



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



Carbono particulado y masa total del seston
en el lago Alchichica, Puebla, México

T E S I S

que para obtener el grado académico de

MAESTRA EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
(Limnología)

presenta

BIÓLOGA DIANA PATRICIA LÓPEZ ANAYA

Director de Tesis: DR. JAVIER ALCO CER DURAND

Comité Tutorial: DRA. ELVA ESCOBAR BRIONES
DRA. MARGARITA CABALLERO MIRANDA
DRA. GLORIA VILA CLARA FATJÓ
DR. ALFONSO LUGO VÁZQUEZ

México, 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT y la DGAPA por el apoyo financiero otorgado a través de las becas para la realización de mis estudios de posgrado en Ciencias del Mar y Limnología.

A los proyectos CONACYT-41667 "Limnoecología tropical: Interacciones cuenca de drenaje-lago" y PAPIIT-IN210806-3 "Relevancia del seston en la dinámica biogeoquímica de Alchichica, un lago tropical profundo" por el apoyo financiero para realizar la presente investigación.

Al programa de Posgrado en CMyL por el apoyo administrativo y financiero para la impresión de este trabajo de tesis.

A todos los miembros del comité tutorial y jurado de examen por sus atinados comentarios y consejos para la elaboración y redacción del trabajo de tesis.

A la M. en C. Yolanda Hornelas (ICMyL) por su ayuda en la toma de las fotografías al MEB.

A la M. en C. Nohemí Dimas (PILT) por su apoyo y ayuda en la toma de las fotos de microscopía óptica.

A la M. en C. Laura Peralta (PILT) por el apoyo logístico en campo.

Al M. en C. Luis A. Oseguera (PILT) por el apoyo en logística de campo y trabajo de laboratorio, por toda la ayuda en la elaboración de los análisis estadísticos y gráficas y por sus útiles comentarios para la elaboración y redacción de este trabajo.

Por el apoyo en el análisis de clorofila *a* a la M. en C. María del Carmen Hernández (PILT) y a la M. en C. Maribel Rojas (PILT).

A la Dra. Gloria Vilaclara (PILT) por su ayuda en la identificación de partículas al microscopio óptico.

Al Dr. Alfonso Lugo (PILT) por sus comentarios y apoyo en la elaboración de los análisis estadísticos.

DEDICATORIA

A mis padres:

Cuyo ejemplo y apoyo incondicional me permitieron finalizar esta meta de la mejor manera.

A mi hermano:

Sin tu ayuda y comprensión este trabajo no hubiera sido posible.

A mi hija Sofía:

Por ser mi mayor incentivo y lo mejor en mi vida.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Resumen
2. Introducción
3. Antecedentes
4. Objetivos e hipótesis
5. Área de estudio
6. Material y Métodos
 - 6.1. Trabajo de campo
 - 6.2. Limpieza de material de colecta y de laboratorio
 - 6.3. Masa Total
 - 6.4. Bioseston y Tripton
 - 6.5. Proporciones MT:clor a y MO:clor a
 - 6.6. Identificación de los componentes que integran el seston
 - 6.7. Consideraciones metodológicas
 - 6.8. Análisis estadísticos
7. Resultados y discusión
 - 7.1. Masa Total
 - 7.2. Bioseston
 - 7.3. Tripton
 - 7.4. Proporciones MT:clor a y MO:clor a
 - 7.5. Identificación de los componentes que integran el seston
8. Conclusiones
9. Bibliografía
- Anexo A
- Anexo B
- Anexo C
- Agradecimientos

1. RESUMEN

Este manuscrito es la primera contribución sobre la dinámica vertical y temporal de la concentración de la masa total del seston (MT) y de sus fracciones orgánica (MO) e inorgánica (MI) para un lago mexicano. Alchichica es uno de los lagos más profundos de México con un régimen térmico de monomixis cálida. La concentración de MT medida fluctuó entre 0.2 a 12.5 mg l⁻¹, con un promedio de 5.7 ± 2.5 mg l⁻¹. Este intervalo es mayor al registrado en otros lagos de características tróficas similares (oligo-mesotrófico). En la vertical, generalmente no se encontró el patrón esperado con concentraciones de MT mayores en el epilimnion que en el hipolimnion; lo anterior fue asociado a la falta de correlación significativa ($p < 0.05$) entre las concentraciones de MT y de clorofila *a*. Temporalmente, tampoco se encontró un patrón entre la MT y la hidrodinámica del lago (estratificación y circulación). La concentración de MO medida fluctuó entre < 0.1 y 4.0 mg l⁻¹, con un promedio de 1.0 ± 0.7 mg l⁻¹. Este intervalo es similar al registrado en otros lagos oligo-mesotróficos. Las concentraciones más elevadas de MO se encontraron en la capa de mezcla, disminuyendo significativamente ($p < 0.05$) por debajo de la termoclina. Temporalmente no se encontró el patrón esperado con mayores concentraciones de MO asociadas a los florecimientos fitoplanctónicos de invierno y primavera. Esta discrepancia puede deberse a que en Alchichica el fitoplancton no sea la principal fuente de MO, sino el detrito. Este hecho sugiere la existencia de una fuente alóctona importante de MO y/o que la fracción heterotrófica y/o detrito del MO autóctono es de magnitud considerable. Contrario a lo esperado, la concentración medida de MI fue mayor a la de MO, fluctuando entre 0.6 y 8.6 mg l⁻¹, con un promedio de 4.6 ±

1.9 mg l⁻¹. Esto se debió a una sobreestimación del material inorgánico derivada de la técnica de pérdida por combustión, la cual no distingue entre el sílice biogénico y el material litogénico. Las observaciones hechas bajo microscopía óptica y electrónica de barrido confirmaron la predominancia (90%) de frústulas de diatomeas sobre el material litogénico en el seston del lago Alchichica. La fracción inorgánica no mostró un patrón ni en la vertical ni el tiempo.

2. INTRODUCCIÓN

La materia orgánica e inorgánica existente en los ecosistemas acuáticos puede encontrarse en forma disuelta y/o particulada. Al conjunto de material particulado presente en la columna de agua se le denomina **seston**, el cual tiene dos fracciones reconocibles, el **bioseston**, constituido por organismos vivos y muertos y el **abioseston** o **tripton**, constituido por materia inorgánica (Wetzel, 1983; Margalef, 1983). A pesar de lo anterior, este concepto abarca un espectro amplio, por lo que se ha tratado de delimitar al seston a partir del tamaño de las partículas que lo conforman, teniendo un intervalo que va de 0.4 a 1 mm, dependiendo del autor y del tipo de análisis que se quiera hacer de las partículas (Wetzel y Likens, 2000; Karl, 1991; Sharp, 1991; Baudo, 1982).

El estudio de la masa y composición del seston es importante para entender la circulación de la materia orgánica y mineral de un lago (Punning et al., 2003).

En el conjunto del seston se encuentran elementos importantes para el desarrollo de la vida, tales como el carbono (C). El C particulado puede ser convertido -principalmente a través de la actividad bacteriana que se desarrolla a lo largo de la columna de agua- a compuestos solubles aprovechables (Wetzel y Likens, 2000; Callieri, 1997; Bertoni, 1978; Wetzel et al., 1972), o bien puede alcanzar rápidamente el hipolimnion y sedimentarse sin modificaciones (Callieri, 1997; Callieri et al., 1986; Wetzel, 1983; Wetzel et al., 1972).

La fase particulada del C es un reservorio importante, a pesar de que no se encuentra disponible inmediatamente para los organismos (Wetzel y Likens, 2000); además, representa una fase importante en el ciclo biogeoquímico del C. A este respecto, la fase particulada puede proveer de información importante acerca de los procesos de mineralización de la materia orgánica y por tanto del tiempo de residencia de las partículas aprovechables para los organismos en las diferentes capas de la columna de agua (Callieri et al., 1986). Esto último cobra importancia si se toma en cuenta que en las aguas relativamente estáticas de los lagos la gravedad actúa como un agente selectivo a través del cual la sedimentación traslada una porción importante del C y de su metabolismo a los sedimentos (Wetzel, 1983). La estratificación (térmica, química, etc.) del cuerpo acuático puede afectar también el transporte del C particulado, formando incluso trampas que impiden su sedimentación, favoreciendo por algún tiempo la productividad primaria de forma indirecta, y a la producción secundaria indirectamente en el meta y epilimnion (Järvinen et al., 1999; Wetzel, 1983).

El C particulado puede tener tres orígenes: alóctono, autóctono y la resuspensión de material del fondo del lago. La porción que cada uno de ellos aporta a la masa del seston varía dependiendo de la profundidad, de la morfometría de la cuenca, del régimen de vientos y del estado trófico del lago (Eckert et al., 2003) y determinará si el C que se está aportando es predominantemente orgánico o inorgánico.

El C orgánico particulado (COP) autóctono representa todo el C fijado por los organismos autótrofos que viven en el ecosistema lacustre menos el utilizado para su respiración (Wetzel et al., 1972), por lo que la cantidad y distribución del COP sigue un comportamiento similar al de la productividad y al de la distribución de la biomasa del fitoplancton, especialmente en la época de estratificación, debido a que forma parte integral de la anatomía de los organismos (Wetzel, 1983; Wetzel et al., 1972). Por otro lado, las fuentes y la composición del COP alóctono son diversas y poco entendidas, pero se piensa que la mayoría proviene de plantas terrestres (Wetzel et al., 1972).

La resuspensión de sedimentos puede aportar una importante cantidad de COP a la columna de agua, principalmente en lagos someros, aunque algunos autores (e.g., Eckert et al., 2003) afirman que esto también puede suceder en lagos con una profundidad > 9m; en consecuencia, se puede esperar un ligero aumento de COP al inicio de la época de circulación (Wetzel, 1983). Sin embargo, hay estudios que afirman que la ocurrencia e importancia de la resuspensión no ha sido probada en lagos profundos (Callieri, 1997).

El C inorgánico particulado (CIP) autóctono es una fracción que ha sido poco estudiada, siendo reconocida principalmente en aquellos lagos donde existen precipitaciones importantes de CaCO_3 , ya que los compuestos orgánicos pueden adsorberse o coprecipitar con éste, eliminando moléculas importantes de la zona trofogénica (Wetzel, 1983). El CIP alóctono, al igual que el COP alóctono, tiene fuentes y composición muy variadas, influidas fuertemente por el entorno del lago (Wetzel, 1983).

3. ANTECEDENTES

Estudios realizados en diversos lagos y otros cuerpos de agua en una amplia variedad de áreas geográficas, que van desde las regiones templadas hasta los trópicos, han encontrado que la fracción más abundante en el seston es la orgánica, concretamente el COP (Tabla 1).

Asimismo, se ha establecido que las concentraciones de COP presentan una dinámica muy similar a la del fitoplancton en forma espacial y temporal, esto es, que las mayores concentraciones de COP se encontraron en aquellas profundidades donde el fitoplancton era capaz de fotosintetizar y en las épocas donde existían picos de productividad de una o más especies fitoplanctónicas (Brzáková et al., 2003; Punning et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999; Callieri, 1997; Wetzel, 1972). A excepción de Wetzel et al. (1972) -quienes observaron un aumento en dicha capa al final de la época de estratificación debido a la actividad bacteriana favorecida por las condiciones anóxicas prevalecientes-, en todos los estudios anteriores se encontraron bajas concentraciones de COP en el hipolimnion en todas las épocas.

La proporción C:clorofila *a* (C:clor *a*) ha sido utilizada en algunos estudios para establecer si el crecimiento del fitoplancton es saludable en un lago. Dicha proporción indica -de cierta manera- que tan disponible es el C de un lago para los organismos autótrofos y, por tanto, si se traducirá en producción de bioseston, es decir, más organismos (Jellison y Melack, 2001; Polat et al., 1998). En el lago Tangañica, por ejemplo, se encontraron valores de 12.8-27.1, indicando un pobre crecimiento del fitoplancton (Järvinen et al., 1999).

Para el lago Maggiore, Italia, Callieri (1997) reporta que las concentraciones de CIP son hasta nueve veces mayores en los primeros 20 metros de la columna de agua en comparación con las encontradas a los 50-300 metros de profundidad. Sin embargo, en dicho estudio no se especifica el tipo de CIP o su origen.

La caracterización química de la materia particulada en suspensión - seston- ha adquirido gran importancia para el estudio de los ciclos biogeoquímicos de los elementos y sus efectos sobre los organismos (Hessen et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999; Baudo, 1982; Wetzel et al., 1972).

El lago tropical profundo Alchichica se ha estudiado desde 1978 (Alcocer et al., 2000; Vilaclara et al., 1993; Arredondo et al., 1984); a pesar de lo anterior y de que existe información previa relativa a la concentración y dinámica de los nutrientes disueltos (p.ej., Sánchez, 2006) así como de la distribución temporal de la concentración y dinámica de la biomasa fitoplanctónica evaluada a través de la clor *a* (p.ej., Sánchez, 2001) y su dinámica asociada al patrón de circulación del lago (Alcocer et al., 2000), se desconoce la composición, concentración y distribución del seston en sus aguas. Dadas las particularidades limnológicas del lago y su cuenca (en latitud tropical y a gran altura sobre el nivel del mar), resulta de particular interés averiguar la información básica relacionada con el seston y compararla con los datos generados en otros sistemas.

Tabla 1. Concentración promedio de COP y características de cuerpos de agua epicontinentales de regiones árticas, subárticas, templadas y tropicales.

Nombre	Región	Notas	COP	Otro (s)	Autor
Tangañica	tropical	Alta producción de peces	10.6-16.3 mg l ⁻¹	C: clor a = 6.7-36 μmol μg ⁻¹	Järvinen et al., 1999.
Grandes lagos africanos	tropical		66.7 mg l ⁻¹		Hecky et al., 1993.
Lagos africanos someros	tropical		286.3 mg l ⁻¹		Hecky et al., 1993.
Mono (E.U.A)	subtropical	hipersalino		C: clor a = 100-200 μmol μg ⁻¹ (verano) 30-50 μmol μg ⁻¹ (invierno)	Jellison y Melack, 2001.
Lawrence (E.U.A)	templada		0.05-1.7 mg C l ⁻¹		Wetzel et al., 1972.
Lugano (Suiza)	templada	Eutrófico	0.2-1.0 mg l ⁻¹		Veronesi et al., 2002.
Di Mergozzo (Italia)	templada	Oligo - mesotrófico	0.1-0.9 mg l ⁻¹	Masa total seston 0.3-2.2 mg l ⁻¹ Fracción inorgánica 0.05-0.9 mg l ⁻¹	Calieri et al., 1986.
Maggiore (Italia)	templada	Oligo - mesotrófico	0.2-1.8 mg l ⁻¹	Masa total seston 0.2-3.38 mg l ⁻¹ Fracción inorgánica <0.1-2.0 mg l ⁻¹	Calieri, 1997
Maggiore (Italia)	templada	Oligo - mesotrófico	0.1-0.9 mg l ⁻¹		Bertoni y Calieri, 1981.
GroBer Binnense (Alemania)	templada	hipertrófico	0.1-1.0 mg átomo l ⁻¹		Sommer, 1989.
Embalse Rímov (Rep. Checa)	templada	eutrófico	220-340 mg. (g DW) ⁻¹		Brzákóvá et al., 2003.
26 lagos de la región templada	templada		5.8 mg l ⁻¹		Hecky et al., 1993.
109 lagos del sureste de Noruega	subártica		0.2-7.1 mg l ⁻¹		Hessen et al., 2003.
12 lagos de la región subártica	subártica		0.021 mg l ⁻¹		Hecky et al., 1993.
6 lagos de la región ártica	ártica		0.026 mg l ⁻¹		Hecky et al., 1993.

