

ELABORADO POR
ABYOLUIS ALBA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

12

FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ESTUDIO DE LA VARIACIÓN VERTICAL Y TEMPORAL
DE LAS COMUNIDADES FITOPLANCTÓNICAS
DURANTE EL FLORECIMIENTO DE CIANOFICEAS
EN EL LAGO CRÁTER ALCHICHICA, PUEBLA

287992

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (B I O L O G Í A)

PRESENTA:

MARÍA GUADALUPE OLIVA MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. ALFONSO LUGO VÁZQUEZ



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.

AGRADECIMIENTOS

Resulta difícil el poder expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra manera me apoyaron en la elaboración de este trabajo, por lo cual hago patente mi reconocimiento a toda la ayuda que me brindaron.

Especialmente agradezco al Dr. Alfonso Lugo Vázquez director de esta tesis sus conocimientos, experiencia, su dedicación y apoyo permanente e incondicional que ha permitido mi superación académica, así como la culminación de este trabajo y principalmente por su amistad.

A los miembros del Jurado, Dra. María del Rosario Sánchez Rodríguez, Dr. Javier Alcocer Durand, Dr. Enrique Arturo Cantoral Uriza, Dr. Gustavo Alberto Montejano Zurita, Dr. Samuel Gómez Aguirre y Dr. David Uriel Hernández Becerril, quienes por sus comentarios y sugerencias enriquecieron y mejoraron la versión final de este trabajo.

Al Dr. Jiri Komárek del Instituto de Botánica, Trebon., República Checa, Dra. Jaroslava Komárkova del Instituto de Hidrobiología, Academia de Ciencias República Checa, Dra. Nora Irene Maidana de la Universidad de Buenos Aires, Argentina y al Dr. Augusto Comas González del Laboratorio de Estudios Algológicos de Cienfuegos, Ministerio de Ciencia y tecnología del Medio Ambiente, Cuba, quienes durante su estancia en la Facultad de Ciencias, UNAM, me aportaron sus conocimientos y opiniones con relación a la taxonomía de cianofíceas, diatomeas y clorofíceas.

Al Dr. Rick W. Battarbee de la University College Londres, Inglaterra por sus comentarios durante su estancia en México, relacionados con la taxonomía del género *Cyclotella* y por el envío de bibliografía especializada a este respecto.

A la M. en C. Jaqueline Cañetas Ortega del Laboratorio de Microscopía Electrónica, Instituto de Física, UNAM, por su asesoría en la observación y obtención de micrografías de las diatomeas presentadas en este trabajo y por su amistad.

A los compañeros y amigos del Laboratorio de Limnología del Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente que me apoyaron y estimularon en todo momento.

A José Eduardo Cortés Pelagio por la elaboración de los dibujos.

Esta tesis fue realizada en el Laboratorio de Limnología del Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente-UIICSE, ENEP-Iztacala, UNAM y con el financiamiento del proyecto CONACYT 25430-T y del Proyecto DGAPA, UNAM IN2045-97 cuyo responsable fue el Dr. Javier Alcocer Durand.

CONTENIDO

RESÚMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS	13
3. ANTECEDENTES	14
4. ÁREA DE ESTUDIO	16
5. MATERIAL Y MÉTODO	19
5.1 Trabajo de campo	19
5.2 trabajo de laboratorio	20
5.3 Análisis de la información	23
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1 Biológicos	24
6.1.1 Riqueza específica	24
6.1.2 Lista sistemática	24
6.1.3 Dominancia	28
6.1.4 Descripción de especies dominantes	31
6.1.5 Descripción de especies temporales	40
6.1.6 Variación espacio-temporal	57
6.2 Variables físicas y químicas	65
6.2.1 Luz	65
6.2.2 Temperatura	67
6.2.3 Oxígeno disuelto	72
6.2.4 Potencial redox	76
6.2.5 pH	79
6.2.6 Conductividad específica (K_{25})	81
6.2.7 Nitrógeno como amoníaco ($N-NH_3$)	85
6.2.8 Nitrógeno como nitritos ($N-NO_2$)	88
6.2.9 Nitrógeno como nitratos ($N-NO_3$)	90
6.2.10 Ortofosfatos disueltos (PO_4^{-3})	93
6.2.11 Relación N:P	97
6.2.12 Clorofila <i>a</i>	101
6.2.13 Análisis de correlación	104
7. CONCLUSIONES	107
8. LITERATURA CITADA	109

