pm 1.7 \%$) y fondo ($0.5 \pm 1.2 \%$) (Fig. 13).

En la época de estratificación, las células vivas y los frústulos de diatomeas aportaron aproximadamente la mitad del material capturado en las trampas. En las trampas de superficie, los frústulos aportaron el $42 \pm 26 \%$, mientras que las células vivas sólo el $15 \pm 17 \%$. En las trampas de media agua y fondo la proporción fue similar tanto para los frústulos (media agua = $31 \pm 29 \%$ y fondo = $36 \pm 37 \%$) como para las células vivas de diatomeas (media agua = $37 \pm 30 \%$ y fondo = $32 \pm 37 \%$). No obstante, durante el mes de octubre se

observó el máximo aporte de células vivas (~55 %) y frústulos (~35 %) de diatomeas en las trampas de media agua y fondo producto del DCM presente durante esta época (Fig. 13).

La cianobacteria filamentosa *Nodularia cf. spumigena* también tuvo un aporte importante en la época de estratificación, siendo mayor en la trampa de superficie (22 ± 39 %) y decreciendo en las trampas de media agua (11 ± 20 %) y fondo (9 ± 13 %). Sin embargo, es importante mencionar que esta cianobacteria fue más abundante durante el florecimiento en la estratificación temprana, cuando alcanzó a contribuir con un ~36% en las trampas de superficie (Fig. 13).

También se encontraron diatomeas pennadas durante la estratificación, con una contribución similar a la del periodo de circulación (superficie = 4 ± 4 %, media = 5 ± 4 % y fondo = 6 ± 4 %). La MONI presentó la misma tendencia que en la época de circulación con menor aporte en las trampas de superficie (9 ± 8 %) y aumentando en las trampas de media (10 ± 7 %) y fondo (10 ± 8 %). El aporte de vegetación acuática macrofítica fue del 4 ± 5 % para las trampas de superficie, 4 ± 4 % para las de media y 3 ± 4 % para las de fondo. La contribución de los restos de zooplancton fue menor al 1 % en los tres niveles (Fig. 13).

Durante la estratificación, la composición del material alóctono fue igual a

la del periodo de circulación. La contribución del material detrítico fue muy similar en los tres niveles (superficie = 3 ± 4 %, media = 3 ± 3 % y fondo = 3 ± 3 %). El polen contribuyó con menos del 1 % en los tres niveles siguiendo el mismo gradiente del periodo de circulación con un mayor aporte en la superficie y menor en el fondo (Fig. 13).

La composición química del material litogénico capturado en las trampas de la columna de agua mostró una dominancia de sílice (34 %) y aluminio (8 %), no obstante también se encontraron cantidades menores de potasio, hierro, calcio y otros elementos (Tabla 2).

Trampa	Si	Al	K	Fe	Ca	Cl	Mg	S	P	Na
Agua	34	9	6	4	3	2	1	1	1	<1
Aire	32	8	5	5	4	2	1	1	1	<1

Tabla 2. Composición química promedio de la materia particulada capturada en las trampas para la columna de agua y para el aire. En el lago Alchichica. Los valores están dados en porcentaje atómico determinado por la microsonda del MEB.

7.2. TRAMPAS AÉREAS

7.2.1. FLUJO DE MATERIA TOTAL PARTICULADA AÉREA (MTPA)

El flujo promedio de la MTPA fue de $591 \pm 398 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con una variación entre 111 ± 33 y $1,211 \pm 224 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Tabla 1). La variación temporal del flujo de MTPA se caracterizó por las condiciones meteorológicas de la zona. El flujo mayor de MTPA se encontró en el mes de febrero ($1,211 \pm 224 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) durante la época fría y seca (enero a marzo), mientras que el flujo menor de MTPA se observó a finales de octubre ($111 \pm 33 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) durante la época cálida lluviosa (abril a diciembre) (Fig. 14).

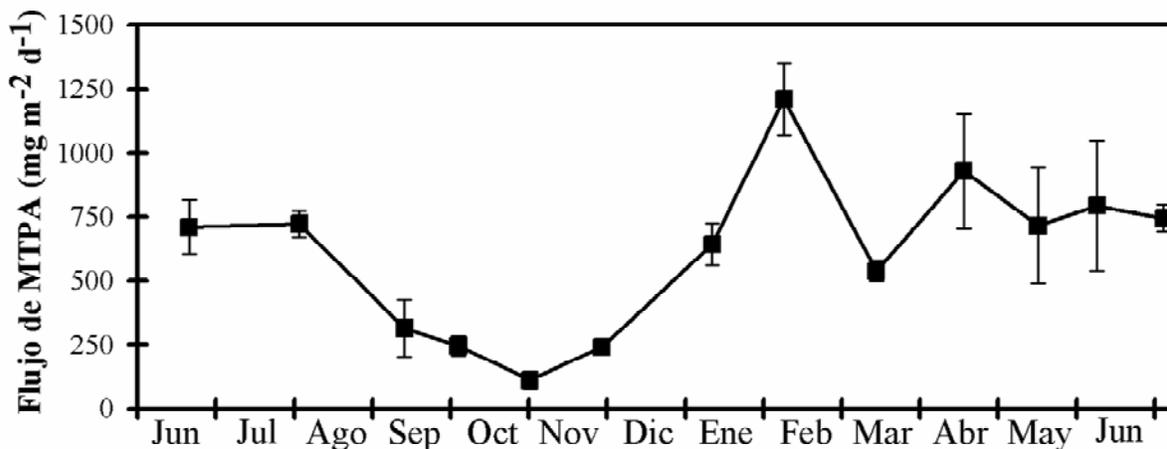


Figura 14. Variación temporal de los flujos de materia total particulada aérea en el lago Alchichica.

El total de la MTPA que se depositó durante los trece meses de muestreo fue de 240 g m^{-2} y de 218 g m^{-2} durante un año (Junio 2006 a Mayo 2007). El

depósito mayor de la MTPA se observó en la primera mitad del año, presentándose con más intensidad en el mes de febrero (32 g m^{-2}). El depósito menor se mostró en el mes de octubre con 8 g m^{-2} , siendo cuatro veces menor al registrado para febrero (Fig. 15).

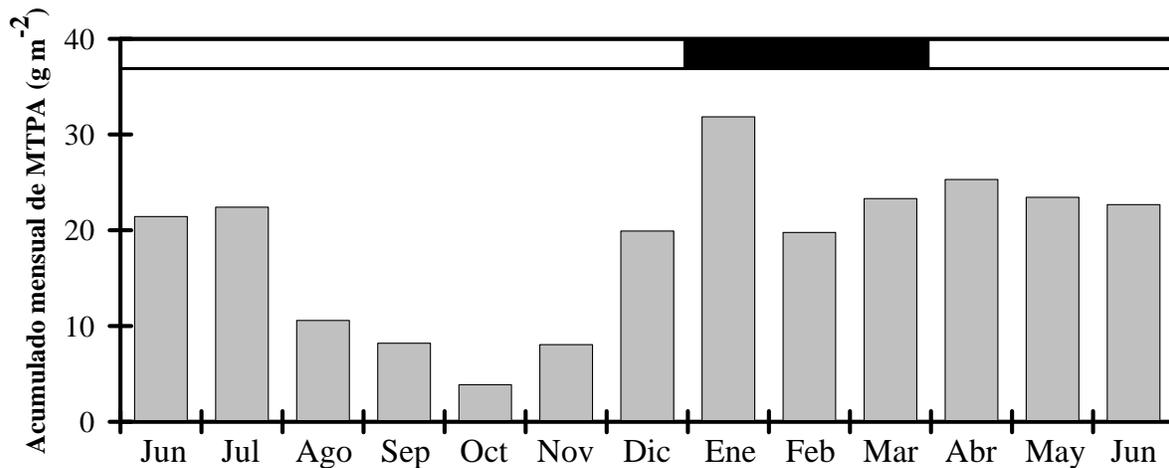


Figura 15. Materia total particulada aérea que se deposita mensualmente en la orilla del lago Alchichica. La barra negra indica la época fría y seca.