A pesar de que el objetivo de la presente investigación fue de índole exploratoria y por lo tanto de naturaleza eminentemente descriptiva, se pusieron a prueba las siguientes hipótesis:

H1. Dado que el seston está altamente relacionado con los flujos de biomasa, se espera encontrar una mayor cantidad de éste en la zona productiva del lago, es decir, en la zona eufótica (Brzáková et al., 2003; Hessen et al., 2003; Punning et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999; Callieri, 1997; Wetzel, 1972).

H2. Se espera que la contribución del fitoplancton a la masa total del seston y a su fracción orgánica sea más importante durante las épocas de mayor producción (fase de aguas turbias), mientras que su contribución disminuya en las épocas de aguas claras (Brzáková et al., 2003; Punning et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999; Callieri, 1997; Wetzel, 1972).

H3. Dado que en otros trabajos se ha encontrado que las altas concentraciones de carbono inorgánico particulado (CIP) están asociadas a la entrada de material alóctono (precipitación pluvial y arrastre por viento), se espera que las mayores concentraciones de la fracción inorgánica del seston (MI) (como proxy del CIP) se presenten durante las épocas de lluvias y/o durante las épocas de mayor intensidad en los vientos y predominen sobre las de la fracción orgánica del seston (MO) (como proxy del COP) (Callieri et al., 1986; Wetzel, 1983).

4. OBJETIVO

El presente estudio tuvo como objetivo el reconocer la variación vertical y temporal del C particulado, de la masa total y de las fracciones orgánica e inorgánica del seston del lago Alchichica.

Para cumplir con lo anterior, se plantearon las siguientes metas:

- a) Evaluar la variación vertical y temporal de la masa total de seston (MT).
- b) Evaluar la variación vertical y temporal de la fracción orgánica (MO) e inorgánica (MI) del seston.
- c) Evaluar la variación vertical y temporal de la clorofila *a* (clor *a*) como proxy de la biomasa fitoplanctónica.
- d) Analizar la variación vertical y temporal de la proporción MT:clor *a* para reconocer la contribución del fitoplancton a la masa total de seston.
- e) Analizar la variación vertical y temporal de la proporción MO:clor *a* para reconocer la contribución del fitoplancton a la fracción orgánica del seston.

5. ÁREA DE ESTUDIO

Alchichica es un lago tropical, monomítico cálido (Alcocer et al., 2000), que se encuentra a los 19° 24' N y 97° 24' O en la Cuenca Oriental, en los límites de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, a 2,350 m s.n.m (Fig. 1). Tiene una profundidad máxima de 60 m y media de 40.9 m; su superficie es de 2.3 km² y el volumen es de 94, 214,080 m³ (Fig. 1) (Filonov et al., 2006). El lago es alimentado principalmente por agua subterránea y de manera secundaria por agua de lluvia.

Alchichica es un lago hiposalino (8.5 g l⁻¹) y básico (pH 8.7-9.2), siendo los iones dominantes el sodio y el cloruro aunque también son importantes los bicarbonatos y los carbonatos; la alcalinidad total es de 37 meq l⁻¹ (Oliva et al., 2001; Alcocer et al., 2000; Vilaclara et al., 1993).



Fig. 1. Fotografía aérea del área de estudio.

El lago presenta dos épocas bien delimitadas hidrodinamicamente, la de mezcla que va de finales de diciembre a principios de marzo y la de estratificación que va de finales de marzo a principios de diciembre. La estratificación se caracteriza por el desarrollo de un hipolimnion anóxico. La época de mezcla coincide con la estación fría y seca del año (invierno

hemisférico), mientras que la época de estratificación coincide con la estación cálida y lluviosa (Alcocer et al., 2000).

El clima característico de la región es cálido seco con una temperatura media anual de 12.9°C y una precipitación pluvial media anual de menos de 400 mm. La precipitación pluvial y las mayores temperaturas (14.5-15.4°C temperatura media mensual) se presentan en verano, mientras que en invierno se generan las precipitaciones y temperaturas más bajas (9.2-13°C) (García, 1988).

Las concentraciones de clor *a* generalmente son bajas (< 5 µg L⁻¹ en promedio); las concentraciones más altas típicamente se encuentran en la zona fótica (0-30 m), aunque también se pueden presentar valores máximos profundos entre los 20 y 35 m coincidiendo con la parte baja del metalimnion. El fitoplancton de Alchichica está compuesto por 19 especies; las diatomeas, clorofitas y cianobacterias son los grupos más importantes. La dinámica estacional del fitoplancton está influenciada por las épocas de circulación y estratificación (Oliva et al., 2001). En Alchichica se observan dos florecimientos importantes, uno de diatomeas al inicio de la época de circulación, y otro de *Nodularia* cf. *spumigena* al inicio de la época de estratificación (Alcocer y Lugo, 2003).

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1. Trabajo de campo

Para la evaluación del seston se tomaron muestras mensuales de agua a lo largo de la columna de agua en la parte central y más profunda (62 m) del lago Alchichica, ya que un estudio previo (Lugo et al., 1999) ha mostrado que su zona limnética es homogénea horizontalmente. Un total de diez muestras se tomaron con una botella muestreadora de agua marca UWITEC de 5 litros de capacidad buscando representar la heterogeneidad vertical de la columna de agua (p.e., termoclina, oxiclina, máximo profundo de clorofila).

La heterogeneidad vertical de la columna de agua se evaluó a través de los perfiles de temperatura (exactitud $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$) y oxígeno disuelto (exactitud $\pm 0.2 \text{ mg/L}$) cada metro, con ayuda de un equipo multiparamétrico de monitoreo de calidad de agua marca Hydrolab modelo DS4 acoplado a un sistema de almacenamiento multiparamétrico marca Hydrolab modelo SVR4. Por otro lado, la distribución de clor *a* en el perfil vertical se obtuvo cada segundo, con la ayuda de un perfilador de fluorescencia natural marca Biospherical modelo PNF-300.

Durante el periodo de estratificación se tomaron diez muestras de agua procedentes de las tres capas (epilimnion, metalimnion e hipolimnion) y durante la circulación, también diez muestras de profundidades distribuidas equitativamente a lo largo de la columna de agua. Las muestras recolectadas fueron tamizadas *in situ* a través de una malla de 63 μm de apertura para eliminar al zooplancton ("swimmers") que de otra forma hubiera afectado la precisión de la evaluación del seston como han sugerido diversos autores

(e.g. BrzÁková et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Polat et al., 1998; Karl et al., 1991).

La malla pudo retener además organismos fitoplanctónicos de tallas grandes o formadores de filamentos que se encuentran en Alchichica, tales como la diatomea *Cyclotella alchichicana* ($\geq 50\mu\text{m}$) y la cianobacteria filamentosa *Nodularia cf. spumigena* ($> 63\mu\text{m}$).

Las muestras se almacenaron inmediatamente en botellas de plástico con una capacidad de 4 litros, las cuales fueron mantenidas durante su transporte al laboratorio (mÁximo 4 horas) bajo condiciones de oscuridad y baja temperatura (dentro de una hielera con una cama de hielo) para evitar la alteraci3n de las muestras. El procesamiento de dichas muestras se realiz3 antes de haber transcurrido 24 horas desde su obtenci3n.

6.2. Limpieza del material de colecta y de laboratorio.

Tanto la botella muestreadora como las botellas de plástico en que se transportaron las muestras fueron previamente lavadas con HCl al 10% con el fin de eliminar la materia orgÁnica que pudieran contener y posteriormente fueron enjuagadas con agua destilada primero y con agua desionizada despu3s. Las botellas se dejaron secar a temperatura ambiente evitando que les cayera polvo colocÁndolas de manera invertida sobre un escurridor (Wetzel y Likens, 2000; Karl, 1991).

Para la filtraci3n se usaron equipos de filtraci3n analÍticos de vidrio Pyrex con soporte de vidrio sinterizado marca Millipore, para filtros de 47 mm. Se utiliz3 este tama3o de filtro, porque se ha encontrado que a mayor Área de los filtros, menor la obstrucci3n de los poros de 3stos durante la

filtración (Moran et al., 1999). Los equipos de filtración se limpiaron de la misma manera arriba descrita para las botellas, esto es, con HCl, agua destilada y agua desionizada. Una vez secos, éstos fueron colocados dentro de un recipiente con tapa para evitar que durante el secado les cayera polvo (Wetzel y Likens, 2000).

El seston fue retenido filtrando la muestra a través de filtros marca Whatman tipo GF/F de 47 mm de diámetro (0.7 μm de apertura nominal de poro). Previo a su uso, los filtros fueron combustionados a 500°C por cuatro horas en una mufla marca Thermolyne modelo 48000, envueltos en papel aluminio con el lado opaco hacia los filtros, con el fin de eliminar todo el carbono que pudiera haber presente en ellos (Hessen et al., 2003; Wetzel y Likens, 2000; Järvinen et al., 1999; Pujo-Pay y Raimbault, 1994; Karl, 1991; Karl et al., 1991). Después de la combustión se dejaron enfriar en la mufla. Posteriormente los filtros se pesaron en una balanza analítica marca Sartorius modelo CP 124 (peso que en lo sucesivo será denominado "Peso 1"), para después mantenerlos almacenados en un desecador hasta su uso.

6.3. Masa total (MT)

En el laboratorio, tres réplicas de cada profundidad y un blanco fueron filtrados a través de los filtros precombustionados de 47 mm de diámetro (apertura de poro 0.7 μm). El volumen de muestra a filtrar fue de 250 a 500 ml de acuerdo a la propuesta de Wetzel y Likens (2000), y a las dos diferentes épocas presentes en el área de estudio [e.g. menos volumen en la "época de aguas turbias" caracterizada por el florecimiento de diatomeas durante la circulación y durante el florecimiento de cianobacterias durante la estratificación temprana; y mayor volumen en la época "de aguas claras" durante la estratificación tardía (Oliva et al.,

2001)]. El volumen "óptimo" se definió con base en lo observado tanto en campo como en el laboratorio.

El proceso de filtración se llevó a cabo con ayuda de una bomba de vacío, no excediendo las 0.3 atm para evitar la pérdida de material orgánico. Posteriormente los filtros fueron secados a 50°C en un horno (marca Lab-Line Instruments modelo 3512) por 24 horas; transcurrido este tiempo se dejaron enfriar en el horno y se colocaron posteriormente en un desecador (Jellison y Melack, 2001; Wetzel y Likens, 2000; Polat et al., 1998).

La gravimetría del seston retenido en los filtros se estimó en filtros completamente secos pesados en la misma balanza analítica hasta alcanzar peso constante (peso seco que en lo sucesivo será denominado "Peso 2"). Las diferencias entre el Peso 1 y el Peso 2 se relacionaron primero al volumen filtrado y después se estandarizaron a un litro de agua representando la masa total de seston MT (mg l^{-1}).

6.4. Bioseston (MO) y tripton (MI)

Los mismos filtros empleados para gravimetría (47mm) fueron posteriormente combustiónados a 550°C en una mufla por cuatro horas, al cabo de las cuales se dejaron enfriar en la mufla y después se colocaron en un desecador por aproximadamente 24 horas hasta adquirir peso constante. Posteriormente, los filtros fueron pesados en la misma balanza analítica (peso seco libre de ceniza que en lo sucesivo será denominado "Peso 3"). La fracción inorgánica del seston fue obtenida de la diferencia entre el Peso 3 y el Peso 1, se relacionó con el volumen filtrado y después fue estandarizada a un litro (MI mg l^{-1}). La diferencia entre la masa total (MT mg l^{-1}) y la fracción inorgánica (MI mg l^{-1}) representó la cantidad de materia orgánica

combustible ($MO \text{ mg l}^{-1}$) (Chung et al., 2004). Ambas fracciones también fueron expresadas como porcentaje (% MI y %MO). Se dio seguimiento a la dinámica de la MO como un proxy del COP.

6.5. Identificación de los componentes que integran el seston

Con el fin de identificar el tipo de partículas que conforman el seston del lago Alchichica así como reconocer su tamaño, se realizaron observaciones bajo microscopía electrónica de barrido (microscopio marca JEOL modelo JSM-6360LV) para lo cual se filtraron muestras de 250 ml a través de filtros Whatman 47mm bajo el mismo procedimiento antes descrito. Dichas muestras fueron secadas y recubiertas con oro para hacer observaciones al alto vacío y correspondieron al mes de septiembre de 2005 y las profundidades seleccionadas fueron 2 metros (epilimnion, cerca de la superficie), 25 metros (termoclina) y 60 metros (hipolimnion, cerca del fondo).

También se observaron muestras fijadas con lugol con ayuda de un microscopio óptico invertido marca LEICA modelo DM IRB a través de la técnica de Utermöhl a un aumento de 100x. Las fotografías obtenidas fueron tomadas con una cámara digital. Las muestras observadas correspondieron a una época de circulación (enero 2006) y a una de estratificación (abril 2006); las profundidades seleccionadas buscaban representar la heterogeneidad de la columna de agua en el caso de la estratificación, y una ubicación uniforme en la columna en el caso de la circulación.