FIGURAS Y TABLAS

Figuras

Figura 1. Florecimiento de <i>Nodularia spumigena</i>	12
Figura 2. Ubicación del área de estudio y de la estación de muestreo	17
Figura 3. Diagrama de frecuencia vs abundancia	28
Figura 4. <i>Cyclotella quillensis</i> Bailey 1922	45
Figura 5. <i>Chaetoceros elmorei</i> Boyer 1914	47
Figura 6. <i>Oocystis parva</i> W. y G.S. West 1898	49
Figura 7. <i>Oocystis submarina</i> Lagerheim 1886	49
Figura 8. a. <i>Chroococcus dispersus</i> (Keissl.) Lemmernann 1904 b. y c. <i>Synechocystis aquatilis</i> Sauv. 1892	51
Figura 9. <i>Nodularia spumigena</i> Mertens ex Bornet et Flahault 1886	53
Figura 10. a. <i>Cymbella mexicana</i> (Ehrenberg) Cleve 1894 b. <i>Monoraphidium minutum</i> (Näg.) Kom-Legn. 1969 c. <i>Merismopedia tenuissima</i> Lemmermann 1898	55
Figura 11. Variación porcentual de la composición del fitoplancton	58
Figura 12. Comparación de densidades entre <i>N. spumigena</i> y las especies más abundantes. marzo-abril 1995	59
Figura 13. Comparación de densidades entre <i>N. spumigena</i> y las especies más abundantes. mayo-septiembre 1995	60
Figura 14. Perfiles de penetración de la luz durante el florecimiento de <i>N. spumigena</i> 1995	66
Figura 15. Perfiles de temperatura y oxígeno 1995	68
Figura 16. Perfiles de potencial redox 1995	78
Figura 17. Intervalos de variación del pH por muestreo 1995	80
Figura 18. Intervalos de variación de la conductividad específica por muestreo 1995	82
Figura 19. Perfiles de concentración de N-NH ₃ 1995	86
Figura 20. Perfiles de concentración de N-NO ₂ 1995	89
Figura 21. Perfiles de concentración de N-NO ₃ 1995	91
Figura 22. Perfiles de concentración de PO ₄ 1995	95
Figura 23. Valores de la relación NO ₃ /PO ₄ por muestreo y profundidad 1995	100
Figura 24. Perfiles de concentración de clorofila <i>a</i> 1995	102

TABLAS

Tabla I. Presencia-ausencia de las especies de fitoplancton en cada muestreo	29
------------------------------------------------------------------------------	----

Tabla II. Comparación de la riqueza específica y el porcentaje por grupo de algas en lagos tropicales y salinos	30
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

APÉNDICE I. DESCRPCIÓN DE ESPECIES RARAS 123

Figura 1. a. b. y c. <i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i> (Ehrenberg) Grunow 1884	130
d. e. y f. <i>Gomphonema olivaceum</i> (Hornemann) Brébisson 1838	130
g. <i>Epithemia argus</i> (Ehrenberg) Kützing 1844	130
Figura 2. a. <i>Anomooneis</i> sp.	132
b. <i>Diploneis pseudovalis</i> Hustedt 1930	132
c. <i>Surirella striatula</i> Turpin 1828	132
d. <i>Gomphosphaeria</i> cf. <i>lacustris</i> Chodat 1898	132
e. <i>Pseudanabaena</i> sp.	132
f. <i>Oscillatoria</i> sp.	132
g. <i>Cryptomonas ovata</i> Ehrenberg 1838	132

RESUMEN

Se presentan los resultados de la variación vertical y temporal del fitoplancton en el lago cráter Alchichica, de características hiposalinas y oligotróficas, durante el período marzo-septiembre de 1995. Se realizaron 6 muestreos a lo largo de la columna de agua. Se midieron perfiles de oxígeno disuelto, temperatura, potencial redox, conductividad (K_{25}), penetración de la luz, pH, transparencia, clorofila *a* y nutrientes (N y P). La cuantificación del fitoplancton se hizo con el método de Utermöhl.

Se identificaron 20 especies, 9 (45%) pertenecientes a la clase Bacillariophyceae, 7 (35%) a Cyanophyceae, 3 (15%) a Chlorophyceae y 1 (5%) a Cryptophyceae. *Chaetoceros elmorei* Boyer 1914, *Oocystis submarina* Lagerheim 1886 y *Chroococcus dispersus* (Keissl.) Lemmermann 1904 son nuevos registros para México.