7.2.3. FLUJOS DE CARBONO TOTAL AÉREO (CTPA) Y SUS FRACCIONES (COPA Y CIPA)

El intervalo de variación de los flujos de CTPA fluctuó entre 11 ± 2 y $46 \pm 4 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con un promedio de $23 \pm 10 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, mientras que el promedio para los flujos de COPA fue de $19 \pm 9 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y su intervalo entre 7 ± 2 y $40 \pm 2 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Tabla 1). El comportamiento temporal de ambos (CTPA y COPA) fue muy similar, presentándose los flujos mayores al principio de

octubre para después mantenerse oscilando sin mostrar un patrón bien definido

(Fig. 16). El promedio de los flujos de CIP fue de $5 \pm 4 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con una

variación entre 2 ± 2 y $13 \pm 1 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, sin observarse algún patrón

específico a lo largo del tiempo de muestreo.

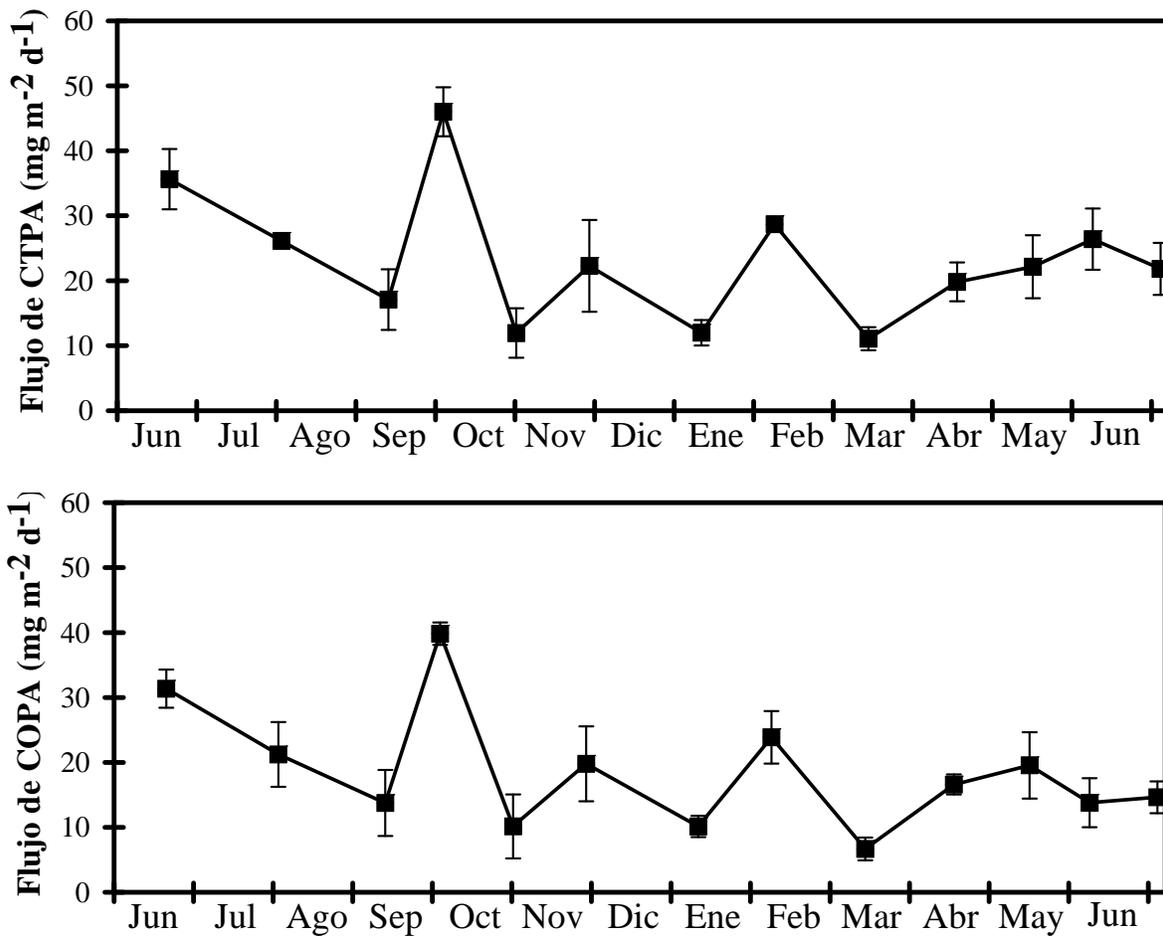


Figura 16. Variación temporal y espacial de los flujos de carbono total particulado aéreo (arriba) y de carbono orgánico particulada aéreo (abajo) en lago Alchichica.

La cantidad de COPA acumulado durante un año (junio 2006 a mayo 2007) fue de 6.2 gC m^{-2} y la de todo el periodo de estudio, de 6.8 gC m^{-2} . No se observó un patrón temporal en el depósito del COPA, presentándose el mayor flujo en el mes septiembre (1.1 gC m^{-2}) y el menor en diciembre (0.3 gC m^{-2}) (Fig. 17).

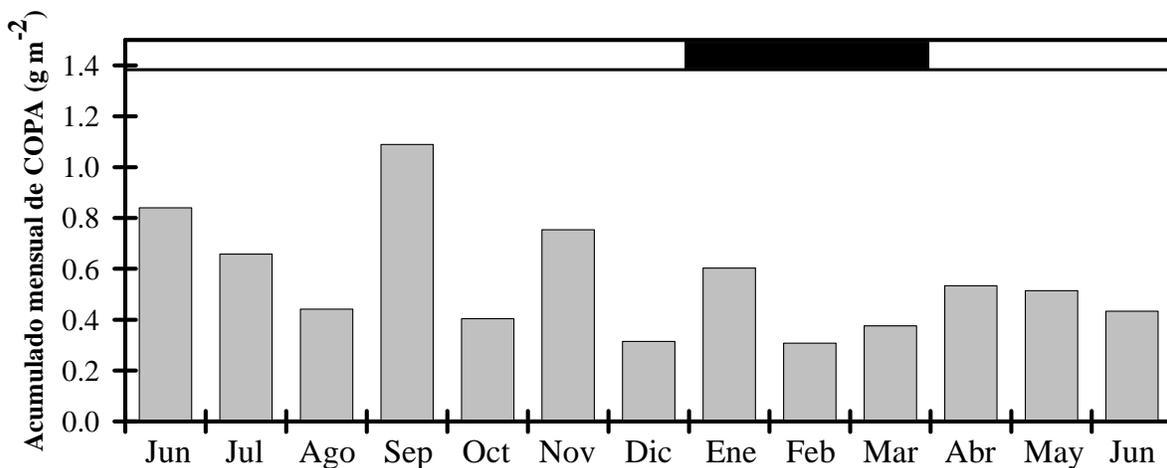


Figura 17. Carbono orgánico particulado aéreo que se deposita mensualmente en la orilla del lago Alchichica. La barra negra indica la época fría y seca.

La fracción orgánica de los flujos dominó, con un promedio anual de $79 \pm 12 \%$, mientras que la inorgánica sólo alcanzó el $21 \pm 12\%$. Temporalmente no se presentó ninguna tendencia a lo largo ciclo de muestreo, presentándose una codominancia en junio de 2007 (Fig. 18).

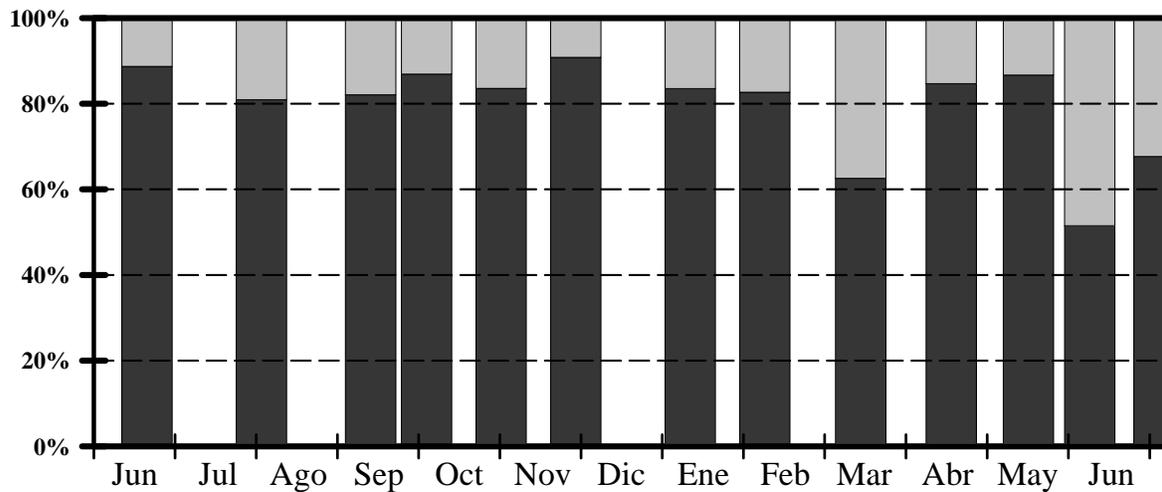


Figura 18. Variación temporal de los porcentajes de los flujos de carbono orgánico particulado aéreo (Oscuro) y carbono inorgánico particulado (Claro) en lago Alchichica.