6.6. Proporciones MT:clor *a* y MO:clor *a*

Las muestras de clor *a* fueron obtenidas de los mismos puntos de muestreo para seston. Para su evaluación se filtraron 50 ml de cada muestra a través de un filtro de fibra de vidrio marca Whatman, tipo GF/F (apertura de poro nominal 0.7 μm). Posteriormente, se extrajo la clor *a* de estos filtros con acetona al 90% durante un periodo mayor a 12 y menor de 24 horas en oscuridad y refrigeración (4°C) después de haber macerado cada filtro. La clor *a* extraída se leyó en un fluorómetro digital marca Turner Designs modelo 10-AU. El fluorómetro está calibrado para proporcionar una resolución alta en sacrificio de un menor intervalo de detección (se calibró en el intervalo más bajo de concentración, útil para aguas oligotróficas como es el caso de Alchichica). Posteriormente, las lecturas se convirtieron a $\mu\text{g l}^{-1}$ de clor *a*, utilizando el algoritmo de la Eq. 1, indicada en el método 445.0 (United States Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Cincinnati, OH).

$$C_{s,u} = \frac{(C_{e,u}) (\text{volumen extraído (l)}) (FD)}{\text{volumen muestreado (l)}}$$

Ecuación 1

Donde:

$C_{s,u}$ = concentración de clorofila *a* ($\mu\text{g l}^{-1}$) en toda la muestra de agua

$C_{e,u}$ = concentración de clorofila *a* ($\mu\text{g l}^{-1}$) no corregida en la solución extraída y analizada

Volumen extraído = volumen (l) de la extracción antes de ser diluida

FD = factor de dilución

Volumen muestreado = volumen (l) de toda la muestra de agua

Dado que las concentraciones de clor *a* han sido típicamente relacionadas a la biomasa de fitoplancton y esta última, a su vez, ha sido estrechamente relacionada a la cantidad de seston en un cuerpo de agua (Hessen et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999; Wetzel et al., 1972), los valores obtenidos de clor *a* fueron relacionados con los de la

masa total de seston (MT) y con los de la fracción orgánica del seston (MO) a manera de evaluar la importancia de la contribución del fitoplancton al seston en el Lago Alchichica.

6.7. Consideraciones metodológicas

Los resultados preliminares obtenidos hasta el mes de junio de 2004 indicaban que la MO no mostraba los picos de biomasa fitoplanctónica típicos en Alchichica (ver área de estudio). Dado que las muestras de agua son tamizadas a través de una malla de 63 μm en el campo, se pensó -como fue mencionado previamente- que probablemente las especies de talla grande del fitoplancton, tales como diatomeas y algas filamentosas, estaban siendo retenidas subvaluando la concentración real de MO.

Para resolver lo anterior, se llevó a cabo un análisis comparativo de muestras de dos muestras de seston, con y sin el prefiltrado en campo. Las muestras fueron obtenidas de cinco profundidades (ver Tabla 5) en la capa de mezcla (generalmente coincidente con la capa eufótica), que es justamente donde se encuentra la mayor concentración de fitoplancton; se contó con tres repeticiones de cada muestra. La primera muestra correspondió al mes de mayo de 2005 (fase de aguas turbias) y a fin de tener una mejor comparación, la segunda muestra correspondió al mes de septiembre del mismo año (fase de aguas claras). Las muestras fueron tratadas posteriormente de acuerdo con la metodología ya descrita para obtener la MT y la MO.

Debido a la presencia de fuertes vientos en el lago Alchichica que alcanzan velocidades promedio de 5 m s^{-1} y a la variación en la intensidad de los mismos a lo largo del día (Filonov y Alcocer, 2002), se pensó que éstos

podrían tener un efecto sobre la distribución del seston en la capa de mezcla, esto es, favoreciendo su acumulación a cierta profundidad de la misma en condiciones de viento en calma u homogeneizando su distribución vertical bajo condiciones de fuertes vientos, dando un sesgo en la comparación de muestras tomadas durante condiciones de viento distintas.

Para evaluar la importancia del viento en la distribución vertical del seston se analizaron muestras de seston procedentes de dos diferentes horas del día en agosto de 2005, en el T1 (6 PM) después de estar soplando el viento por varias horas y en el T2 (7 AM) después de que el lago permaneció varias horas en calma. Las muestras se obtuvieron de cuatro profundidades: tres en la capa de mezcla (2, 10, 15 m) y una por debajo de la termoclina (40 m); tanto la capa de mezcla como la profundidad de la termoclina se establecieron con base en los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto. Cada muestra contó con tres repeticiones y fue tratada posteriormente de acuerdo a la metodología ya descrita para obtener la MT, MO y MI. Los resultados obtenidos fueron analizados comparativamente.

De acuerdo a Karl (1991), para analizar muestras de seston procedentes de agua de mar, se recomienda no enjuagar con agua desionizada las muestras en filtros debido a la posible lisis celular por el cambio osmótico. El mismo autor indica que las sales usualmente no representan ningún problema de interferencia; sin embargo, al analizar los valores obtenidos de los blancos utilizados a lo largo del periodo de estudio, se detectó una posible interferencia de las sales presentes en el agua del lago Alchichica. Dicha interferencia consistió en que dichos filtros blanco presentaban valores iguales o más altos de MT, MI y MO en comparación a los filtros regulares.

Por lo anterior, se determinó la necesidad de establecer un factor de corrección para los valores de todas las fracciones evaluadas. Dicho factor de corrección se obtuvo a partir de la comparación entre muestras y blancos tratados bajo la metodología antes descrita (sin enjuagar con agua desionizada) y muestras y blancos enjuagados con agua desionizada inmediatamente después de la filtración con el fin de eliminar las sales presentes y que pudieran quedar en el filtro al secarse. De esta manera, la MI (mg l^{-1}) fue obtenida con base en lo reportado por Karl et al. (1991) utilizando la siguiente fórmula:

$$MT = \frac{(\text{Peso 3} - \text{Peso 1}) - \text{blanco}}{\text{Volumen filtrado} * 1000}$$

La MO (mg l^{-1}) fue obtenida por la diferencia entre la masa total y la fracción inorgánica del seston.

En el anexo C se presentan una serie de recomendaciones que emanaron sobre la adecuación de la metodología para el estudio del seston aplicada en este trabajo.

6.8. Análisis estadísticos

Para reconocer si existían diferencias significativas entre las tres capas de la columna de agua (epi, meta e hipolimnion) con base en las concentraciones de las tres fracciones evaluadas (MT, MI y MO), se realizaron análisis de varianza (ANOVA intervalo de confianza del 95%). En aquellos casos en los cuales solo se presentaron dos capas, se aplicaron pruebas de *t* - student; en el caso del mes de enero de 2005, cuando la columna de agua estaba en circulación, cada profundidad (10 en total) fue

tomada como capa y se realizó un análisis de varianza (ANOVA), con un intervalo de confianza del 95%. Los datos usados en los análisis no fueron transformados, ya que presentaban una distribución normal. Los análisis fueron ejecutados mediante el paquete estadístico SPSS versión 10.

Se realizaron diagramas profundidad-tiempo con base en los valores promedio de cada una de las fracciones evaluadas mediante el paquete Surfer versión 8.

Para determinar si existían diferencias significativas entre las muestras con y sin prefiltrado en campo, y entre las muestras tomadas a diferentes horas del día, se realizaron pruebas de t - student con un intervalo de confianza del 95% mediante el paquete estadístico SPSS versión 10.

Finalmente, con el fin de establecer la posible relación entre la MO y la clor a y entre la MT y la clor a se realizaron análisis de correlación con ayuda del paquete estadístico SPSS versión 10.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Masa total (MT)

La MT varió tanto temporal como verticalmente en un amplio intervalo con valores de 0.2 a 12.5 mg l⁻¹ (promedio 5.7 ± 2.5 mg l⁻¹ n=390). Durante la estratificación, la concentración promedio (n=270) fue de 5.5 ± 2.6 mg l⁻¹ y durante la circulación, de 6.3 ± 2.1 mg l⁻¹ (n= 120).

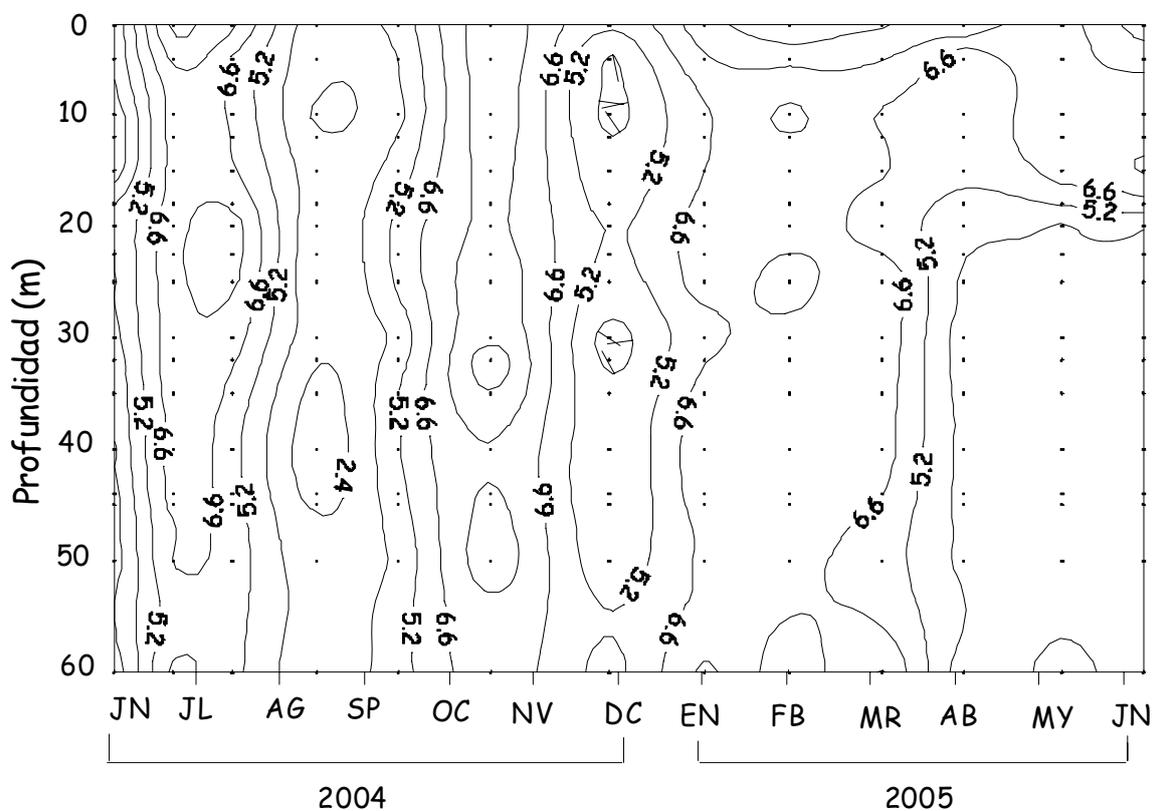


Fig. 2. Diagrama profundidad-tiempo de isopletas de concentración de MT - masa total del seston- (mg l⁻¹) en el Lago Alchichica. Los puntos muestran las profundidades de muestreo de cada mes.

En el perfil vertical (Fig. 2), las concentraciones promedio en el epilimnion fueron de 1.7 ± 0.6 a 8.7 ± 1.4 mg l⁻¹ (n=172), en el metalimnion de 2.7 ± 0.8 a 9.7 ± 1.8 mg l⁻¹ (n=63) y en el hipolimnion de 2.1 ± 0.8 a 8.2 ± 1.5 mg l⁻¹ (n=155). Como se puede apreciar en la Tabla 2, las concentraciones de MT en la columna de agua no presentaron diferencias significativas en la mayor parte del año, a excepción

de los meses de abril a junio de 2005, correspondientes a la estratificación temprana.

En general, durante el periodo de estratificación -bien establecida y tardía- de 2004 (junio-noviembre), no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las tres capas del lago; sólo en el mes de agosto se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el epi y metalimnion con relación al hipolimnion (Tabla 2). Sólo hasta la fase inicial de la estratificación (abril-mayo 2005) si se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las concentraciones de MT entre el epilimnion y metalimnion con relación al hipolimnion, y durante junio de 2005, la columna de agua estuvo completamente diferenciada en las tres capas.

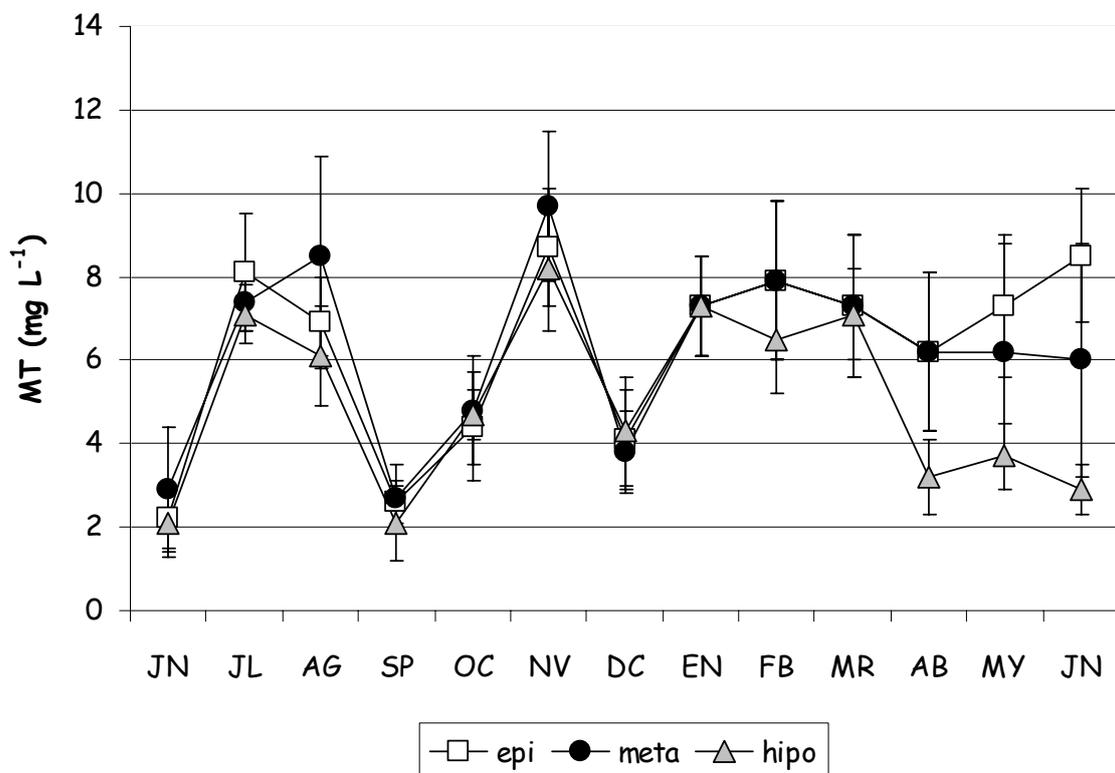


Figura 3. Variación temporal de la concentración de MT -masa total del seston- (promedio \pm 1 desviación estándar) (n=390) de los diferentes estratos en la columna de agua del lago Alchichica.

Con relación a la MT se aprecia una ciclicidad con periodicidad trimestral (Fig. 3) en la cual se presentaron cuatro máximos (julio-agosto, noviembre, febrero y solo en el epilimnion en mayo-junio) separados por sus respectivos mínimos (junio, septiembre, diciembre).