Se determinaron las especies de fitoplancton dominantes, temporales, constantes y raras. Las especies dominantes fueron *Cyclotella quillensis* Bailey 1922, *Chaetoceros elmorei* Boyer 1914, *Oocystis parva* W. et G.S. West 1898, *Oocystis submarina* Lagerheim 1886, *Synechocystis aquatilis* Sauvageau 1892, *Chroococcus dispersus* (Keissl.) Lemmermann 1904 y *Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet et Flahault 1886. Se presentan las descripciones de las especies dominantes, temporales y raras, acompañadas de fotografías y dibujos, así como de notas taxonómicas, ecológicas y de distribución.

Tres estados de composición algal ocurrieron en el lago en relación con sus períodos de circulación-estratificación. *Oocystis parva*, *Oocystis submarina*, *Chaetoceros elmorei*, *Cyclotella quillensis* (dominantes), *Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehrenberg) Grunow 1884 y *Diploneis pseudovalis* Hustedt 1930 (raras) se registraron en marzo, correspondiente a la fase de circulación. En abril se presentó el florecimiento de *Nodularia spumigena* (dominante), en el que se registraron valores de clorofila *a* hasta de $35 \mu\text{g l}^{-1}$ en superficie.

En este estudio se pudo observar que el máximo florecimiento de *Nodularia spumigena* se presentó en la parte final del período de circulación y período inicial de la estratificación termal de la columna de agua, en abril y mayo, cuando la velocidad del viento fue baja y la superficie del lago presentó condiciones de calma. En junio fueron abundantes *Cyclotella quillensis*, *Oocystis parva* y *Oocystis submarina*, también se observaron diatomeas Pennales y Cyanophyceae como especies raras y temporales respectivamente. En septiembre cuando el lago se encontraba ya estratificado, aparecieron cantidades importantes de *Synechocystis aquatilis*, *Chroococcus dispersus* (dominantes) así como especies temporales como *Cymbella mexicana* (Ehrenberg) Cleve 1894 y *Monoraphidium minutum* (Nag.) Kom.-Legn. 1969.

En el presente estudio los resultados ambientales indicaron que el florecimiento fue promovido por una remineralización de materia orgánica y por la liberación de fósforo desde el sedimento al iniciarse el período de estratificación. El fósforo en exceso con respecto al nitrógeno creó una ventaja competitiva para las cianofíceas que como *Nodularia spumigena* tienen la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico. *Nodularia spumigena* desaparece al agotarse el fósforo en la superficie y es sustituida por diatomeas y clorofíceas, posteriormente aparecen otras especies de cianofíceas. Otros factores asociados al desarrollo del florecimiento de *Nodularia spumigena* en el lago cráter Alchichica durante el período de estudio fueron el incremento de la temperatura ($19.0 - 19.8^\circ\text{C}$), elevado pH (9.4) y la conductividad ($13\ 350 - 13\ 860 \mu\text{S cm}^{-1}$).

1. INTRODUCCIÓN

En el fitoplancton coexisten poblaciones de diversas especies a pesar de las diferentes necesidades fisiológicas y de las variaciones con respecto a los límites de tolerancia a las variables ambientales físicas y químicas. El conocimiento de esta coexistencia y de los factores que permiten la sucesión estacional de las distintas poblaciones es fundamental para comprender a la comunidad fitoplanctónica y a su productividad. Por este motivo, la variación del fitoplancton de los lagos a través del ciclo anual ha sido uno de los aspectos estudiados por la limnología desde los tiempos más remotos. Ya en 1901, Forel *in* Estevez (1988) describió la variación cuantitativa y cualitativa de las especies del fitoplancton a lo largo de las diferentes estaciones del año en el lago Ginebra, Suiza.

Una vasta literatura sobre la variación anual del fitoplancton en lagos de latitudes templadas evidencia una gran constancia en su periodicidad. Esta constancia es el resultado principalmente de la regularidad anual en las condiciones climáticas de esta región. Para las regiones templadas puede hablarse de una variación, sucesión o fluctuación estacional (Reynolds 1984). Por el contrario, en los lagos de las regiones tropicales se ha observado que la periodicidad del fitoplancton no es uniforme, y existen pocas evidencias de que la ocurrencia de estas fluctuaciones tenga relación con las estaciones del año (Melack 1979, Reynolds 1984, Talling 1986, Darley 1987). La variación de la composición específica o de la densidad del fitoplancton en los lagos tropicales está más asociada a factores locales, como el aumento de la latitud, que a factores estacionales, como las épocas de lluvias o secas. Por esta razón, para los lagos tropicales podría hablarse de una variación temporal (Estevez 1988).