7.2.4. TIPO DE PARTÍCULAS

El material capturado en las trampas aéreas estuvo compuesto principalmente por material litogénico ($92 \pm 17\%$) y de algunas partículas de origen biogénico, siendo el polen el más abundante (6%). La composición química del material litogénico encontrado en las trampas aéreas fue similar al capturado en las trampas de la columna de agua (Tabla 2).

8. DISCUSIÓN

Existe información escasa acerca de los flujos de MTP en lagos oligotróficos profundos; entre los que están disponibles en la literatura (Tabla 4), los flujos del lago Alchichica fueron similares o mayores a éstos. El lago Maggiore es mucho más grande (212.5 Km^2), profundo ($Z_{\text{Max}} = 372 \text{ m}$) y productivo que el lago Alchichica; sin embargo, los flujos de MTP se deben principalmente a la formación de grandes agregados ($5\text{-}250 \mu\text{m}$) constituidos tanto por materia orgánica (fitoplancton) como inorgánica (Callieri, 1997), lo que explica la similitud de los flujos entre ambos lagos. Por otro lado, el lago Mergozzo, morfológicamente comparable con el lago Alchichica ($Z_{\text{Max}} = 73\text{m}$, 1.81 km^2), está dominado por especies de fitoplancton de talla pequeña –como en la mayoría de los sistemas oligotróficos– lo que explica la presencia de flujos de MTP de menor magnitud. Los flujos de MTP encontrados en el lago Malawi son muy bajos comparados con los encontrados en el lago Alchichica. Esta diferencia se debe a que este lago es mucho más grande y profundo ($29,600 \text{ km}^2$ y $Z_{\text{Max}} = 706 \text{ m}$) y a que los muestreos se realizaron en la parte central del lago, donde la producción primaria es muy baja. A diferencia de lo expuesto para los lagos anteriores, en el lago Alchichica los flujos elevados se deben principalmente a que

la MTP está integrada en gran medida por fitoplancton y éste es predominantemente de talla grande (p.e., *Cyclotella alchichicana* ~ 50 µm), lo que facilita su rápida exportación hacia el fondo (Adame et al. 2008).

Lago	País	Estado Trófico	Flujos de MTP (mg m ⁻² d ⁻¹)	Referencia
Malawi	Este de África	Oligotrófico	10-480	Pilskaln (2004)
Mergozzo	Italia	Oligotrófico	240-1,450	Callieri et al. (1986)
Maggiore	Italia	Oligotrófico	250-2,900	Callieri (1997)
Alchichica	México	Oligotrófico	398-3,284	Este trabajo
Kinneret	Israel	Oligotrófico	1,000-13,500	Ecker et al. (2003)

Tabla 3. Rango de variación y origen de los flujos de MTP en diferentes lagos.

Por otro lado, los flujos de MTP en el lago Kinneret variaron de similares a tres veces más a los encontrados en el lago Alchichica. Los flujos similares para ambos lagos fueron relacionados con el florecimiento de fitoplancton, presentándose en lago Kinneret el dinoflagelado *Peridinium gatunense* (Viner-Mozzini et al. 2003), cuya talla también es grande (~50 µm), similar al florecimiento de diatomeas (> 35 µm) que se presenta en el lago Alchichica. Por otro lado, los flujos mayores en el lago Kinneret estuvieron relacionados con la

resuspensión de materia particulada de la zona litoral y profunda (Eckert et al. 2003).

Al respecto y de acuerdo con la teoría dinámica de los lagos de Håkanson y Jansson (2002), la resuspensión tiene relevancia en la transportación de sedimentos si la proporción dinámica varía entre 0.1 y 1.1 (valor obtenido de dividir la raíz cuadrada de la superficie en km^2 entre la profundidad media en m). Para el lago Alchichica, la proporción dinámica es de 0.04 ($\sqrt{2.3 \text{ km}^2} / 40.9 \text{ m}$), valor muy por debajo del límite de “no efecto”, lo que indica que las estimaciones de los flujos de MTP no fueron afectados por eventos de resuspensión. Por otro lado, el material encontrado en las trampas de fondo es muy similar al capturado en las trampas de la parte media, lo que ratifica que no existe resuspensión en el lago Alchichica.

Al igual que los flujos de MTP encontrados en el lago Alchichica los flujos de COP fueron similares o mayores a los encontrados en otros lagos con un estado trófico similar e incluso mayor (Tabla 4). Los flujos bajos del lago Superior se atribuyeron a que una gran parte del carbono es remineralizada en la zona eufótica y sólo 5% sedimenta hasta alcanzar el fondo del lago ($Z_{\text{MAX}} = 400 \text{ m}$) (Baker et al. 1991) debido a que el fitoplancton dominante es de talla pequeña (Sommer 1985). El intervalo inferior de los flujos de COP encontrados

Flujo de Materia Total Particulada en un Lago Monomítico Cálido

en los lagos oligotróficos Maggiore y Mergozzo (145-170 mg m⁻² d⁻¹ y 80-160 mg m⁻² d⁻¹, respectivamente) fueron similares a los encontrados en el lago Alchichica. Sin embargo, el intervalo superior de los flujos de COP encontrados en el lago Alchichica fue muy superior, alcanzando hasta 451 mg m⁻² d⁻¹.

Lago	País	Estado Trófico	Flujos de COP (mgC m⁻² d⁻¹)	Referencia
Superior	E.U.A.	Oligotrófico	60-90	Baker et al. (1991)
Mergozzo	Italia	Oligotrófico	86-170	Callieri et al. (1991)
Maggiore	Italia	Oligotrófico	32-375	Callieri (1997)
Alchichica	México	Oligotrófico	65-451	Este trabajo
Chuzenji	Japón	Oligotrófico	50-470	Fukushima et al. (1989)
Lucerne	Suiza	Mesotrófico	160-212	Bloesch et al. (1988)
Itasca	E.U.A.	Meso-eutrófico	70-469	Hicks et al. (1994)
La Concepción	España	Eutrófico	280-400	Galvez y Niell (1992)

Tabla 4. Rango de variación y origen de los flujos de COP en diferentes lagos.

Como ya se mencionó, el lago Maggiore es mucho más grande y profundo que el lago Alchichica, sin embargo, la exportación del COP hacia el fondo se da principalmente a través de agregados de gran tamaño (5-250 µm), formados de fitoplancton de talla pequeña (< 2 µm, Callieri 1997).

Por otro lado, la comparación entre los lagos Alchichica y Mergozzo

muestra la importancia de la talla del fitoplancton en la magnitud de las tasas de exportación de COP. Como se señaló anteriormente, ambos lagos son oligotróficos y de dimensiones similares, pero difieren en la talla del fitoplancton dominante, la pequeña ($< 2 \mu\text{m}$) en Mergozzo y la grande en Alchichica ($> 2 \mu\text{m}$). Los flujos de COP máximos medidos en Mergozzo son aproximadamente la mitad de los del lago Alchichica. Incluso Callieri et al. (1991) explican estos valores que consideran “elevados” como el resultado de que el fitoplancton forma agregados ($> 10 \mu\text{m}$), lo cual incrementa la tasa de exportación de COP.

En el lago Chuzenji el intervalo de los flujos de COP fue similar al encontrado en el lago Alchichica (Tabla 4); sin embargo, los flujos mayores presentes en el primero fueron atribuidos a la resuspensión de sedimento provocado por la entrada de una gran cantidad de agua por los ríos (Fukushima et al. 1989). Lo anterior difiere de lo que ocurre en el lago Alchichica, ya que los flujos altos de COP -como ya se mencionó- son consecuencia del predominio del fitoplancton de talla grande (Adame et al. 2008) y no por eventos de resuspensión.