Las concentraciones de MT encontradas en Alchichica son más elevadas que las encontradas en otros lagos con características tróficas similares (oligo-mesotróficos), como el lago Maggiore (0.2-3.38 mg l⁻¹) y el lago Di Mergozzo (0.7-2.3 mg l⁻¹) en Italia (Callieri, 1997; Callieri et al., 1986). La MT no presentó una clara influencia por la hidrodinámica del lago, tal como sucedió en dichos lagos italianos; esto es especialmente notorio durante la primera parte del presente estudio (junio-noviembre de 2004) durante el cual no se observó un patrón en las concentraciones de MT ni temporal ni a lo largo de la columna de agua (Figs. 2, 3 y Tabla 2). Durante este periodo se esperaban encontrar diferencias entre las capas de la columna de agua, con valores significativamente más altos en el epilimnion en comparación con los del hipolimnion como fue establecido en la hipótesis 1. En contraste, a partir de la estratificación temprana (abril 2005) sí se encontraron diferencias entre las capas de la columna de agua (Fig. 3 y Tabla 2), con valores significativamente más altos en el epilimnion en comparación con los del hipolimnion, patrón que se mantuvo por el resto del estudio. La presencia de concentraciones más altas en el epilimnion y más bajas en el hipolimnion asemejan lo encontrado en otros estudios (Brzáková et al., 2003; Hessen et al., 2003; Punning et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999; Callieri, 1997; Wetzel, 1972), en donde las concentraciones más altas de seston, típicamente se encuentran en la zona productiva de un lago.

Durante la época de circulación (diciembre a marzo de 2005) la columna de agua fue homogénea (Figs. 2 y 3, Tabla 2) en cuanto a la distribución de la MT, no

encontrándose diferenciación de capas, en concordancia con los perfiles de temperatura (datos no mostrados).

Tabla 3. Concentración promedio (n=10) de MT -masa total del seston- (mg l^{-1}) bajo condiciones contrastantes de viento. (T1 = viento fuerte, T2 = calma).

Z (m)	T1	T2
2	10.3 \pm 0.3	10.7 \pm 0.4
10	9.4 \pm 0.2	11.0 \pm 1.8
15	9.2 \pm 0.1	10.7 \pm 0.5
20	9.6 \pm 2.8	9.4 \pm 1.4
40	6.5 \pm 0.8	5.8 \pm 1.5

Con respecto a la influencia de los vientos sobre la distribución del seston en la capa de mezcla, los valores promedio (n=10) de las muestras fueron $9.0 \pm 1.7 \text{ mg l}^{-1}$ y $9.5 \pm 2.3 \text{ mg l}^{-1}$ para T1 y T2 respectivamente (Tabla 3). No se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las muestras analizadas bajo diferentes regímenes de viento (i.e., 7 de la mañana = calma y 6 de la tarde = viento fuerte) en el transcurso de 24 horas. Lo anterior indica que no existió sesgo alguno en las concentraciones de seston debido a la hora en que fueron tomadas las muestras en campo.

Tabla 2. Concentración promedio (± 1 d.e.) (n=390) de MT -masa total del seston- (mg l^{-1}) de los diferentes estratos en la columna de agua del lago Alchichica. (Epi = epilimnion, Meta = metalimnion, Hipo = hipolimnion). (Misma letra (a) indica que no hubo diferencia significativa $p < 0.05$ entre capas. Letras diferentes (b y c) indican una diferencia significativa, $p < 0.05$ entre capas) (Los valores en negritas son la concentración promedio más alta de cada mes).

Capa	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC	EN	FB	MR	AB	MY	JN
Epi	2.2a ± 0.7	8.1a ± 1.4	6.9a ± 1.1	2.6a ± 0.5	4.4a ± 1.3	8.7a ± 1.4	4.1a ± 1.2	7.3 ± 1.2	7.9a ± 1.9	7.3a ± 1.7	6.2a ± 1.9	7.3a ± 1.7	8.5a ± 1.6
Meta	2.9a ± 1.5	7.4a ± 0.7	8.5a ± 2.4	2.7a ± 0.8	4.8a ± 1.3	9.7a ± 1.8	3.8a ± 1.0		6.2a ± 2.6	6.0b ± 2.8			
Hipo	2.1a ± 0.8	7.1a ± 0.7	6.1b ± 1.2	2.1a ± 0.9	4.7a ± 0.6	8.2a ± 1.5	4.3a ± 1.3		6.5a ± 1.3	7.1a ± 1.1	3.2b ± 0.9	3.7b ± 0.8	2.9c ± 0.6
Columna	2.4 ± 1.1	7.6 ± 1.1	6.9 ± 1.7	2.5 ± 0.8	4.6 ± 1.0	8.7 ± 1.6	4.1 ± 1.2	7.3 ± 1.2	7.3 ± 1.8	7.3 ± 1.6	4.8 ± 2.1	5.2 ± 2.2	5.2 ± 2.9

7.2. Bioseston (MO)

La concentración de MO en Alchichica fluctuó entre < 0.1 y 4.0 mg l^{-1} , (promedio ($n=390$) de $1.0 \pm 0.7 \text{ mg l}^{-1}$). Durante la estratificación las concentraciones promedio ($n=270$) se encontraron entre $< 1.0 \pm 1.5 \text{ mg l}^{-1}$ (Junio 2004) y $2.0 \pm 1.2 \text{ mg l}^{-1}$ (Junio 2005); por otro lado, durante la circulación se encontraron valores ($n=120$) entre $0.7 \pm 0.8 \text{ mg l}^{-1}$ (Diciembre) y $1.5 \pm 0.5 \text{ mg l}^{-1}$ (Febrero).

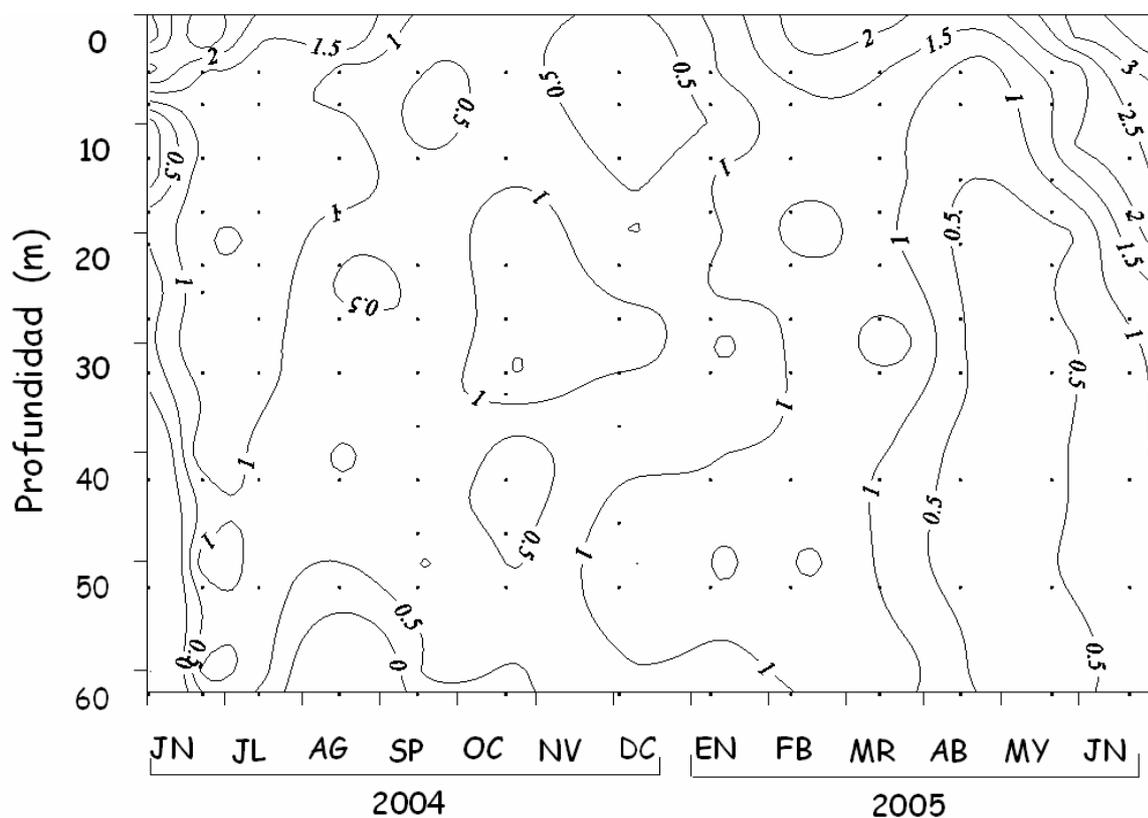


Figura 4. Diagrama profundidad-tiempo de isopletas de concentración de MO - fracción orgánica del seston - (mg l^{-1}) en el lago Alchichica. Los puntos marcan los puntos de colecta de cada mes.

En el perfil vertical (Fig. 4), las concentraciones promedio más elevadas se encontraron en el epilimnion ($n=172$) ($0.5 \pm 0.3 - 3.3 \pm 0.8 \text{ mg l}^{-1}$) y las más bajas en el hipolimnion ($n=155$) ($< 0.1 \pm 1.1 - 1.4 \pm 0.3 \text{ mg l}^{-1}$); el metalimnion mostró valores promedio ($n=63$) intermedios entre el epi y el hipolimnion de 0.2 ± 0.7 a $2.4 \pm 0.7 \text{ mg l}^{-1}$. Durante la estratificación, en general, se encontraron

diferencias significativas ($p < 0.05$) (Tabla 4) entre las concentraciones promedio de MO entre el epilimnion y el hipolimnion; sin embargo, no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el epi y el metalimnion. Por el contrario, durante la circulación se encontraron, en general, concentraciones similares a lo largo de toda la columna.

A diferencia de la MT, la variación de la MO no mostró un patrón temporal definido (Fig. 5), tan solo una tendencia a partir de la estratificación temprana a aumentar y a diferenciarse más claramente los estratos con concentraciones mayores en el epilimnion y menores en el hipolimnion de manera similar a la MT.

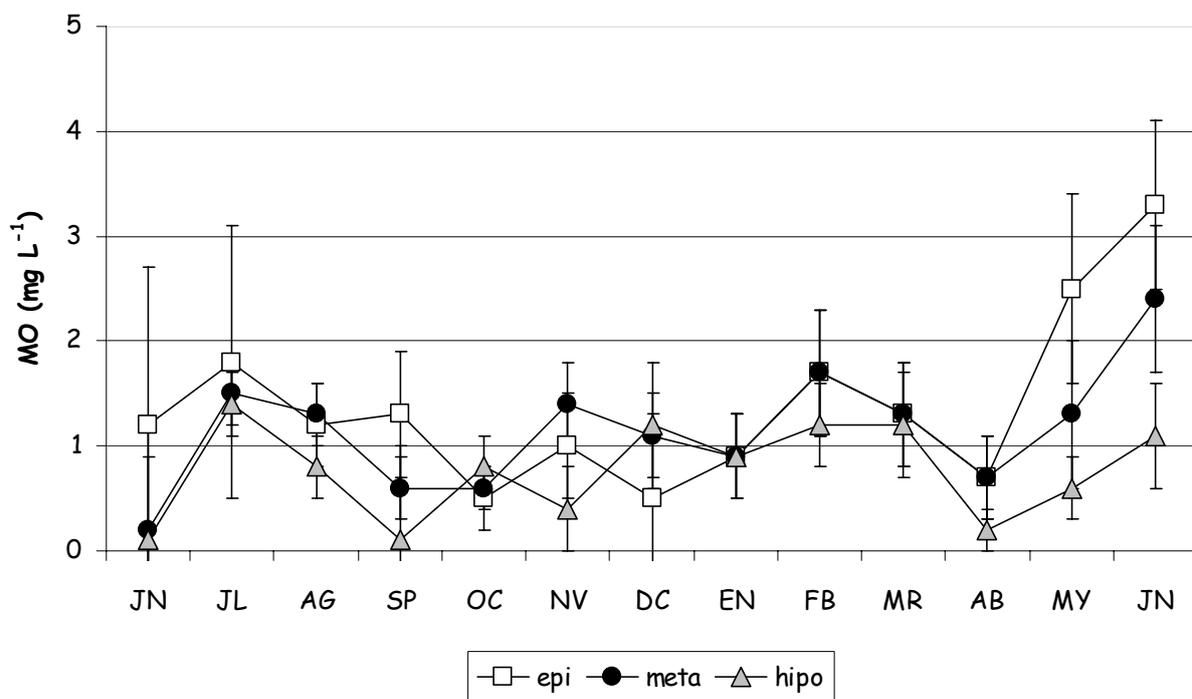


Figura 5. Variación temporal de la concentración de MO -fracción orgánica del seston- (promedio \pm 1desviación estándar) (n=390) de los diferentes estratos en la columna de agua del lago Alchichica.

Las concentraciones de MO encontradas en Alchichica son más elevadas que las concentraciones de COP reportadas para otros lagos (Tabla 1), por ejemplo el lago Maggiore ($< 0.1-0.8 \text{ mg l}^{-1}$ Callieri 1997, $0.2-1.8 \text{ mg l}^{-1}$ Bertoni y Callieri 1981) y el lago Di Mergozzo ($0.15-0.9 \text{ mg l}^{-1}$, Callieri *et al.* 1986).

La dinámica de la MO en Alchichica está relacionada con la hidrodinámica del lago. Durante el largo periodo de estratificación -alrededor de nueve meses- la MO se origina en la zona eufótica (Z_{EU}) y permanece dentro de la zona de mezcla (Z_{MIX}) ambas coincidentes. Estudios previos (p.e., Adame 2005) han mostrado que la fracción grande ($> 2 \mu m$) del fitoplancton en Alchichica es la dominante a lo largo del año; por lo anterior, la ruta preferencial que sigue la producción primaria fitoplanctónica en el lago es su exportación por debajo de la termoclina. El que la concentración de MO en el hipolimnion sea baja parece indicar que la tasa de sedimentación es elevada y que las diatomeas grandes y pesadas (p.e. *Cyclotella alchichicana*, $\geq 50 \mu m$) se depositan rápidamente en el sedimento. La predominancia de frústulas observadas (ver anexos A y B) así como el pronto desarrollo de un hipolimnion anóxico proporciona evidencia a favor de esta hipótesis.