Los factores ambientales que tienen mayor influencia sobre la variación de la comunidad fitoplanctónica de los lagos templados son la cantidad de radiación solar disponible y la temperatura (Pollinger 1986, Richerson *et al.* 1986). Otros factores importantes pueden ser la concentración de nutrientes disueltos, el consumo por organismos herbívoros, el parasitismo y la competencia. En el caso de los lagos tropicales, la temperatura, debido a sus valores constantemente elevados, no es un factor importante, comparativamente hablando, y entonces la radiación solar, los nutrientes, la herbivoría y el parasitismo son los factores con la mayor influencia (Estevez 1988).

La disponibilidad de nutrientes está controlada por factores internos y externos del sistema. Los factores externos más importantes son el viento, la precipitación y la radiación solar. Éstos tienen, a su vez, una fuerte influencia sobre los factores internos como son la turbulencia, la estratificación y circulación de la columna de agua y la tasa de descomposición.

El patrón de variación del fitoplancton más común en los lagos templados comienza cuando en la primavera, la superficie congelada del lago se deshíela y el lago circula. La circulación de la columna de agua lleva a la zona fótica los nutrientes acumulados en el hipolimnion durante el invierno, y en conjunción con el aumento de la radiación solar, permite un importante crecimiento del fitoplancton, frecuentemente dominado por diatomeas (Patrick 1977, Darley 1987). En algunos casos las clorofitas son también importantes. Este período de intenso crecimiento perdura hasta que los nutrientes se agotan. La disminución de sílice es el factor más importante que determina el descenso de la población de diatomeas (Round 1981, Wetzel 1981, Margalef 1983, Reynolds 1984). En otros casos el crecimiento del fitoplancton es interrumpido por el consumo del zooplancton herbívoro, iniciándose una fase denominada de "aguas claras". Posteriormente, el

fitoplancton puede volver a crecer moderadamente siendo el grupo dominante el de las cianofíceas (Estevez 1988).

Al finalizar la primavera y comenzar el verano, la columna de agua se estratifica por acción de la radiación solar y esto provoca el empobrecimiento de nutrientes en la zona fótica. Aunque la radiación solar es abundante, durante esta época los nutrientes, en especial el fósforo, se convierten en el factor limitante del crecimiento del fitoplancton (Hecky y Kilman 1988). Por esto, el crecimiento es moderado y con predominio de las cianofíceas.

Durante el otoño se inicia la desestratificación de la columna de agua y los nutrientes del fondo pueden nuevamente alcanzar la zona fótica. Esto favorece un nuevo periodo de crecimiento del fitoplancton, nuevamente dominado por diatomeas. Sin embargo, debido a que en esta época la radiación solar es menor, su crecimiento es moderado. Finalmente, durante el invierno la superficie de los lagos templados se congela e impide el crecimiento de muchas especies fitoplanctónicas. Se ha observado que durante esta época pueden predominar pequeñas especies de criptofíceas, clorofíceas y diatomeas (Boney 1975, Wetzel 1981, Ganf y Oliver 1982).

En los lagos tropicales los patrones de variación temporal del fitoplancton son mucho más diversos. En aquéllos de profundidad considerable, que permanecen estratificados una buena parte del año, se presentan fuertes déficits de nutrientes en la zona eufótica. En estos lagos, los nutrientes, y en especial el nitrógeno, son el principal factor controlador de la variación temporal del fitoplancton. Adicionalmente la radiación solar disponible puede ser también de gran importancia (Lewis 1978 a, b). Cuando en los ambientes acuáticos se presentan condiciones particulares de luz, temperatura, nutrientes, época del año, entre otras, algunas especies del fitoplancton pueden predominar con

respecto a otras, durante un período determinado, debido a que tienen la capacidad de adaptarse a esas "condiciones especiales", dando lugar a los llamados florecimientos algales o "blooms" (Paerl 1996, Pizzolon 1996).

Se le denomina florecimiento acuático o "bloom" al proceso biológico en el que se presenta gran abundancia de individuos de una determinada especie de alga (Kühnemann 1966, Pizzolon 1996). Estos son frecuentes en las aguas continentales formados principalmente por cianofíceas y clorofíceas, mientras que en el mar los dinoflagelados son el grupo más importante (Anderson 1997). En los lagos templados los procesos de circulación-estratificación y los cambios de la concentración de los nutrientes durante estos períodos determinan en parte los florecimientos de diatomeas en primavera y algunas veces durante el otoño (Patrick 1977, Darley 1987). Los organismos que los componen forman parte de la comunidad planctónica. La intensidad, duración del fenómeno y amplitud de la zona que abarca, varía de acuerdo con las especies, épocas del año y condiciones ecológicas del ambiente. (Kühnemann 1966, Sellner *et al.* 1996).