Los flujos de COP en el lago Alchichica fueron similares e incluso mayores a los encontrados en lagos mesotróficos y eutróficos (Tabla 4); sin embargo, los flujos elevados en los lagos Lucerne, Itasca y La Concepción se deben

principalmente a la sedimentación de biomasa fitoplanctónica en exceso producida en la zona eufótica.

Con base en la comparación anterior, se acepta la primera hipótesis que plantea que el predominio de fitoplancton de talla grande está relacionado con el mayor flujo de MTP y COP del lago Alchichica y por lo tanto serían mayores a los encontrados en otros lagos oligotróficos, donde prevalece el fitoplancton de talla pequeña. Este hallazgo pone de manifiesto la relevancia de considerar la talla del fitoplancton dominante cuando se trata de evaluar el papel de los cuerpos acuáticos epicontinentales y probablemente de los cuerpos marinos y costeros también como sumideros de carbono.

Los flujos MTP tuvieron un comportamiento temporal muy similar al de los flujos de CTP y COP, lo cual se robustece con las elevadas r^2 encontradas en las correlaciones hechas entre estas variables (Fig. 1 2). La mayor correlación registrada fuerte entre el CTP y COP (Fig. 1 1 a) indica que la mayor parte del carbono particulado presente en el lago es de origen biogénico. Por lo anterior, la discusión de la variación temporal y vertical de los flujos de CTP y COP se realizó con base a los flujos de COP.

El comportamiento temporal de los flujos de MTP y COP está relacionado principalmente con los florecimientos de fitoplancton que se presentan

regularmente en el lago, los cuales a su vez están controlados por la hidrodinámica del mismo.

Los mayores flujos de MTP y COP se presentaron en el periodo de circulación, justo después de comenzar el florecimiento de diatomeas. De acuerdo con Adame et al. (2008), la biomasa fitoplanctónica del lago Alchichica está dominada por la talla grande ($> 2 \mu\text{m}$) la cual preferencialmente sedimenta hacia el fondo. Lo anterior explica la presencia predominante de diatomeas (75%) y sus frústulos (principalmente *C. alchichicana*) en las trampas de fondo.

La diatomea *C. alchichicana* ($\sim 50 \mu\text{m}$) tiene una velocidad de sedimentación teórica de 3.8 m d^{-1} (Alcocer et al. 2008); sin embargo, Ptacnik et al. (2003) han encontrado que la velocidad de sedimentación de las diatomeas disminuye con la turbulencia presente en una columna de agua bien mezclada. De acuerdo a lo anterior, el efecto del florecimiento de diatomeas en el lago Alchichica tardaría más tiempo (~ 2 meses) en verse reflejado en las trampas de fondo y no en el mes inmediato al florecimiento. Esta discrepancia puede ser explicada por la formación de agregados, ya que este proceso aumenta la velocidad de sedimentación ($> 100 \text{ m d}^{-1}$) y ha sido documentada durante los florecimientos de diatomeas tanto en sistemas marinos (Alldredge y Gotshalk 1990, Scharek et al. 1999) como epicontinentales (Grossart et al.

1997, Grossart et al. 1998, Yacobi y Ostrovsky 2008). A pesar que en el lago Alchichica no se ha observado la formación de agregados *in situ*, dentro de las trampas hay evidencia de que éstos pueden formarse (Fig. 19).



Figura 19. Formación de agregados en las trampas media agua (derecha) y fondo (izquierda) posterior al florecimiento de diatomeas en lago Alchichica.

Después del florecimiento de *Nodularia cf. spumigena* (estratificación temprana), los flujos mayores de MTP se presentaron en las trampas de superficie y media agua; sin embargo, los flujos mayores de COP sólo se presentaron en la trampa de superficie (Figs. 3 y 6b). Los flujos tanto de MTP y COP en la trampa de superficie están relacionados directamente con la presencia de *N. spumigena*. Por otro lado, los flujos de la trampa de media agua no sólo están compuestos de *N. cf. spumigena* sino también de diatomeas las cuales incrementan la MTP con sus frústulos y en menor medida se ve reflejado en el COP.

A diferencia de las diatomeas que sedimentan rápidamente al fondo, *N. cf. spumigena*, al igual que otras cianobacterias, presentan aerotopos que les permiten flotar y permanecer cerca de la superficie (Bianchi et al. 2002) disminuyendo y retrasando su exportación al fondo. La cantidad de COP colectada en las trampas de superficie fue del doble ($436 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) de las del fondo ($210 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), lo que indica que sólo la mitad del COP generado en la capa superficial llegó al fondo.

En la capa superficial, la mayoría de la biomasa generada por las *N. cf. spumigena* probablemente está siendo transportada por el viento hacia la orilla del lago. En el lago Pirámide (Estados Unidos) se ha observado que cambios de la velocidad y dirección del viento controlan la distribución horizontal de *N. cf. spumigena*, generando acúmulos en la orilla (Horne y Galat 1985). La acumulación de las cianobacterias se incrementa con la flotabilidad de las células, como lo encontraron Schernewski et al. (2005) en el lago Belau, Alemania. En el lago Alchichica, el transporte de *N. cf. spumigena* es principalmente horizontal y en menor medida vertical; donde el mayor flujo se reconoció en la capa de mezcla. Lo anterior explica el flujo más alto de MTP en las trampas de superficie y media para el caso de la MTP y en las trampas de superficie para el COP.

Los flujos mayores de MTP y COP presentes en las trampas de media y fondo al final del periodo de la estratificación establecida e inicios de la tardía están relacionados con el DCM que se forma en el metalimnion. Durante este periodo, los flujos de Clor-a en las trampas de superficie fueron los más bajos de toda la época de muestreo (Fig. 9). Lo anterior sugiere una concentración baja de Clor-a en la capa de mezcla, lo cual concuerda con lo encontrado por Adame et al. (2008) para esta época del año. Por lo tanto, la mayor parte de la producción de fitoplancton compuesto principalmente por la diatomea *C. alchichicana* se desarrolla en el DCM durante este periodo.

Durante el periodo de estratificación y particularmente cuando se desarrolla el DCM, la densidad del zooplancton es muy baja y está representada por rotíferos pequeños (*Brachionus plicatilis* y *Hexarthra jenkiniae*, Lugo et al. 1999), incapaces de consumir a *C. alchichicana*. Lo anterior implica que el DCM en el lago Alchichica es un máximo profundo de clorofila real y no un “mínimo epilimnético de clorofila” producido por herbivoría del zooplancton en la capa de mezcla, como lo encontraron Pilaty y Wurtsbaugh (2003) en el lago Yellow Belly.

La variación temporal se resume en la figura 20, donde se observa que, los flujos mayores de MTP y COP se presentaron en las trampas de fondo durante el florecimiento de diatomeas y en las trampas de superficie en el florecimiento de

N. cf. spumigena. Adicionalmente los flujos también se incrementaron cuando se presentó el DCM. Estos resultados permiten aceptar la segunda hipótesis del estudio, que menciona que los mayores flujos de MTP y COP se presentan durante el florecimiento invernal de diatomeas y primaveral de cianobacterias.