El comportamiento en el perfil vertical coincide con lo reportado en otros trabajos (p.e., Callieri 1997). Sin embargo, con relación a la dinámica temporal no se encontraron las mayores concentraciones de MO durante los florecimientos de invierno (diatomeas) y primavera (cianobacterias) como se había establecido en una de las hipótesis y de acuerdo a la literatura que menciona que el COP en ecosistemas lacustres presenta una relación cercana a la dinámica del fitoplancton (Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999) tomando en este caso a la MO como proxy del COP. Por lo anterior, se pensó que las concentraciones de MO en los periodos de florecimiento algal hubieran sido

Tabla 4. Concentración promedio (± 1 d.e.) (n=390) de MO -fracción orgánica del seston- (mg l^{-1}) de los diferentes estratos en la columna de agua del lago Alchichica, México. (Epi = epilimnion, Meta = metalimnion, Hipo = hipolimnion). (Misma letra (a) indica que no hubo diferencia significativa $p < 0.05$ entre capas. Letras diferentes (b y c) indican una diferencia significativa, $p < 0.05$ entre capas) (Los valores en negritas son la concentración promedio más alta de cada mes).

Capa	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC	EN	FB	MR	AB	MY	JN
Epi	1.2a ± 1.5	1.8a ± 1.3	1.2a ± 0.4	1.3b ± 0.6	0.5a ± 0.3	1.0a ± 0.5	0.5a ± 0.8	0.9 ± 0.4	1.7a ± 0.6	1.3a ± 0.5	0.7a ± 0.4	2.5a ± 0.9	3.3a ± 0.8
Meta	0.2a ± 0.7	1.5a ± 0.3	1.3a ± 0.3	0.6a ± 0.3	0.6a ± 0.2	1.4a ± 0.4	1.1a ± 0.4		1.3b ± 0.7	2.4b ± 0.7			
Hipo	<0.1b ± 1.1	1.4a ± 0.3	0.8b ± 0.3	<0.1a ± 0.9	0.8b ± 0.3	0.4b ± 0.4	1.2a ± 0.6		1.2b ± 0.4	1.2a ± 0.5	0.2b ± 0.2	0.6c ± 0.3	1.1c ± 0.5
Columna	<0.1 ± 0.6	1.6 ± 0.9	1.0 ± 0.4	0.7 ± 0.6	0.7 ± 0.3	0.9 ± 0.6	0.7 ± 0.7	0.9 ± 0.4	1.5 ± 0.5	1.2 ± 0.5	0.4 ± 0.4	1.2 ± 0.9	2.0 ± 1.2

subestimados debido a la prefiltración que se hizo en el campo para la remoción del zooplancton, como lo sugieren hacer diversos autores (e.g. BrzÁková et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Polat et al., 1998; Karl et al., 1991). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las muestras con y sin prefiltrado en el campo ni para la fase de aguas turbias (florecimiento) ni en la de aguas claras. En la tabla 5 se muestran los valores promedio ($n=15$) tanto de las muestras que fueron prefiltradas en campo, como de las que no lo fueron.

Tabla 5. Concentración promedio ($n=15$) de MO -fracción orgánica del seston- (mg l^{-1}) y de MT -masa total- (mg l^{-1}) de muestras de seston sin prefiltrar (SPF) y con prefiltrado (CPF) en el campo.

<i>Fase de Aguas Turbias (Mayo, 2005)</i>				
	MO		MT	
Z(m)	SPF	CPF	SPF	CPF
2	2.4 ± 0.0	3.1 ± 0.8	10.7 ± 0.8	7.2 ± 1.5
5	2.9 ± 0.6	1.8 ± 0.6	10.4 ± 1.0	7.5 ± 2.2
12	1.8 ± 0.9	2.1 ± 0.3	9.1 ± 1.1	8.0 ± 2.5
15	2.8 ± 0.7	1.4 ± 0.2	10.2 ± 1.1	7.4 ± 1.8
20	0.6 ± 0.3	0.5 ± 0.2	4.8 ± 0.2	3.4 ± 0.7
<i>Fase de Aguas Claras (Septiembre, 2005)</i>				
	MO		MT	
Z(m)	SPF	CPF	SPF	CPF
2	2.2 ± 0.3	3.8 ± 0.9	12.3 ± 0.5	14.3 ± 0.2
5	2.1 ± 0.2	1.2 ± 0.0	12.1 ± 0.4	9.4 ± 2.7
12	1.8 ± 0.2	1.6 ± 0.4	10.3 ± 0.8	7.8 ± 0.8
15	1.1 ± 0.1	0.7 ± 0.4	5.7 ± 0.3	3.9 ± 0.2
20	1.4 ± 0.2	0.6 ± 0.1	5.7 ± 0.3	4.1 ± 0.1

Por otro lado, sí existieron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las concentraciones de MT durante ambas fases (valores promedio en la tabla 5), lo que indica que en efecto existe una retención de las especies grandes de fitoplancton en la malla de 63 μm pero que estas diferencias no fueron

reflejadas en la MO debido al bajo porcentaje con que ésta fracción contribuye a la MT, lo que probablemente se debe a un sesgo propio de la técnica de pérdida por combustión, como se explicará a detalle más adelante.

Hay que aclarar que la retención de organismos del fitoplancton en la malla utilizada en el prefiltrado en el campo, se debe al solapamiento de tallas entre éste y el zooplancton en el lago Alchichica, por la presencia de diatomeas de gran tamaño (*C. alchihicana* $\geq 50 \mu\text{m}$ de diámetro) y cianobacterias filamentosas (*N. spumigena* $> 63 \mu\text{m}$ de longitud).

7.3. Tripton (MI)

La MI fue la fracción que contribuyó en mayor medida a la MT (en promedio (n=390) $79 \pm 2.2\%$) durante todo el periodo de estudio, contrario a lo esperado de acuerdo a lo reportado por otros estudios y a lo establecido en la hipótesis 3, donde la MO es la fracción dominante del seston (Brzáková et al., 2003; Hessen et al., 2003; Punning et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999; Callieri, 1997; Wetzel, 1972).

Debido a las diferencias entre lo referido en la literatura y lo encontrado en Alchichica, se concluyó que podría haber una sobreestimación de MI derivado del método utilizado (i.e., pérdida por combustión). En éste, la materia orgánica combustible se volatiliza a los 550°C (Chung et al., 2004), sin embargo, el sílice biogénico (p.e. frústulas de diatomeas) no se volatiliza a esa temperatura por lo que permanece en el filtro y es considerada como parte de la fracción inorgánica. Las frústulas de ningún modo pueden ser consideradas como materia inorgánica por su origen biológico.

En el caso de los estudios de Callieri (1997) y Callieri et al. (1986), donde la MI fue la fracción que contribuyó con el menor porcentaje al seston, los valores de ésta fueron calculados sustrayendo a los valores totales de seston, los valores de COP multiplicados por un factor de dos, como lo sugiere Lenz (1977), de modo que no se estableció la composición de la MI en sus muestras.

Tanto las observaciones al microscopio óptico invertido (Anexo A) como al MEB (Anexo B) mostraron la predominancia ($\approx 90\%$) tanto de frústulas como de diatomeas en todas las muestras observadas, lo que confirma que, en este caso, que la MI está predominantemente compuesta por sílice biogénico. Esto constituye un sesgo en los valores obtenidos de MI. Este sesgo puede considerarse como constante a lo largo del periodo de estudio, ya que como lo reportó Lugo (2000), al menos dos especies de diatomeas (*C. alchichicana* y *Chaetoceros elmorei*) pueden considerarse como constantes (con base en su frecuencia y abundancia) en el lago Alchichica, además de que como lo apuntan Oliva et al. (2001) las especies antes mencionadas junto con la diatomea *C. choctawhatcheana* contribuyen significativamente a la biomasa del fitoplancton.

La MI en un sentido estricto estuvo conformada por trozos de vidrio volcánico (A7 y A8), cuya abundancia fue muy escasa en todas las muestras observadas.

Debido a lo anterior, en adelante se hará referencia a la fracción tomada como inorgánica por el método de pérdida por combustión, como sílice biogénico más materia inorgánica (SI_{BIO+MI}).

El SI_{BIO+MI} presentó concentraciones de 0.6 a 8.6 mg l⁻¹ (promedio (n=390) 4.6 \pm 1.9 mg l⁻¹). En la estratificación, los valores promedio (n=270) de MT

fueron de $1.7 \pm 0.9 \text{ mg l}^{-1}$ (septiembre 2004) a $7.9 \pm 1.3 \text{ mg l}^{-1}$ (noviembre), mientras que durante la circulación las concentraciones promedio ($n=120$) tuvieron un intervalo de $3.3 \pm 1.4 \text{ mg l}^{-1}$ (diciembre) a $6.4 \pm 1.0 \text{ mg l}^{-1}$ (enero) (Tabla 6).

En el perfil vertical (Fig. 6), las concentraciones promedio fueron similares en las tres capas (epilimnion, metalimnion e hipolimnion) con intervalos de $1.2 \pm 0.5 - 7.7 \pm 1.4 \text{ mg l}^{-1}$, $2.1 \pm 0.9 - 7.2 \pm 2.3 \text{ mg l}^{-1}$ y $1.8 \pm 0.7 - 7.8 \pm 1.3 \text{ mg l}^{-1}$ respectivamente.

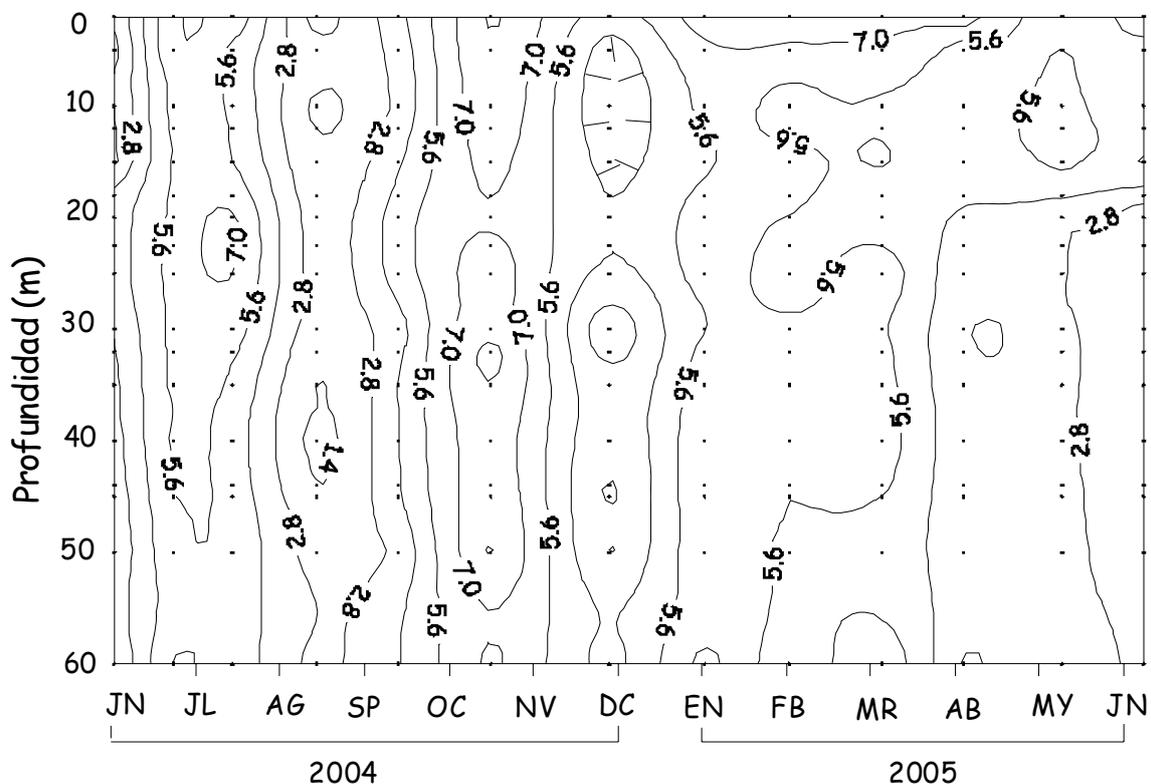


Figura 6. Diagrama profundidad-tiempo de isopletas de concentración de SI_{BIO+MI} -fracción inorgánica del seston- (mg l^{-1}) en el Lago Alchichica. Los puntos muestran las profundidades de colecta en cada mes.

El comportamiento del SI_{BIO+MI} fue similar al de la MT, particularmente hasta antes de la estratificación temprana en la cual el aporte de la MO aumenta. En algunos meses, durante la estratificación se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las concentraciones promedio de

$SI_{\text{BIO}+\text{MI}}$ entre el epilimnion y metalimnion con relación al hipolimnion. Sólo en un caso se presentó diferencia significativa ($p < 0.05$) entre el metalimnion y las otras dos capas (agosto).

De manera general, en Alchichica se observó un patrón similar a la MT tanto en la vertical como a lo largo del tiempo en las concentraciones promedio de $SI_{\text{BIO}+\text{MI}}$ (Fig. 6, Tabla 6). Se presentaron los tres primeros máximos reconocidos para la MT separados por sus respectivos mínimos (Fig. 7) así como la misma diferenciación entre estratos (epi, meta e hipolimnion) delineada tanto para la MT como para la MO.

Callieri (1997) y Callieri et al. (1986), encontraron una disminución de los valores de MI en el epilimnion durante el invierno asociada a la baja producción de ésta época; sin embargo, en el presente estudio se encontraron valores bajos sólo en diciembre (Tabla 6), seguidos de aumentos importantes en las concentraciones promedio de $SI_{\text{BIO}+\text{MI}}$. Estos incrementos coincidieron con el florecimiento de diatomeas típico de la época de circulación (Oliva et al., 2001; Lugo, 2000). No fue sino hasta finales de primavera, en plena estratificación, cuando las concentraciones de $SI_{\text{BIO}+\text{MI}}$ comenzaron a disminuir en la columna de agua.

En el perfil vertical (Figs. 6 y 7, Tabla 6) se observa que durante la mayor parte del periodo de estudio, las concentraciones de $SI_{\text{BIO}+\text{MI}}$ son en general homogéneas -no difieren significativamente- a lo largo de la columna de agua. Al igual que para la MT, solo a partir de la estratificación temprana se observa un patrón en el cual las menores concentraciones se encuentran en el hipolimnion.