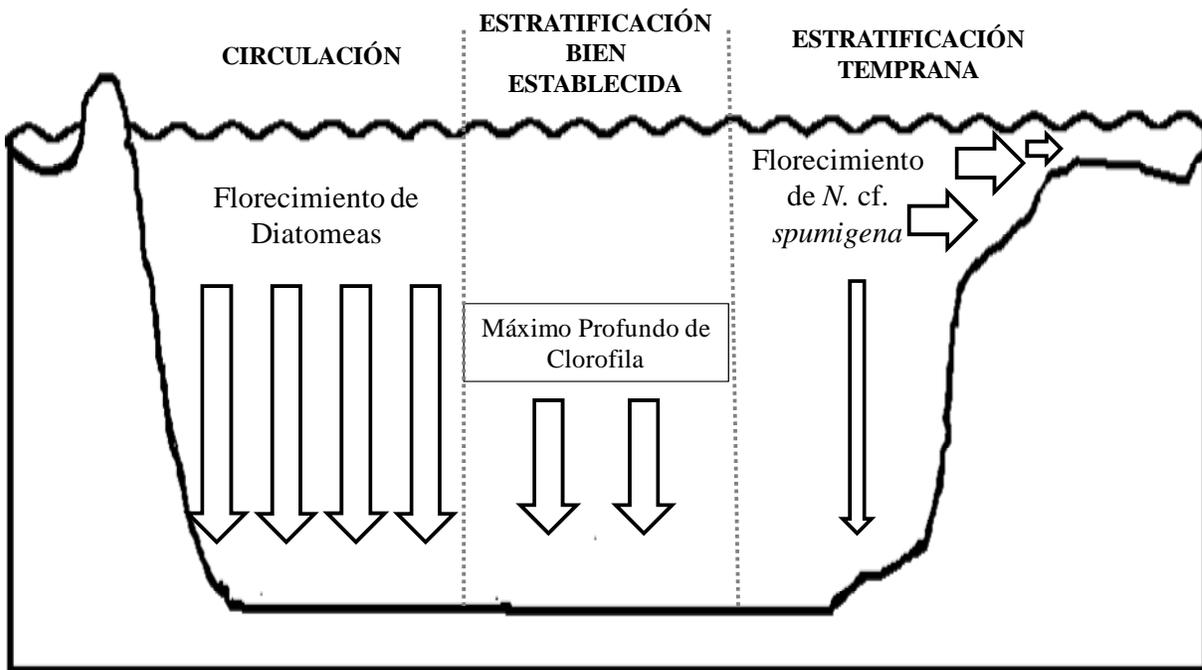


Figura 20. Resumen esquemático de la variación temporal de la MTP y COP en el lago Alchichica. El número y grosor de las flechas indica la intensidad y dirección de la exportación.

Por otro lado, la tercera hipótesis señala que los flujos de MTP y COP en el epilimnion son mayores a los del hipolimnion durante la estratificación temprana (florecimiento de *N. cf. spumigena*) ya que lo mayores flujos de MTP y COP se presentaron en el epilimnion. Mientras que en la estratificación bien establecida

y tardía se rechaza, ya que los flujos mayores se encontraron en las trampas de media agua y fondo.

El dominio de la MIP sobre la MOP encontrado para el lago Alchichica ha sido registrado para otros cuerpos acuáticos. En algunos de ellos, este dominio está relacionado con la resuspensión de sedimentos (p.e. Gálvez y Neill 1992, Weyhenmeyer 1996). En otros lagos se asocia con el material transportado por los ríos (p.e. Koren y Klein 2000). En otros más el dominio de la MIP se ha relacionado con material inorgánico de origen biogénico. Koren y Klein (2000) encontraron que durante el florecimiento de *Peridinium gatunense* en la parte central del lago Kinneret, la mayor parte del material sedimentado consistió en carbonato de calcio proveniente de las tecas de este dinoflagelado. Ninguna de estas causales explican la predominancia de la MIP en el lago Alchichica.

Sin embargo, en los lagos Maggiore y Mergozzo se encontró algo similar a Alchichica. El material inorgánico está constituido principalmente por frústulos de diatomeas (Callieri et al 1991, Callieri 1997) que en el caso del lago Alchichica alcanzaron más del 80 % durante la circulación y más del 60 % en la estratificación, mientras que el material litogénico fue menor al 3 % en ambos periodos.

Por lo tanto la hipótesis 4 se rechaza ya que la MOP no tuvo un mayor

aporte a los flujos de MTP, sino al contrario el mayor aporte fue de la fracción inorgánica. Sin embargo, es importante resaltar que esta materia inorgánica tiene un origen biogénico y no litogénico, el cual se incrementa durante los florecimientos de fitoplancton presentes en el lago Alchichica. Asimismo, se rechaza la hipótesis 5 debido a que la contribución de la MOP disminuyó y la de la MIP aumento durante los florecimientos de fitoplancton.

Los flujos de MTPA en el lago Alchichica fueron similares a los observados en otras zonas áridas y semiáridas, excepto en el caso del lago Kinneret (Tabla 5). Los grandes flujos de MTPA en el lago Kinneret están relacionados con entradas irregulares de material particulado proveniente de las tormentas de arena del Sahara (Ganor et al. 2003), mientras que los menores flujos de MTPA en los otros sitios tienen influencia de las fuentes locales de polvo. De acuerdo con la información previa se acepta la hipótesis 6, ya que los flujos de MTPA son similares a los encontrados en otras regiones áridas y semiáridas.

Las zonas áridas y semiáridas tienen terrenos agrícolas amplios que permanecen sin vegetación después de la cosecha y por lo tanto, son fuente potencial para la formación de tormentas de arena y torbellinos. Dentro de la cuenca Oriental se localizan dos lagos playa (Fig. 1) que están cubiertos por depósitos de arcillas y sin cobertura vegetal, lo que los convierte en la fuente

principal de polvo en el área y el lugar idóneo para la formación de tormentas de arena y torbellinos. La composición química de partículas capturadas en las trampas aéreas es similar al del tipo de suelos encontrado en el lago playa del desierto de Mojave, Estados Unidos (Reynolds et al. 2007), un lugar con condiciones comparables a la de la cuenca Oriental.

Región	País	Clima	Flujos de MTPA (mg m ⁻² d ⁻¹)	Referencia
Creta	Grecia	Árido	0.15	Pye (1992)
Desierto de Negev	Israel	Árido	0.57	Offer y Goossens (2001)
Lago Alchichica	México	Semiárido	0.60	Este trabajo
Lago Takapo	Nueva Zelanda	Semiárido	0.71	McGowan et al. (1996)
Lago Kinneret	Israel	Semiárido	2.36*	Ganor et al. (2003)

Tabla 5. Rango de variación y origen de los flujos de MTPA en diferentes regiones. * Influenciado por tormentas de arena del Sahara.

La magnitud de los vientos presentes en las planicies de los lagos playa (> 7 m s⁻¹) puede considerarse lo suficientemente fuerte para levantar el polvo, y así favorecer su transporte por la presencia de torbellinos (McGowan et al. 1996 y Brazel 1989). Procesos similares se han descrito previamente para otras regiones áridas y semiáridas (p.e., lago Ebinur, China, Bao et al. 2006; lagos playa, desierto de Mojave, Estados Unidos, Reynolds et al. 2007).

Durante la temporada fría-seca (enero-marzo), los vientos fuertes vienen del oeste suroeste y del oeste y soplan frecuentemente a través del lago playa Totolcingo, dirigiéndose y transportando una gran cantidad de polvo y fertilizantes naturales (p.e., cenizas volcánicas ricas en fósforo) hacia el lago Alchichica. Adicionalmente, las tierras de cultivo que rodean al lago permanecen descubiertas durante este periodo, convirtiéndose en otra fuente de partículas y contaminantes (p.e., herbicidas, insecticidas).

En la temporada cálida-lluviosa (abril-diciembre), los vientos fuertes provienen del noreste, nor noreste, lejos de Tepeyahualco, la otra fuente potencial de polvo. Por lo tanto, durante esta época los flujos de MTPA se mantuvieron bajos. Además, antes de que sea tiempo de cosechar (mayo-noviembre) los campos de agricultura permanecen cubiertos por los cultivos evitando su erosión.

Conforme a lo anterior, se acepta parcialmente la hipótesis 7, ya que los flujos mayores de MTPA se presentaron durante la época fría-seca, pero no asociados a la presencia de vientos fuertes ya que éstos se presentaron durante todo el año. Es importante resaltar que no sólo basta con que se presenten vientos fuertes para transportar materia particulada alóctona hacia el lago, sino que además éstos deben pasar a través de un sitio que constituya la

fuerza de aprovisionamiento de material particulado.

El origen de las partículas que sedimentan en el fondo del lago es principalmente autóctono. Lo anterior se ratifica a través de la correlación entre los flujos de MTP y Clor-a (Fig. 10c) que muestra que la materia particulada que se sedimenta es eminentemente de origen biogénico. Existe correlación entre los flujos de COP y Clor-a (Fig. 12) indicando que ambos flujos tienen un comportamiento temporal parecido y que el COP proviene principalmente de la biomasa del fitoplancton. Por otro lado, el COP alóctono sólo representa el 9 % del COP que sedimenta dentro del lago, lo que ratifica que la mayor parte del COP es producido dentro del lago.

Adicionalmente, el análisis microscópico de los constituyentes del material capturado en las trampas ratificó que la mayor parte es de origen autóctono, constituido principalmente por fitoplancton incluyendo los frústulos de las diatomeas (~ 90 %) y en menor medida, por material alóctono. El dominio de material particulado de origen autóctono derivado de la producción primaria ha sido reportado para otros lagos (p.e., Fukushima et al. 1989, Jellison et al. 1996, Weyhenmeyer et al. 1997).

Con base en lo anterior se acepta la hipótesis 8, ya que la mayor parte de la materia que se sedimentó en el lago se produjo en la columna de agua y tan

sólo una proporción menor es de origen alóctono.

En el presente estudio se intentó caracterizar con detalle los procesos locales y estacionales que controlan los flujos de MTP y, por ende, del flujo de carbono entre la superficie del lago y las capas profundas. Esta información es importante para poder realizar un balance preciso de carbono en los lagos tropicales. Los sistemas epicontinentales han sido identificados como un almacén importante de carbono a través de un incremento en la producción primaria y, consecuentemente, en la biomasa, así como una descomposición reducida del material exportado hacia el fondo (Gerharde et al. 2001, Cole et al. 2007). Lo anterior implica una acumulación de carbono que puede transformarse en COP secuestrado en los sedimentos, lo cual eventualmente reduce el CO₂ libre y por lo tanto contribuye al amortiguamiento del cambio climático (Finlayson y D'Cruz 2005). Debido a que las partículas del seston en el lago Alchichica están constituidas primordialmente por fitoplancton de talla grande, la principal ruta que sigue la materia particulada en la exportación hacia el fondo del lago y podría ser considerado por ello como un sitio de secuestro neto (sumidero) de carbono orgánico.

9. CONCLUSIONES

Los flujos de MTP y COP encontrados en el lago Alchichica (MTP = de 398 ± 90 a $3,284 \pm 109 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, COP = de 74 ± 5 a $451 \pm 7 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) fueron mayores a los reportados para otros lagos con condiciones tróficas similares (oligotóficos) e incluso de mayor nivel trófico.

Los flujos mayores de MTP y COP se presentaron en las trampas de fondo durante el florecimiento de diatomeas (principalmente *C. alchichicana*) y en las trampas de superficie en el florecimiento de *N. spumigena*. Adicionalmente se observó un incremento de ambos flujos (MTP y COP) en las trampas de media y fondo cuando se presentó el DCM.

Los flujos de MTP y COP en el epilimnion son mayores a los del hipolimnion durante la estratificación temprana asociados al florecimiento de *N. spumigena*. Para la estratificación bien establecida y tardía los flujos mayores de MTP y COP se encontraron en las trampas de media y fondo respondiendo a la presencia del DCM.

La fracción inorgánica constituyó el aporte mayor ($61 \pm 12\%$) a los flujos de MTP; la MOP tuvo un aporte menor ($39 \pm 12\%$). No obstante, es importante recalcar que la materia inorgánica identificada está constituida por frústulos de

diatomeas, cuyo origen es esencialmente biogénico y no de origen litogénico.

Asimismo, el aporte de MIP se incrementa durante los florecimientos de diatomeas en el lago Alchichica.

Los flujos de MTPA que se depositan en la orilla del lago Alchichica (de 11 ± 2 a $46 \pm 4 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) fueron similares a los observados en otras zonas áridas y semiáridas influenciados por fuentes locales de polvo.

Los flujos mayores de MTPA se presentaron durante la época fría-seca, pero no asociados a la presencia de vientos fuertes, ya que éstos se presentaron durante todo el año, sino principalmente con la dirección de los mismos asociada a la topografía de la cuenca. Es importante resaltar que no sólo basta con que se presentes vientos fuertes para transportar materia particulada alóctona hacia el lago, sino que, además, éstos deben atravesar un sitio que constituya una fuente de suministro de material particulado.

Del total de la MTP que sedimenta al fondo del lago Alchichica, la mayor parte se produjo en la columna de agua a través de la producción primaria y tan sólo una proporción menor es de origen alóctono. El aporte del COP alóctono es de sólo el 9 % del COP que sedimenta dentro del lago, indicando que la mayor parte del COP está producido dentro del lago.

La ruta principal del fitoplancton en el lago Alchichica es la exportación

hacia el fondo debido a que está constituido primordialmente por tallas grandes.

Por lo tanto, el lago Alchichica podría ser considerado como un sitio de

secuestro neto (sumidero) de carbono orgánico y, por lo tanto coadyuva -aun a

tan pequeña escala- a regular el clima.

10. LITERATURA CITADA

Adame F, Alcocer J y Escobar E. 2008. *Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. Freshwater Biology* 53: 22-31. DOI: 10.1111/j.1365-2427.01864.x.

Alcocer J, Escobar E y Oseguera LA. 2008. *Acoplamiento pelágico-bentónico: respuesta de la zona bentónica profunda a la sedimentación del florecimiento invernal de diatomeas en el lago oligotrófico Alchichica, Puebla, México Hidrobiológica* 18: 115-122

Alcocer J, Lugo A, Escobar E, Sánchez MR y Vilaclara G. 2000. *Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, Mexico. Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 27: 3166-3169.

Allredge AL y Gotschalk C. 1988. *In situ settling of marine snow. Limnology and Oceanography* 33: 339-351

- Allredge AL, Granata TC, Gotshalk CC y Dickey TD 1990. The physical strength of marine snow and its implications for particle disaggregation in the ocean. *Limnology and Oceanography* 35: 1415-1428
- Allredge AL, y Gotschalk CC. 1990. The relative contribution of marine snow of diatom blooms: characteristics, settling velocities and formation of diatom aggregates. *Continental Shelf Research* 10:1-58
- Anon. 1982. Standard method for collection and analysis of dustfall (Settleable Particulates), ASTM D-1739-82, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 11.03. American Society for Testing Materials. Philadelphia
- Antenucci JP y Imberger J. 2003. The seasonal evolution of wind/internal wave resonance in Lake Kinneret. *Limnology and Oceanography* 48: 2055-2061
- Arar EJ y Collins GB. 1997. Method 445.O. In vitro determination of chlorophyll a and pheophytin a in marine and freshwater algae by fluorescence. U.S. Environmental Protection Agency.

- Baker JE, Eisenreich SJ y Eadie BJ. 1991. Sediment trap fluxes, and benthic recycling of organic carbon, polycyclic aromatic hydrocarbons, and polychlorobiphenyl congeners in Lake Superior. *Environmental Science & Technology* 25: 500-509
- Bao A, Mu G, Zhang Y, Feng X, Chang C y Yin X. 2006. Estimation of the rational water area for controlling wind erosion in the dried-up basin of the Ebinur Lake and its effect detection. *Chinese Science Bulletin* 51: 68-74. DOI: 10.1007/s11434-006-8209-9
- Bianchi TS, Rolff C, Widbom B y Elmgren R. 2002. Phytoplankton pigments in Baltic sea seston and sediments: seasonal variability, fluxes, and transformations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 55: 369-383
- Bloesch J, Bossard P, Bührer H, Bürgi HR y Uehlinger U. 1988. Can results from limnocorral experiments be transferred to *in situ* conditions? *Hydrobiologia* 159: 297-308
- Bloesch J y Bürgi HR. 1989. Changes in phytoplankton and zooplankton biomass and composition reflected by sedimentation. *Limnology and Oceanography* 34: 1048-1061

- Brandon RA, Maruska EJ y Rumph WT. 1981. A new species of neotenic *Ambystima* (Amphibia, Caudata) endemic to Laguna Alchichica, Puebla, Mexico. *Bulletin Southern California Academic of Science* 80: 112-125
- Brazel AJ. 1989. Dust and climate in the American southwest, pp 65-95 In: Leinen M y Sarnthein M (eds). *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*. Kluwer
- Callieri C, Bertoni C, De Marco C y Contesini M. 1991. Settling flux and sinking velocity of seston in Lago Di Mergozzo (Northern Italy) and influence of microbial activity on the decomposition of entrapped organic material. *Hydrobiologia* 213: 155-165
- Callieri C, Bertoni R y Contesini M. 1986. Settling rates of particulate matter in lago di Mergozzo (Northern, Italy). *Memorie dell' Istituto Italiano di Idrobiologia* 44: 147-164
- Callieri C. 1997. Sedimentation and aggregate dynamics in lake Maggiore, a large deep lake in Northern Italy. *Memorie dell' Istituto Italiano di Idrobiologia* 56: 37-50

- Cole JJ, Prairie YT, Caraco NF, McDowell WH, Tranvik LJ, Striegl RG, Duarte CM, Kortelainen P, Downing JA, Middelburg JJ y Melack J. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* 10: 171-184. DOI: 10.1007/s10021-006-9013-8
- Chung Y, Chang HC y Hung GW. 2004. Particulate flux and ^{210}Pb determined on the sediment trap and core samples from the Northern South China Sea. *Continental Shelf Research* 24: 673-691
- Dagg MJ, Urban-Rich J y Peterson JO. 2003. The potential contribution of fecal pellets from large copepods to the flux of biogenic silica and particulate organic carbon in the Antarctic Polar Front region near 170°W . *Deep-Sea Research II* 50: 675-691.
- De Buen F. 1945: Investigaciones sobre ictiología mexicana. I. Atherinidae de aguas continentales de México. *Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma México* 16: 475-532
- Devol AH y Hartnett HE. 2001. Role of the oxygen-deficient zone in transfer of organic carbon to the deep ocean. *Limnology and Oceanography* 46: 1684-1690
-

Doyon P, Klein B, Ingram RG, Legendre L, Tremblay JÉ y Therriault JC. 2000.