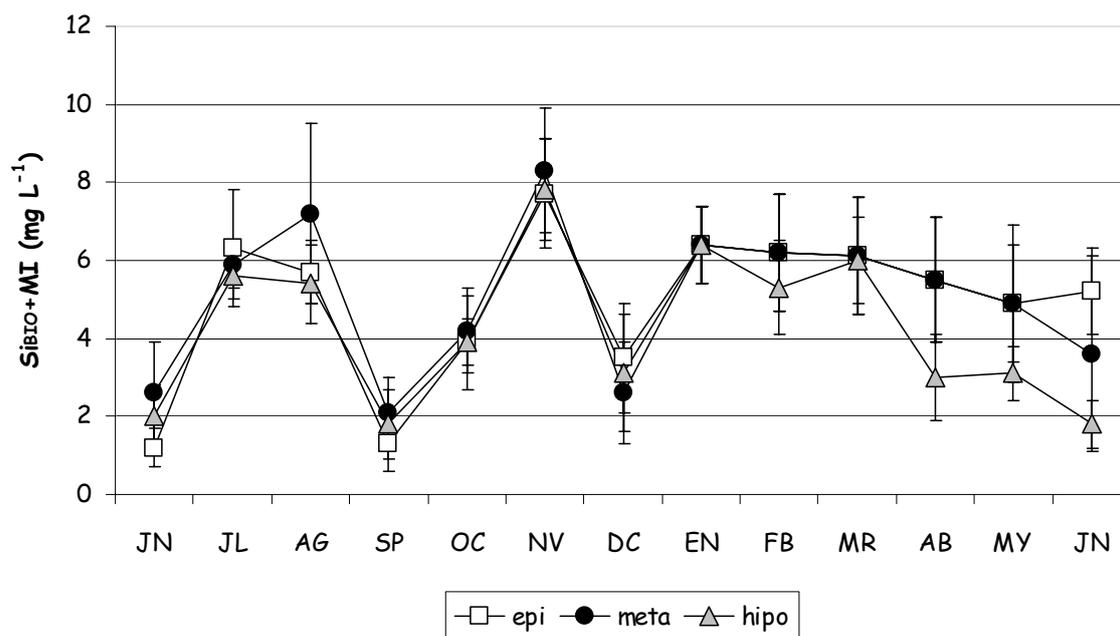


Figura 7. Variación temporal de la concentración de Si_{BIO+MI} -fracción inorgánica del seston- (promedio ± 1 desviación estándar) ($n=390$) de los diferentes estratos en la columna de agua del lago Alchichica.

Por otro lado, las concentraciones de SI_{BIO+MI} encontradas en Alchichica son mayores a las concentraciones de MI reportadas en dos lagos italianos oligomesotróficos ($< 0.1-2.0 \text{ mg l}^{-1}$, Callieri, 1997; $0.05-0.9 \text{ mg l}^{-1}$, Callieri et al., 1986): Estas diferencias, sin embargo, se deben seguramente a la diferencia de técnicas para obtener la fracción inorgánica.

Como fue establecido en la hipótesis 3, se esperaba encontrar una relación entre la concentración de la fracción inorgánica (como proxy del CIP), el viento y la precipitación debido a que en diversos estudios se ha encontrado que las altas concentraciones de carbono inorgánico particulado (CIP) están asociadas a la entrada de material alóctono ya sea por precipitación pluvial y/o por arrastre por viento (Callieri et al., 1986; Wetzel, 1983).

Tabla 6. Concentración promedio (± 1 d.e.) (n=390) de SI_{BIO+MI} -fracción inorgánica del seston- ($mg\ l^{-1}$) de los diferentes estratos en la columna de agua del lago Alchichica, México. (Epi = epilimnion, Meta = metalimnion, Hipo = hipolimnion). (Misma letra (a) indica que no hubo diferencia significativa $p < 0.05$ entre capas. Letras diferentes (b y c) indican una diferencia significativa, $p < 0.05$ entre capas) (Los valores en negritas son la concentración promedio más alta de cada mes).

Capa	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC	EN	FB	MR	AB	MY	JN
Epi	1.2b ± 0.5	6.3a ± 1.5	5.7a ± 0.8	1.3a ± 0.7	3.9a ± 1.2	7.7a ± 1.4	3.5a ± 1.4	6.4 ± 1.0	6.2a ± 1.5	6.1a ± 1.5	5.5a ± 1.6	4.9a ± 1.5	5.2a ± 1.1
Meta	2.6a ± 1.3	5.9a ± 0.6	7.2b ± 2.3	2.1a ± 0.9	4.2a ± 1.1	8.3a ± 1.6	2.6a ± 1.3					4.9a ± 2.0	3.6a ± 2.5
Hipo	2.0a ± 0.8	5.6a ± 0.6	5.4a ± 1.0	1.8a ± 0.9	3.9a ± 0.6	7.8a ± 1.3	3.1a ± 1.5		5.3a ± 1.2	6.0a ± 1.1		3.0a ± 1.1	3.1b ± 0.7
Columna	1.9 ± 1.0	6.0 ± 1.1	5.9 ± 1.4	1.7 ± 0.9	3.9 ± 0.9	7.9 ± 1.3	3.3 ± 1.4	6.4 ± 1.0	5.7 ± 1.4	6.0 ± 1.4	4.3 ± 1.9	4.0 ± 1.6	3.2 ± 1.9

En el caso del viento, no se encontró un patrón claro (Fig. 8) que indicara que éste induce la entrada de materia inorgánica al lago. La mínima cantidad de materia inorgánica alóctona observada tanto a microscopio óptico como a MEB (trozos de vidrio volcánico) confirma la poca importancia de la exportación de materia inorgánica al lago.

Estos resultados son especialmente interesantes al considerar que la zona donde se ubica el lago Alchichica es semiárida y no hay vegetación frondosa que proteja el substrato de la erosión eólica o pluvial, además de que a lo largo del periodo de estudio se observaron grandes cantidades de polvo caer al lago. Esto indica que la cantidad de material inorgánico exportado al lago no es de la magnitud esperada.

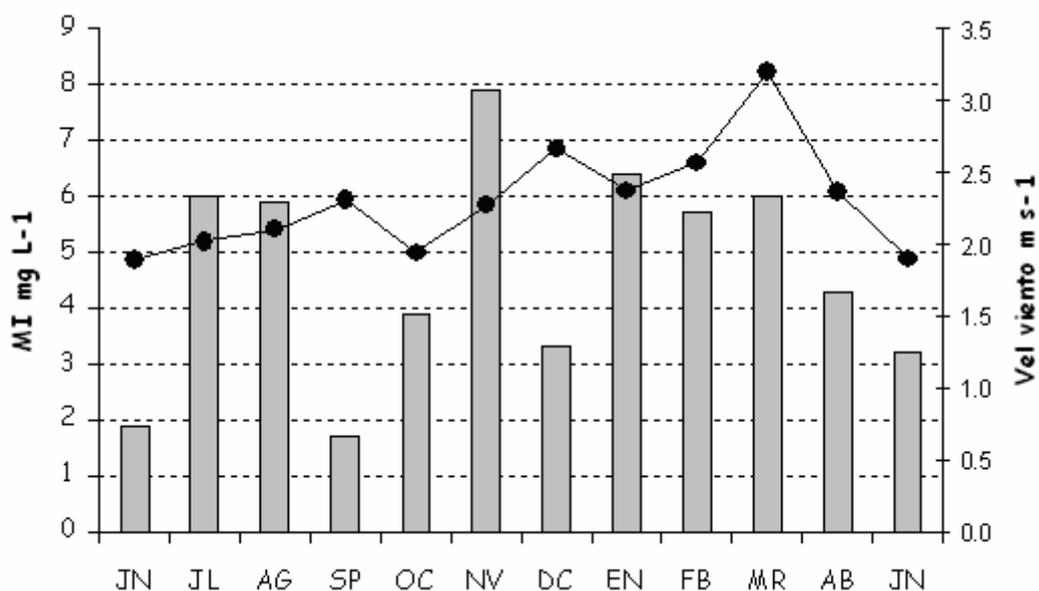


Fig. 8. Concentración promedio (n=390) de $SI_{BIO}+MI$ (barras) y velocidad promedio (n=8760) del viento (línea) en el lago Alchichica.

En el caso de la precipitación tampoco se encontró un patrón claro que mostrara que ésta introduce material inorgánico al lago (Fig. 9). Dado que el lago Alchichica se ubica en una zona seca donde las precipitaciones son escasas y la

microcuenca del mismo es de tamaño reducido, al parecer la lluvia no tiene un efecto visible sobre la cantidad de materia inorgánica que puede ser arrastrada al lago, de manera que se puede descartar a la lluvia como una fuente importante de material alóctono.

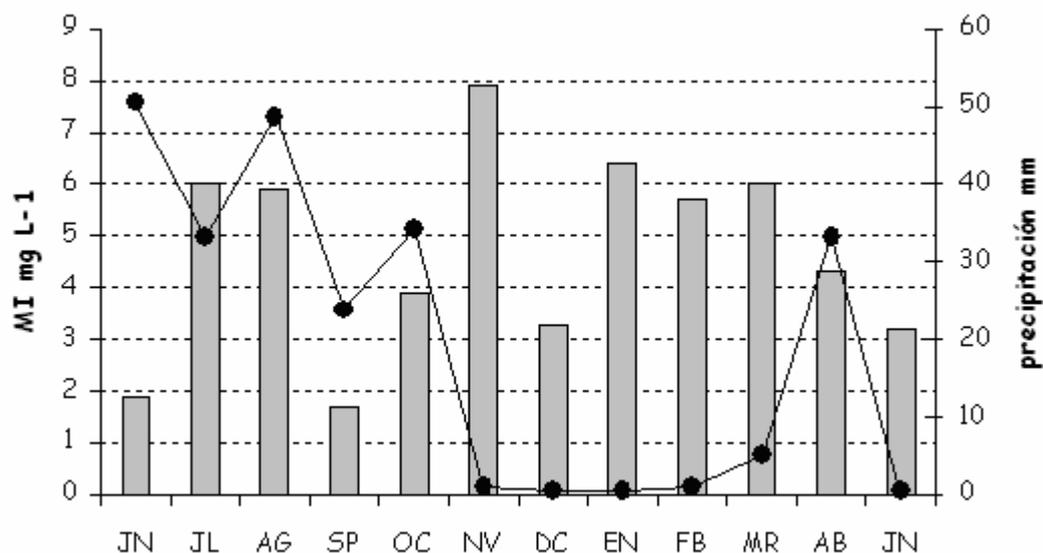


Fig. 9. Concentración promedio (n=390) de $SI_{BIO}+MI$ (barras) y precipitación pluvial acumulada (línea) en el lago Alchichica.

7.4. Proporciones MT:clor *a* y MO:clor *a*

La clor *a* presentó concentraciones que variaron ampliamente en un intervalo de 0.3 a 35.0 $\mu\text{g l}^{-1}$ con un promedio (n=390) de $2.6 \pm 3.6 \mu\text{g l}^{-1}$, lo cual ratifica las características oligotróficas del lago previamente establecidas para Alchichica por diversos autores (p. e. Alcocer et al., 2000).

En el perfil vertical (Fig. 10), las mayores concentraciones promedio de clor *a* se presentaron a lo largo de la columna de agua durante la circulación (n=120), así como en el metalimnion durante el periodo de estratificación (n=58), conformando el máximo profundo de clorofila (DCM por sus siglas en inglés).

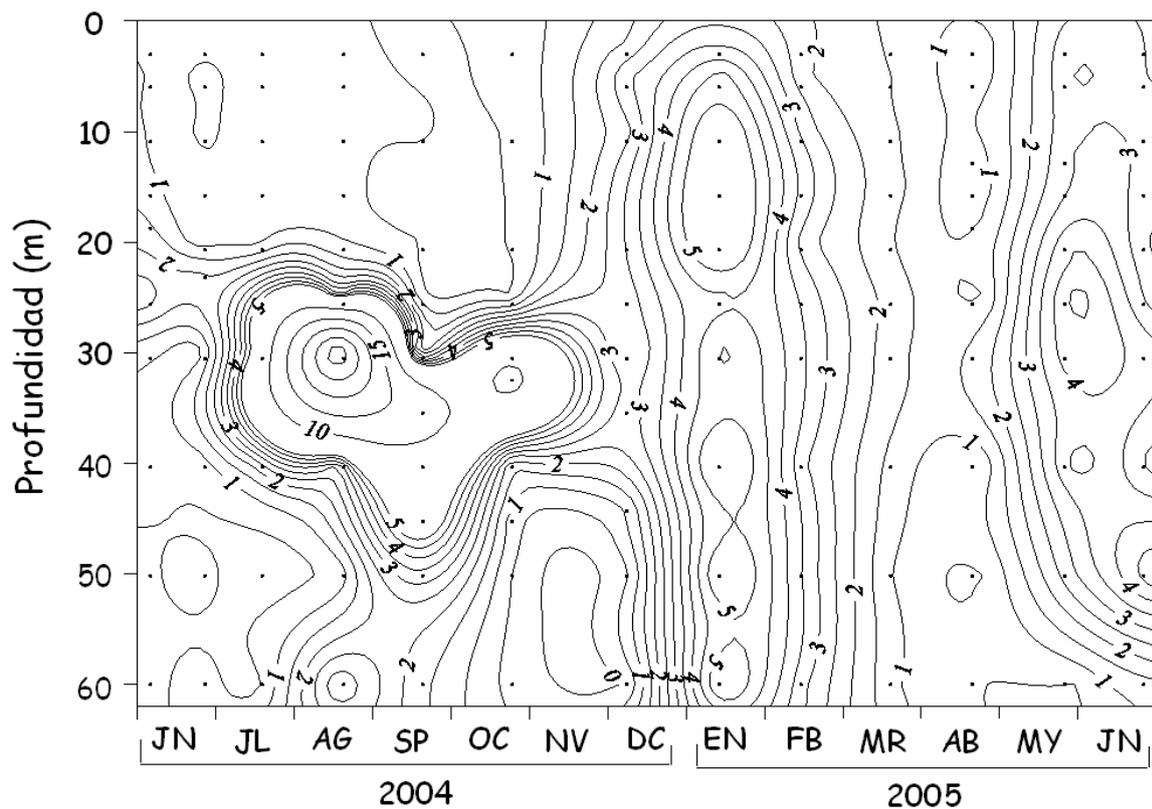


Figura 10. Diagrama profundidad-tiempo de isopletas de concentración de clorofila a ($\mu\text{g l}^{-1}$) en el lago Alchichica. Los puntos muestran las profundidades de colecta de cada mes.

En cuanto a la influencia del fitoplancton sobre las concentraciones de MT en las diferentes épocas del lago (aguas claras y aguas turbias), los análisis de correlación entre la MT y la clor a no indicaron una correlación significativa entre ambas (Fig. 11), con la única excepción del mes de junio de 2004 ($p < 0.05$), donde las concentraciones promedio ($n=390$) de MT se encontraron entre las más bajas medidas durante todo el periodo de estudio (Tabla 2), coincidiendo con valores bajos en la concentración promedio ($n=390$) de clor a ($1.3 \pm 0.7 \mu\text{g l}^{-1}$). Sin embargo, la falta de correlación entre ambos parámetros resulta contrario a lo esperado, ya que en diversos estudios se ha encontrado un comportamiento estacional claro (Brzákóvá et al., 2003; Punning et al., 2003; Jellison y Melack, 2001; Järvinen et al., 1999; Callieri, 1997; Wetzel, 1972), con las mayores concentraciones de seston durante la fase de aguas turbias y las concentraciones más bajas en la fase de aguas claras.

La falta de correlación entre la dinámica del fitoplancton y de la MT puede obedecer a la baja proporción con que contribuye la fracción orgánica (MO) al total de seston en el lago Alchichica ($20 \pm 14 \%$).

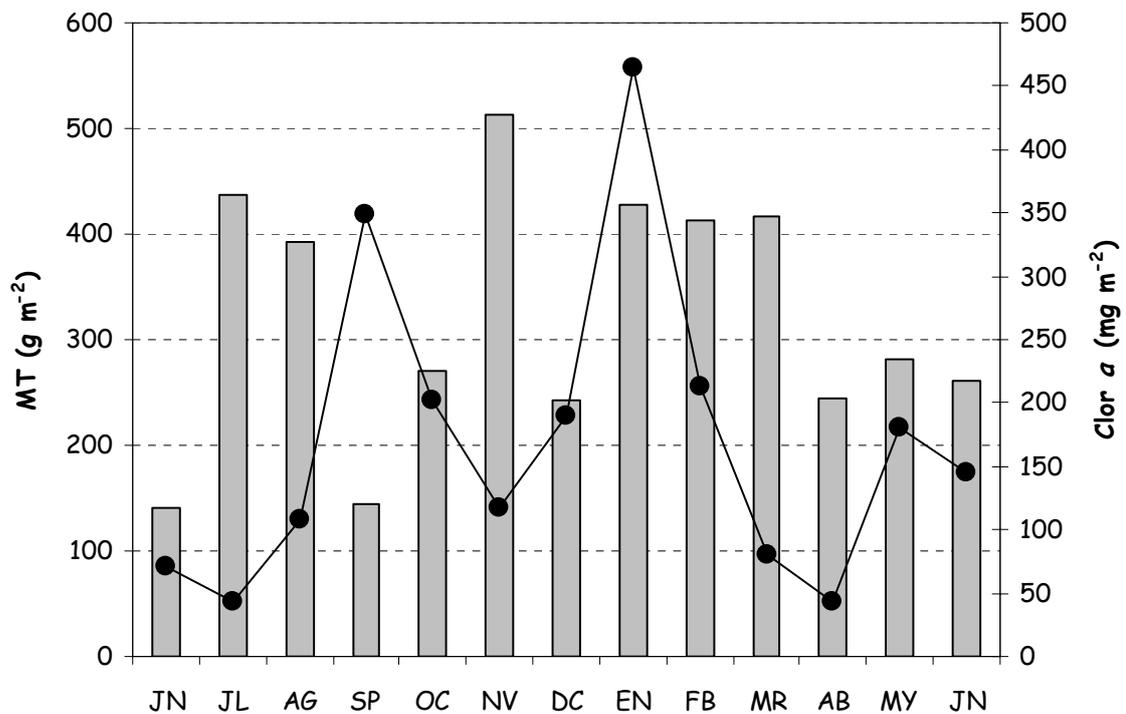


Fig. 11. Valores integrados en la columna de agua de MT del seston (barras) y clorofila *a* (línea) del Lago Alchichica.

Tampoco se encontró una correlación significativa ($p < 0.05$) entre la clorofila *a* y la MO (Fig. 12). Hessen et al. (2003) sugieren que el fitoplancton puede constituir menos del 40% de la MO (medida como COP) y que, en cambio, >50% de ésta puede ser detrito originado en el lago, lo que podría explicar la falta de correlación entre la clor *a* y la MO. Sin embargo, se necesita hacer una evaluación profunda del detrito y su distribución en el lago Alchichica, para determinar su importancia en el seston, debido a que las observaciones directas del seston mostraron una baja cantidad de detrito presente.

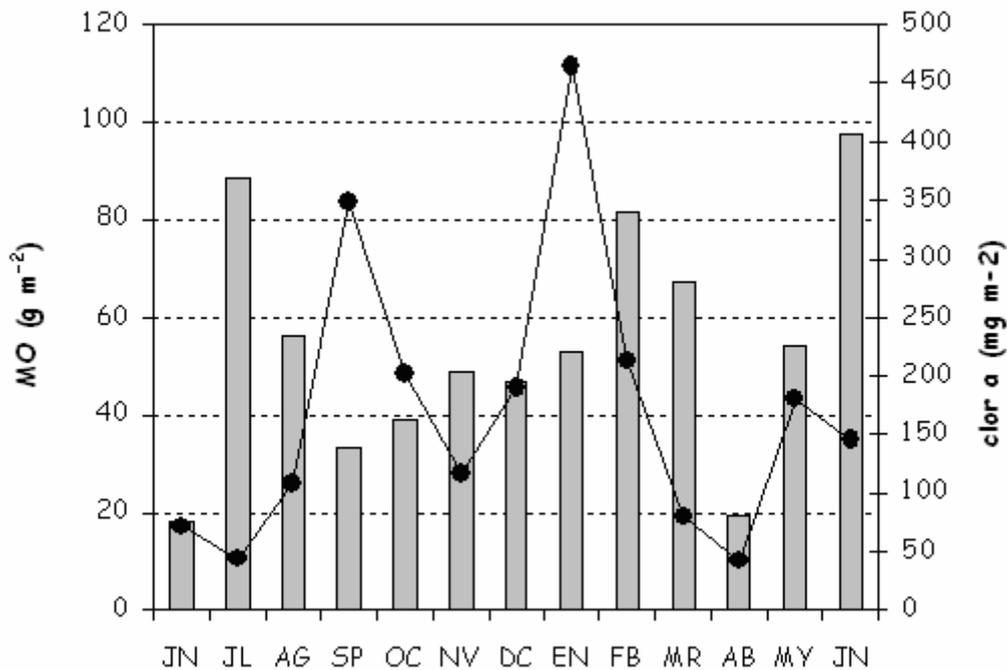


Fig. 12. Valores integrados en la columna de agua de MO del seston (barras) y clorofila *a* (línea) del Lago Alchichica.

7.5. Identificación de los componentes que integran el seston

Las observaciones hechas tanto en MEB como en microscopía óptica, evidenciaron la presencia constante de diatomeas y sus restos (frústulas), tanto a lo largo del periodo de estudio, como a lo largo de la columna de agua (Anexos A y B). Las especies encontradas de diatomeas fueron *Cyclotella alchichicana*, *Cyclotella choctawhatcheeana* y *Chaetoceros elmorei*.

Otros elementos del fitoplancton observados bajo microscopía óptica, fueron la clorofita *Monoraphidium minutum* y algunas cianobacterias coloniales (A4) También fueron observados un sinnúmero de restos cuyo estado impidió su identificación; sin embargo, con base en su apariencia, se puede asumir que dichos restos son de origen vegetal (A5 y A6). Como ya se mencionó anteriormente, la materia inorgánica "típica" estuvo compuesta por trozos de vidrio volcánico, que fueron muy escasos ($\leq 1\%$) en todas las muestras revisadas (A7 y A8), confirmando que el alto porcentaje de MI obtenido en este estudio es

producto de sesgos debidos a la metodología (sílice biogénico (frústulas) considerado como MI).

Dada la apertura nominal de poro de los filtros utilizados en este trabajo (0.7 μm) y de que las muestras fueron prefiltradas a través de una malla de 63 μm , se esperaba encontrar partículas de seston en un intervalo de tamaño $\geq 0.7 \mu\text{m}$ a $\leq 63 \mu\text{m}$. En general, las partículas observadas y medidas (bajo MEB) presentaron un tamaño en el intervalo mencionado (Tabla 7), a excepción de algunos agregados de materia inorgánica (AMI) (ver Anexo B) que midieron $>60 \mu\text{m}$. Estas partículas no fueron observadas en las muestras sedimentadas, por lo que se concluyó que se formaron durante el proceso de secado de las mismas a partir de las sales disueltas retenidas en los filtros. Lo anterior confirmó la necesidad de enjuagar las muestras después del proceso de filtración, a pesar de lo recomendado por otros autores (p.e. Karl et al. 1991).

Tabla 7. Tamaño promedio (n=10) de los tipos diferentes de partículas más comunes en el seston del lago Alchichica. (Medidas determinadas en fotografías al MEB).

Partícula	Tamaño (μm)
<i>Cyclotella alchichicana</i>	50 \pm 2
<i>Cyclotella choctawhatcheeana</i>	11 \pm 2
<i>Chaetoceros elmorei</i>	7 \pm 1
AMI	34 \pm 52

Las partículas encontradas coinciden en tamaño con las reportadas por Callieri (1997) (<10 μm a $>50 \mu\text{m}$) en un lago con características tróficas similares (oligo-mesotrófico) a las de Alchichica.

8. CONCLUSIONES

Las concentraciones de MT presentaron un comportamiento errático sin un patrón definido tanto vertical como temporalmente. Es probable que la falta de coincidencia entre la zona productiva y las mayores concentraciones de MT se debiera al bajo porcentaje con que contribuyó la MO a la MT.

Las mayores concentraciones de MO se encontraron dentro de la zona productiva (Z_{EU}) del lago tal y como se esperaba; el largo periodo de estratificación del lago favorece que la MO permanezca dentro de la Z_{EU} . El Si_{BIO+MI} presentó de manera general una distribución sin un patrón definido tanto en el tiempo como en la vertical.

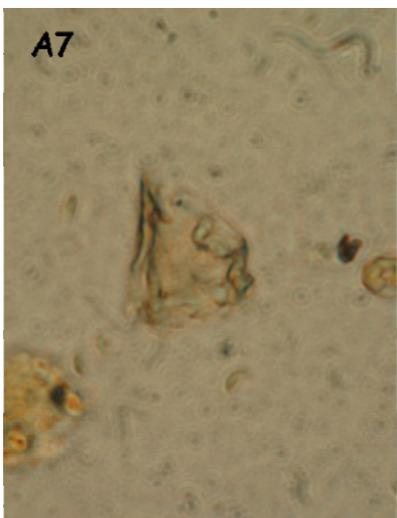
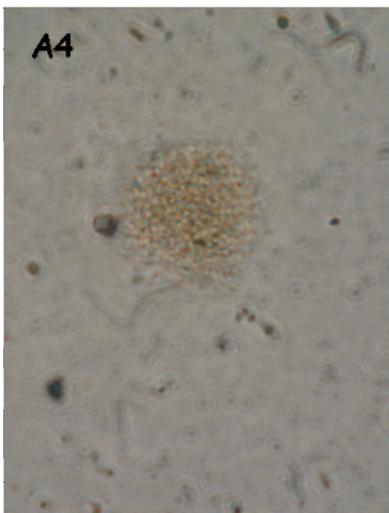
El viento y la lluvia fueron descartados como factores de importancia en la distribución vertical y temporal de la MI al no encontrarse relación alguna entre la presencia de ambos sobre la concentración de MI en el lago Alchichica. A pesar de las características semiáridas de la zona en la que se localiza el lago Alchichica, el material inorgánico exportado no se presentó en una magnitud considerable.

Los valores encontrados de clor *a* confirmaron la condición oligotrófica del lago Alchichica previamente reportada por otros autores. Las mayores concentraciones se encontraron durante la época de circulación y se identificó un máximo profundo de clorofila en el metalimnion persistente durante la estratificación.

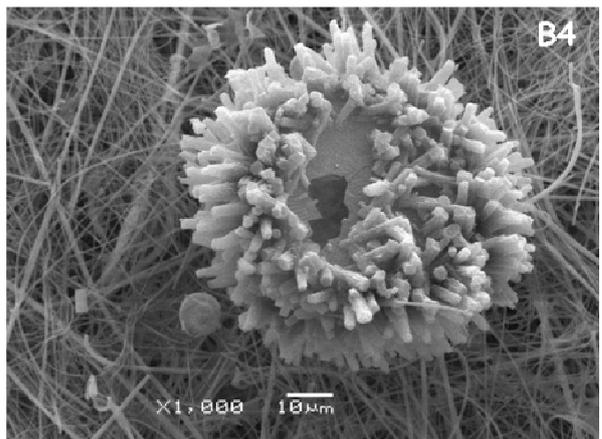
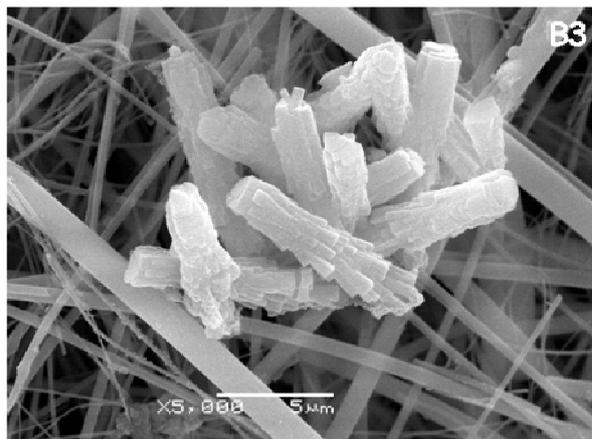
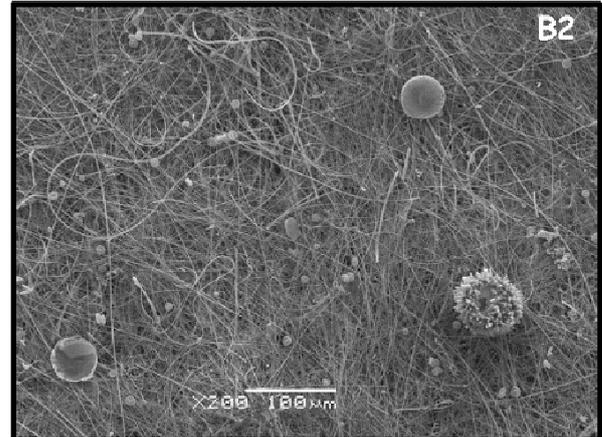
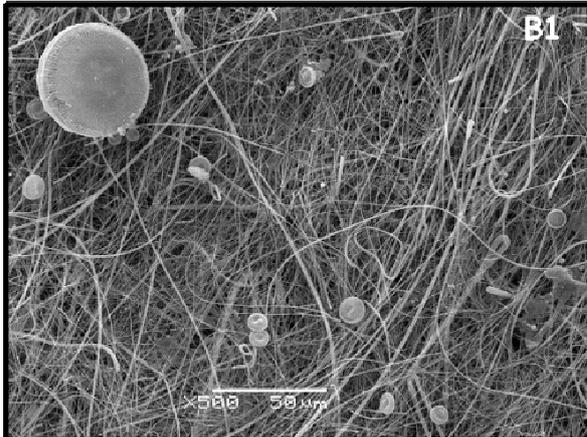
A diferencia de lo esperado (valores altos durante la fase de aguas turbias y valores bajos en la fase de aguas claras), no se encontró una

correlación significativa ($p < 0.05$), ni en la proporción MT: clor *a* ni en la MO: clor *a*, indicando la poca influencia de la biomasa fitoplanctónica sobre ambas fracciones. Esto puede obedecer a: a) la sobreestimación de la MI y MT por efecto de la técnica de pérdida por combustión, y/o b) a la predominancia del detrito sobre el fitoplancton en la MO tal y como ha sido reportado en otros trabajos.