Influence of wind mixing and upper-layer stratification on phytoplankton biomass in the Gulf of St. Lawrence. *Deep-Sea Research II* 47:415-433

Eckert W, Didenko J, Uri E y Eldar D. 2003. Spatial and temporal variability of

particulate phosphorus fractions in seston and sediments of Lake

Kinneret under changing loading scenario. *Hydrobiologia* 494: 223-229

Effler S, Brooks CMM y Driscoll CT. 2001. Changes in deposition of

phytoplankton constituents in a Ca^{2+} polluted lake. *Environmental science*

& technology 35: 3082-3088

Evans RD. 1994. Empirical evidence of the importance of sediment

resuspension in lakes. *Hydrobiologia* 284: 5-12.

Ferrante JG y Parker JI. 1977. Transport of diatom frustules by copepod fecal

pellets to the sediments of Lake Michigan. *Limnology and Oceanography*

22: 92-98.

Filonov A y Alcocer J. 2002. Internal waves in a tropical crater lake: Alchichica,

Central Mexico. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische*

und angewandte Limnologie 28: 1857-1860.

- Filonov A, Tereshchenko I y Alcocer J. 2006. Dynamic response to mountain breeze circulation in Alchichica, a crater lake in Mexico. *Geophysical Research Letters* 33:L07404. DOI: 10.1029/2006gl025901
- Finlayson CM y D'Cruz. 2005. Inland water systems, Chapter 20. pp. 553-583. In Hassan R, Scholes R y Neville A (eds) *Ecosystems and human well-being: current state and trends*, Vol. 1. Findings of the condition and trends working group of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press.
- Fukushima T, Aizaki M y Muraoka K. 1989. Characteristics of settling matter and its role in nutrient cycles in a deep oligotrophic lake. *Hydrobiologia* 176/177: 279-295
- Gálvez JA y Niell FX. 1992. Sediment resuspension in a monomictic eutrophic reservoir. *Hydrobiologia* 235/236: 133-141
- Ganor E, Foner HA, y Gravenhorst G. 2003. The amount and nature of the dustfall on Lake Kinneret (the sea of Galille), Israel: flux and fractionation. *Atmospheric Environment* 37: 4301-4315. DOI: 10.1016/S1352-2310(03)000455-2

Gasca DA. 1981. *Algunas notas de la génesis de los lagos-cráter de la Cuenca de Oriental. Puebla-Tlaxcala-Veracruz. Colección Científica Prehistoria No. 98. Instituto Nacional de Antropología e Historia de México. México. 55pp.*

Gerharde E, Yan J y Hinderer M. 2001. *Atmospheric carbon burial in modern lake basins and its significance for the global carbon budget. Global and Planetary Change 30: 167-195*

Grossart HP, Simon M y Logan BE. 1997. *Formation of macroscopic organic aggregates (lake snow) in a large lake: the significance of transparent exopoly-saccharide particles (TEP), phyto- and zooplankton. Limnology and Oceanography 42: 1651-1659*

Grossart, HP, Berman T, Simon M, y Pohlmann K. 1998. *Occurrence and microbial dynamics of macroscopic organic aggregates (lake snow) in Lake Kinneret, Israel, in fall. Aquatic Microbial Ecology 14: 59-67. DOI: 10.3354/ame014059*

Håkanson L y Jansson M. 2002. *Principles of Lake Sedimentology. Blackburn Press. Caldwell. 332 pp*

- Hernández MC, Escobar E y Alcocer J. 2010. *Ensamble de crustáceos bentónicos en un lago salino tropical. Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 5133-5140
- Hicks RE, Owen CJ y Aas P. 1994. *Deposition, resuspension, and decomposition of particulate organic matter in the sediments of Lake Itasca, Minnesota, USA. Hydrobiologia* 284: 79-91
- Honjo S. 1997. *Catching the rain: Sediment trap technology. Oceanus* 40: 8-9.
- Horne AJ y Galat DL. 1985. *Nitrogen fixation in an oligotrophic, saline desert lake: Pyramid Lake, Nevada. Limnology and Oceanography* 30: 1229-1239
- Ittekkot V, Schäfer P, Honjo S y Depetris PJ. 1996. *Particle Flux in the Ocean. John Wiley y Sons Ltd.*
- Jellison R y Melack JM. 2001. *Nitrogen limitation and particulate elemental ratios of seston in hypersaline Mono Lake, California, U.S.A. Hydrobiologia* 466: 1-12

Jellison R, Anderson RF, Melack JM y Heil D. 1996. Organic matter accumulation in sediments of hypersaline Mono Lake during a period of changing salinity. *Limnology and Oceanography* 41: 1539-1544

Jickells TD, An ZS, Andersen KK, Baker AR, Bergametti G, Brooks N, Cao JJ, Boyd PW, Duce RA, Hunter KA, Kawahata H, Kubilay N, laRoche J, Liss PS, Mahowald N, Prospero JM, Ridgwell AJ, Tegen I y Torres R. 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science* 308: 67-71.

Karl DM y miembros del grupo de trabajo. 1991a. Major bioelements. 33-42 pp. In: *Marine particles: Analysis and characterization* (Eds.) Hurd DC y Spencer DW. *Geophysical Monograph* 63. American Geophysical Union, Washington.

Karl DM, Hebel DV y Winn C. 1991b. Procedures for particulate carbon, nitrogen, phosphorus and total mass analysis used in the US-JGOFs Hawaii ocean time-series program. 71-77 pp In: *Marine particles: Analysis and characterization* (Eds.) Hurd DC y Spencer DW. *Geophysical Monograph* 63. American Geophysical Union, Washington.

- Kempe S y Schaumburg M. 1996. Vertical particle flux in lake Baikal. pp 325-345. In: Ittekkot V, Schäfer P, Honjo S y Depetris PJ(eds) Particle Flux in the Ocean. John Wiley y Sons.
- Koren N y Klein M. 2000. Rate of sedimentation in lake Kinneret, Israel: spatial and temporal variations. *Earth Surface Processes and Landforms* 25: 895-904
- Lee C, Wakeham SG y Hedges JI. 1988. The measurement by oceanic particle flux - Are "swimmers" a problem? *Oceanography* 1: 34-36
- Legendre L y Michaud J. 1998. Flux of biogenic carbon in oceans: size-dependent regulation by pelagic food webs. *Marine Ecology Progress Series* 164: 1-11
- Legendre L y Rivkin RB. 2002. Fluxes of carbon in the upper ocean: regulation by food-web control nodes. *Marine Ecology Progress Series* 242: 95-109
- Legendre L. 1999. Environmental fate of biogenic carbon in lakes. *The Japanese Journal of Limnology*. 60: 1-10
- Lehmann MF, Bernasconi SM, Barbieri A y McKenzie J. 2002. Preservation of organic matter and alteration of its carbon and nitrogen isotope
-

composition during simulated and *in situ* early sedimentary diagenesis.

Geochimica et Cosmochimica Acta 66: 3573–3584.

Lenz J. 1977. Seston and its main components. In: Rheinhermer G Ed., Microbial ecology of brackish water environmental. *Ecological studies* 25, Springer Verlag.

Lewis WM Jr. 1996. Tropical Lakes: how latitude makes a difference. pp 43-64.

In: Shiemer F y Boland KT (eds.) *Perspectives in Tropical Limnology*.

Academic Publishing, Amsterdam, Holanda.