Anexo A. Fotografías de seston del lago Alchichica en microscopio invertido (100x). (A1 = *Cyclotella alchichicana*, A2 = *Chaetoceros elmorei*, A3 = *C. alchichicana* y *C. choctawhatcheeana*, A4 = colonia de picocianobacterias, A5 y A6 = restos de origen vegetal, A7 y A8 = fragmentos de vidrio volcánico).



Anexo B. Fotografías del lago Alchichica al microscopio electrónico de barrido. (B1 y B2 = *Cyclotella alchichicana* y *Cyclotella choctawhatcheana*, B3 y B4 = agregados de materia inorgánica (AMI) formados durante el proceso de secado de la muestra).



Anexo C. Recomendaciones metodológicas para el análisis del seston.

Las técnicas para la obtención de las muestras y su posterior filtración para el estudio del seston, a pesar de ser ampliamente aplicadas, están lejos de estar estandarizadas como lo menciona Baudo (1982). Adicionalmente, en la gran mayoría de los trabajos publicados al respecto no se describe al detalle la metodología empleada lo cual dificulta el obtener resultados confiables ya que, como se muestra a continuación, existen un sinnúmero de pormenores que surgen a lo largo de la metodología que no son mencionados en ningún libro o artículo. De esta forma y con el fin de que esta descripción detallada allane el camino de otros que quieran realizar estudios de seston en aguas continentales, se presentan a continuación diversas modificaciones que sobre el esquema general de las técnicas se realizaron, así como algunas recomendaciones que son de utilidad.

Una vez obtenidas las muestras de agua con una botella muestreadora se debe remover los componentes mayores del zooplancton ("large swimmers") -que por no estar suspendidos o en sedimentación no forman parte del seston- como recomiendan diversos autores (e.g., Brzáková et al., 2003; Jellison y Melack, 2001). Aquí viene la primera decisión importante con relación al tamaño de malla a utilizar ya que en ningún trabajo se indica la malla utilizada, solo que se retiraron los "swimmers". En este trabajo se eligió un malla de 63 μm de apertura, ya que estudios previos sobre el zooplancton del lago (p.e., Lugo, 2000) indicaban que esta apertura de malla retendría una parte significativa del zooplancton. Sin embargo, como ya se mencionó en la sección de resultados y discusión, en Alchichica existe un solapamiento de tallas entre el fito y el zooplancton, que origina una subestimación del fitoplancton grande y por tanto de la fracción orgánica

(MO) del seston, por lo que para estudios posteriores se optó por una malla de 100 μm de apertura.

Una vez con las muestras en el laboratorio, se procedió a la separación del seston por filtración. La elección del tipo de membrana siguió los criterios más aplicados y consistió en filtros Whatman tipo GF/F, (con apertura de poro nominal de 0.7 μm). La elección del diámetro de los mismos (47mm) obedeció a fines prácticos ya que por presentar una mayor área de filtración se retrasa la obstrucción de los poros al momento de la filtración y se disminuye la posibilidad de perder material por lisis celular al aumentar la presión de vacío. En cuanto al tratamiento previo que se le dio a los filtros, se fijó una temperatura de 500°C para la precombustión atendiendo a las recomendaciones de Wetzel y Likens (2000); el tiempo de precombustión (4 horas) se estableció como una media de los tiempos reportados en otros trabajos que varía desde dos hasta 24 horas.

El volumen inicial de filtración (250 a 500 ml) se fijó con base en las recomendaciones de Wetzel y Likens (2000), sin embargo éste varió de acuerdo a la cantidad de seston presente en las diferentes épocas del lago lo cual se aprecia a través de la coloración que va obteniendo el filtro conforme se adiciona mayor volumen de agua. Sin embargo, es importante hacer notar que al hacer el análisis de los primeros datos, se encontró que las cantidades medidas de seston utilizando una balanza analítica, estaban apenas por encima del límite de detección de la misma, por lo que se elevó el volumen de filtración a 500-1000 ml para garantizar una adecuada evaluación del peso.

Cuando se va a iniciar la filtración, se recomienda tener mucho cuidado en la manipulación de la muestra, ya que como lo apunta Karl (1991),

una agitación excesiva de la misma puede ocasionar tanto el rompimiento de partículas, como la formación de nuevas. Sin embargo, observaciones en el laboratorio evidenciaron la rápida sedimentación de algunas partículas dentro de la muestra, por lo que durante el periodo de estudio se realizó la homogenización de cada muestra mediante una agitación suave justo antes de vaciarla en el aparato de filtración.

La obtención de la masa total del seston (MT) a través de métodos gravimétricos ha sido reportada en estudios similares al presente (e.g. Callieri, 1997; Callieri et al., 1986) siguiendo el mismo esquema aquí descrito. Para el éxito de este sencillo método es importante atender sobretodo a las recomendaciones de temperatura a la que se deben secar los filtros antes de pesarlos (50°C). Durante la fase exploratoria del presente trabajo, los filtros con las muestras fueron secados en un horno a una temperatura de entre 65 y 70°C, dando como resultado que los filtros se adhirieran a la cubierta de papel aluminio y se rompieran al tratar de despegarlos, perdiendo una cantidad importante de material.

Por otro lado, la obtención de las fracciones orgánica e inorgánica del seston (MO y MI) a través del método de pérdida por combustión (LOI por sus siglas en inglés) no es de amplio uso en estudios de seston, incluso algunos autores (e.g., Karl, 1991) no lo recomiendan por la problemática que implica la separación de ambas fracciones tan sólo con base en la temperatura. Sin embargo, se pensó que éste método podía ofrecer una buena aproximación de las proporciones con que la materia orgánica y la inorgánica contribuyen a la MT, sobretodo en un estudio de índole exploratoria como el presente. También se tomó en cuenta lo reportado por Chung et al. (2004) quienes mencionan que el método de pérdida por

combustión es efectivo en la separación de la materia orgánica combustible. Sin embargo y como ya se explicó en la sección de resultados y discusión, la presencia de cantidades importantes de sílice biogénico llevó a sobreestimar la MI a través de esta técnica. Por lo anterior, es que en la mayoría de los estudios la MO se evalúa como carbono orgánico particulado (COP) a través de análisis elemental, el sílice biogénico a través del método de digestión con NaOH/HF y la MI como carbono inorgánico particulado.

La identificación de los componentes del seston mediante observaciones al microscopio electrónico de barrido (MEB) se llevó a cabo concentrando el seston en filtros GF/F siguiendo el mismo proceso de filtración y secado. Sin embargo, las fotografías obtenidas hicieron evidente la interferencia de las fibras que forman los filtros al observar los componentes del seston, por lo que el uso de membranas de policarbonato resulta ser más adecuado.

Finalmente, se sugiere realizar algunas pruebas como las que se indican a lo largo del manuscrito (A.- Analizar muestras sin prefiltrado en campo contra muestras prefiltradas para evaluar el posible efecto del solapamiento de tallas entre el fitoplancton y el zooplancton sobre los valores de la MT y la MO. B.- Evaluar los efectos del viento sobre la distribución del seston en la capa de mezcla a diferentes horas del día. C.- Analizar regularmente filtros blanco para detectar posibles interferencias en las muestras - en este caso sales -) con el fin de reconocer posibles fuentes de error en la valoración del seston en aguas epicontinentales.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Adame, M.F., 2004. Fracciones de talla de fitoplancton en un ecosistema limnético tropical en el lago Alchichica, Puebla. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Alcocer, J. y A. Lugo, 2003. Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, Central Mexico. *Geofísica Internacional* 42(3): 523-528.
- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M.R. Sánchez y G. Vilaclara, 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologiae* 27: 3166-3169.
- Arredondo-Figueroa, J.L., L.E. Borrego, R.M. Castillo y M.A. Valladolid, 1983. Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biótica* 8: 37-47.
- Baudo, R., 1982. The chemical analysis of particulate matter. *Trends in analytical chemistry* 1:393-397.
- Bertoni, R., 1978. Short-term variations of particulate organic carbon concentrations in natural waters and possible relations with bacterial activity. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* 36: 321-329.
- Bertoni, R. y C. Callieri, 1981. Underwater transmittance as a tool in the study of spatial distribution of particulate organic matter. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologiae* 21: 120-124.
- BrzÁková, M., J. Hejzlar y J. Nedoma, 2003. Phosphorus uptake by suspended and settling seston in a stratified reservoir. *Hydrobiologia* 504:39-49.

- 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.
- Callieri, C., R. Bertoni y M. Contesini, 1986. Settling rates of particulate matter in Lago di Mergozzo (Northern Italy). *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* 44: 147-164.
- Chung, Y., H.C. Chang y G. W. Hung, 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.
- Eckert, W., J. Didenko, E. Uri y D. Eldar, 2003. Spatial and temporal variability of particulate phosphorus fractions in seston and sediments of Lake Kinneret under changing loading scenario. *Hydrobiologia* 494:223-229.
- Filonov, A. y J. Alcocer, 2002. Internal waves in a tropical crater-lake: Alchichica, Central Mexico. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologiae* 28: 1857-1860.
- Filonov, A., I. Tereshchenko y J. Alcocer, 2006. Dynamic response to mountain breeze circulation in Alchichica, a crater lake in Mexico. *Geophysical Research Letters* 33, LO7404, doi: 10.1029/2006GL025901.
- García, E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. E. García, México.
- Hessen, D.O., T. Andersen, P. Brettum y B. A. Faafeng, 2003. Phytoplankton contribution to sestonic mass and elemental ratios in lakes: implications for zooplankton nutrition. *Limnology and Oceanography* 48: 1289-1296.
- Hicks, R.E., C.J. Owen y P. Aas, 1994. Deposition, resuspension and decomposition of particulate organic matter in the sediments of Lake Itasca, Minnesota, USA. *Hydrobiologia* 284: 79-91.

- Järvinen, M., K. Salonen, J. Sarvala, K. Vuorio y A. Virtanen, 1999. The stoichiometry of particulate nutrients in Lake Tanganyika - implications for nutrient limitation of phytoplankton. *Hydrobiologia* 407: 81-88.
- Jellison, R. y J.M. Melack, 2001. Nitrogen limitation and particulate elemental ratios of seston in hypersaline Mono Lake, California, U.S.A. *Hydrobiologia* 466: 1-12.
- Karl, D.M., 1991. Major bioelements. En Hurd, D.C. y D.W. Spencer (eds), *Marine particles: analysis and characterization*. American Geophysical Union, Washington DC: 33-42.
- Karl, D.M., J.E. Dore, D.V. Hebel y C. Winn, 1991. Procedures for particulate carbon, nitrogen, phosphorus and total mass analyses used in the US-JGOFS Hawaii ocean time-series program. En Hurd, D.C. y D.W. Spencer (eds), *Marine particles: analysis and characterization*. American Geophysical Union, Washington DC: 71-77.
- Lenz, J., 1977. Seston and its main components. En Rheinheimer, G. (ed), *Microbial ecology of a brackish water environment*. Ecological Studies 25, Springer Verlag.
- Lugo, A., 2000. Variación espacial y temporal de la estructura de la comunidad planctónica del lago de Alchichica, Puebla, con algunos aspectos de interacciones tróficas. Tesis de Doctorado en Ciencias. UNAM. México, D.F.
- Lugo, A.; M.E. González, M.R. Sánchez y J. Alcocer, 1999. Distribution of *Leptodiptomus novamexicanus* (Copepoda: Calanoida) in a Mexican hyposaline lake. *Revista de Biología Tropical* 47: 141-148.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Omega, Barcelona.
- Moran, S.B., M.A. Charette, S.M. Pike y C.A. Wicklund, 1999. Differences in seawater particulate organic carbon concentration in samples collected using small- and large- volume methods: the

importance of DOC adsorption to the filter blank. *Marine Chemistry* 67: 33-42.

- Oliva, M.G., A. Lugo, J. Alcocer y L. Peralta, 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiologia* 466: 299-306.
- Polat, S.C., S. Tugrul, Y. Çoban, O. Basturk e I. Salihoglu, 1998. Elemental composition of seston and nutrient dynamics in the Sea of Marmara. *Hydrobiologia* 363:157-167.
- Pujo-Pay, M. y P. Raimbault, 1994. Improvement of the wet-oxidation procedure for simultaneous determination of particulate organic nitrogen and phosphorus collected on filters. *Marine Ecology Progress Series* 105: 203-207.
- Punning, J.A., T. Jaanus, T. Koff y T. Alliksaar, 2003. Seasonal fluxes of particulate matter in a small closed lake in northern Estonia. *Water, Air, and Soil Pollution* 149:77-92.
- Sánchez, M., 2001. Variación de la Clorofila "a" fitoplanctónica y sus mecanismos de control en un lago atalasoalino tropical. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. México DF.
- Sánchez, S.R., 2006. Dinámica vertical y temporal de los nutrimentos (N, P y Si) en un lago monomíctico cálido tropical: Alchichica, Puebla, México. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. México, D.F.
- Sharp, J.H., 1991. Total mass and particulate carbon, nitrogen and phosphorus. En Hurd, D.C. y D.W. Spencer (eds), *Marine particles: analysis and characterization*. American Geophysical Union, Washington DC: 87-90.
- Sommer, U., 1989. Nutrient status and nutrient competition of phytoplankton in a shallow, hypertrophic lake. *Limnology and Oceanography* 34(7): 1162-1173.

- Vilaclara, G., M. Chávez, A. Lugo, H. González y M. Gaytán, 1993. Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla state, Mexico. *Verhandlungen Internationalis Vereinigung Limnologiae* 25: 435-440.
- Veronesi, M.L., A. Barbieri y K.W. Hanselmann, 2002. Phosphorus, carbon and nitrogen enrichment during sedimentation in a seasonally anoxic lake (Lake Lugano, Switzerland). *Journal of Limnology* 61: 215-223.
- Wetzel, R.G. 1983. *Limnology*. Saunders, San Diego.
- Wetzel, R.G. y G.E. Likens, 2000. *Limnological Analyses*. Springer, Nueva York.
- Wetzel, R.G., P.H. Rich, M.C. Miller y H.L. Allen, 1972. Metabolism of dissolved and particulate detrital carbon in a temperate hard-water lake. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* 29: 185-273.