Lugo A, Alcocer J, Sánchez MR, Escobar E y Macek M. 2001. Temporal and

spatial variation of bacterioplankton abundance in a tropical, warm-monomictic, saline lake: Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen*

Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie 5:

2968-2971

Lugo A, González ME, Sánchez MR y Alcocer J. 1999. Distribution of

Leptodiptomus novamexicanus (Copepoda: Calanoidea) in a Mexican

hyposaline lake. *Revista de Biología Tropical* 17: 145-152

MacIntyre S y Jellison R. 2001. Nutrient fluxes from upwelling and enhanced turbulence at the top of the pycnocline in Mono Lake, California.

Hydrobiologia 466: 13-29

McGowan HA, Sturman AD y Owens IF. 1996. Aeolian dust transport and deposition by foehn wind in an alpine environment, Lake tekapo, New

Zealand. *Geomorphology* 15: 135-146

Margalef R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega. Barcelona, España. 1010pp

Offer ZY y Groossens D. 2001. Ten years of aeolian dust dynamics in a desert

region (Negev desert, Israel): analysis of airborne dust concentration,

dust accumulation and the high-magnitude dust events. *Journal of Arid*

Environments 47: 211-249

Oliva MG, Alcocer J, Lugo A., Peralta L, y Sánchez MR. 2001. Phytoplankton

dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiologia* 466: 299-

306

Oliva MG, Lugo A, Alcocer J, Peralata L y Oseguera LA. 2009. Planktonic bloom-

forming *Nodularia* in the saline Lake Alchichica, Mexico. *Natural Resources*

and Environmental Issues 15: 121-126

Peng D, Johnson DL y Effler S. 2004. Characterization of inorganic particles in selected reservoirs and tributaries of the New York City water supply.

Journal of the American Water Resources Association 5/V:663-676

Pesant S, Legendre I, Gosselin M, Ashjian C, Booth B, Daly K, Fortier L, Hirche H-

J, Michaud J, Smith S y Smith Jr. WO. 1998. Pathways of carbon cycling in the euphotic zone: The fate of large sized phytoplankton in the

Northeast Water Polynya. *Journal of Plankton Research* 20: 1267-

1291

Pilskaln CH. 2004. Seasonal and interannual particle export in an African rift

valley lake: A 5 year record from Lake Malawi, Southern East Africa.

Limnology and Oceanography 49: 964-977

Pilati A y Wurtsbaugh WA. 2003. Importance of zooplankton for the

persistence of a deep chlorophyll layer: A limnocorral experiment.

Limnology and Oceanography 48: 249-260.

Poister D y DeGuelle C. 2005. The influence of particle size distribution and

composition on seasonal sedimentation rates in a temperate lake.

Hydrobiologia 537: 34-45

Prospero, JM y Lamb PJ. 2003. African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications. *Science* 302: 1024-1027

Ptácnik R, Diehl S y Berger S. 2003. Performance of sinking and nonsinking phytoplankton taxa in a gradient of mixing depths. *Limnology and Oceanography* 48: 1903-1912. DOI:10.4319/lo.2003.48.5.1903.

Punning JM, Terasma J, Koff T y Alliksaar. 2003. Seasonal fluxes of particulate matter in a small closed lake in Northern Estonia. *Water, air, and soil pollution* 149: 77-92

Pye K. 1992. Aeolian dust transport and deposition over Crete and adjacent parts of the Mediterranean Sea. *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 271-288

Reynolds CS. 1984. *The Ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. Segunda Edición. Gran Bretaña. 384 pp.

Reynolds RL, Yount JC, Reheis M, Goldstein H, Chavez Jr P, Fulton R, Whitney J, Fuller C y Forester RM. 2007. Dust emission from wet and dry playas in the Mojave Desert, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 1811-1827

Romero N, Sikverberg N, Roy S y Lovejoy C. 2000. *Sediment trap observations from the Gulf of St Lawrence and the continental margin of eastern Canada. Deep-Sea Research II 47: 545–583.*

Rosiles GG. 2005. *Estudio comparativo del picofitoplancton y fitoplancton de talla mayor en el lago Alchichica. Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.*

Rutten A, de Lange GJ, Ziveri P, Thomson J, Van Santvoort PJM, Colley S y Corselli C. 2000. *Recent terrestrial and carbonate fluxes in the pelagic eastern Mediterranean; a comparison between sediment trap and surface sediment. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 158: 197–213*

Sánchez M. 2000. *Variación de la clorofila “a” fitoplanctónica y sus mecanismos de control en un lago atalashalino tropical. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.*

- Scharek R, Latasa M, Karl DM y Bidigare RR. 1999. Temporal variations in diatom abundance and downward vertical flux in the oligotrophic North Pacific gyre. *Deep-Sea Research I* 46: 1051-1075.
- Schernewski G, Podsetchine V y Huttula T. 2005. Effects of the flow field on small scale phytoplankton patchiness. *Nordic Hydrology* 36: 85-98
- Simon M, Graossart HP, Schweitzer B y Ploug H. 2002. Microbial ecology of aggregates in aquatic ecosystems. *Aquatic Microbial Ecology* 28: 175-211
- Smoak JM, Moore WS, Thunell RC y Shaw TJ. 1999. Comparison of ^{234}Th , ^{228}Th , and ^{210}Pb fluxes with fluxes of major sediment components in the Guaymas Basin, Gulf of California. *Marine Chemistry* 65: 177-194
- Sommer U. 1985. Comparison between steady state and non-steady state competition: Experiments with natural phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 30: 335-346
- Stemmann L, Gorsky G, Marty JC, Picheral M y Miquel JC. 2002. Four-year study of large-particle vertical distribution (0-1000 m) in the NW

Mediterranean in relation to hydrology, phytoplankton, and vertical flux.

Deep-Sea Research II 49: 2143-2162

Stheinman BS y Parparov AS. 1997. An approach to particulate matter

transfer studies in littoral zones of lakes with changing morphometry.

Water Science and Technology 36: 199-205

Torres-Padrón ME, Gelado-Caballero MD, Collado-Sánchez C, Siruela-Matos VF,

Cardona-Castellano PJ y Hernández-Brito JJ. 2002. Variability of dust

inputs to the CANIGO zone. *Deep-Sea Research II* 49: 3455-3464

Veronesi ML, Barbieri A y Hanselmann W. 2002. Phosphorus, carbon and

nitrogen enrichment during sedimentation in a seasonally anoxic lake

(Lake Lugano, Switzerland). *Journal of Limnology* 61: 215-223

Vilaclara G, Chávez M, Lugo A, González H y Gaytán M. 1993. Comparative

description of crater-lakes basic chemistry in Puebla State, Mexico.

Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte

Limnologie 25: 435-440

Viner-Mozzini Y, Zohary T y Gasith A. 2003. *Dinoflagellate bloom development and collapse in Lake Kinneret: a sediment trap study*. *Journal of Plankton Research* 25:591-602

Voss M, Dippner JW y Montoya JP. 2001. *Nitrogen isotope patterns in the oxygen-deficient waters of the Eastern Tropical North Pacific Ocean*. *Deep-Sea Research I* 48: 1905-1921

Wetzel RG y Likens GE. 2000. *Limnological Analyses*. Springer. Nueva York: 429 pp.

Weyhenmeyer GA y Bloesch J. 2001. *The pattern of particle flux variability in Swedish and Swiss lakes*. *The science of the total environment* 266: 69-78

Weyhenmeyer GA, Hakanson L y Meili M. 1997. *A validated model for daily variations in the flux, origin, and distribution of settling particles within lakes*. *Limnology and Oceanography* 42: 1517-1529

Weyhenmeyer GA. 1996. *The influence of stratification of the amount and distribution of different settling particles in Lake Erken*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53: 1254-1262

- Weyhenmeyer GA. 1997. Quantification of resuspended particles in sedimentation traps. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie* 26: 271-276
- Wotton RS. 2004. Life in water. An internet book.
<http://www.ucl.ac.uk/~ubct212/>. (Abril 2011)
- Yacobi YZ y Ostrovsky I. 2008. Downward flux of organic matter and pigments in Lake Kinneret (Israel): relationships between phytoplankton and the material collected in sediment traps. *Journal of Plankton Research* 30: 1189-1202. DOI:10.1093/plankt/fbn070
- Yamaguchi H, Montani S, Tsutsumi H, Hamada K y Ueda N. 2003. Estimation of particulate organic carbon flux in relation to photosynthetic production in a shallow coastal area in the Seto Inland Sea. *Marine Pollution Bulletin* 47: 18-24.