Por lo común no es un sólo factor el que determina el desarrollo extraordinario de una especie hasta originar un florecimiento: *Hematococcus lacustris* lo hace después de las lluvias, *Arthrospira* y *Chlamydomonas sanguinea* se desarrollan extraordinariamente en ambientes salobres (Kühnemann 1966). Es notable que lagunas o lagos muy cercanos y similares en muchos aspectos presentan o no florecimientos de estas especies. En el mar, los florecimientos ocurren en zonas muy fértiles, generalmente durante o después de un tiempo de intenso calor (Kühnemann 1966, Pentecost 1984, Jones 1991, Olli 1996).

En lagos templados, la formación de florecimientos conspicuos ocurre generalmente sólo al final del verano, pero en lagos tropicales, éstos pueden ser una característica permanente (Round 1981).

Los florecimientos de cianofíceas han sido registrados en muchos lagos de diferentes países y latitudes. Entre ellos se pueden citar los lagos del sur de Saskatchewan, Canadá (Hammer 1964). Fogg *et al.* (1973) hace referencia de estudios relacionados con este fenómeno para Alaska (Billaud 1967), Pensilvania (Dugdale y Dugdale 1962), Wisconsin (Goering y Neess 1964, Stewart *et al.* 1967, Stewart *et al.* 1971, Rusness y Burris 1970), Holanda (Horne 1969) y Escocia (Stewart 1972a). En los Trópicos y Subtrópicos, en el Nilo Blanco (Prowse y Talling 1958) y el Nilo Azul (Telling y Rzoska 1967). En la laguna Grande de San Pedro, Chile (Parra *et al.* 1980), en el lago Piramide, Nevada, E.U.A. (Galat *et al.* 1990) y en los lagos del sur de Finlandia (Kauppi *et al.* 1990, Sellner *et al.* 1994, 1996).

Los mecanismos de formación de florecimientos de cianofíceas no son sencillos de explicar, Walsby (1977) y Reynolds (1984) indican que estos dependen principalmente de la coincidencia de las siguientes condiciones: una población preexistente, una proporción importante de los organismos conteniendo suficientes vacuolas de gas para permitir su flotabilidad, estabilidad de la columna de agua y una reducción en el flujo de turbulencia cerca de la superficie

Los florecimientos de cianofíceas se hacen evidentes cuando las poblaciones que pasaron desapercibidas al crecer bajo la superficie por varias semanas, suben repentinamente durante los períodos de clima tranquilo. Las algas pueden quedar atrapadas en la superficie por su flotación excesiva, si son incapaces de aumentar la presión de turgencia para que algunas de sus vesículas de gas se colapsen (Darley 1987). Las tasas disminuidas de fotosíntesis causadas por la deficiencia de nutrientes, CO₂ o ambas, en las aguas de la superficie, son factores que posiblemente contribuyen al desarrollo del florecimiento, parecen ser eventos incidentales que ocurren cuando un período de clima

tranquilo coincide con la flotación excesiva e incontrolable de una población considerable de células (Darley 1987).

Los florecimientos se explican parcialmente por la habilidad de muchas cianofíceas para formar "vacuolas de gas", cuerpos refráctiles cuyas membranas son permeables a gases como nitrógeno, oxígeno y CO_2 , se forman sólo bajo ciertas circunstancias, dando a las células flotación positiva y permanencia en la columna de agua. Fogg y Walsby (1971) *in* Taylor (1980) han postulado que ésta es una forma para favorecer la migración vertical. La presencia de vacuolas de gas reduce la densidad celular de las cianofíceas por debajo de la del agua, aun cuando las vacuolas a menudo sólo ocupan menos del 1% del volumen total celular. Las cianofíceas se sirven de las vacuolas de gas para flotar en la superficie del agua, logrando permanecer en la zona fótica, independientemente de la turbulencia requerida por las otras algas; variaciones de la relación vacuolas de gas/volumen celular determinan el hundimiento o flotación de estas algas (Wetzel 1981).

La formación de florecimientos resulta de la redistribución y frecuentemente, de la rápida acumulación de poblaciones planctónicas flotantes, cuando tales poblaciones están sujetas a condiciones subóptimas, ellas responden por aumento a su flotabilidad y se mueven hacia arriba, cerca de la superficie del agua. La turbulencia del agua generalmente impide que alcancen la superficie, sin embargo, cuando la turbulencia de pronto se debilita en un día de calma de verano, la población flotante alcanza la superficie. Ahí las células están expuestas a condiciones desfavorables, como sobresaturación de O_2 , disminución rápida del CO_2 , y radiación solar intensa, las cuales inhiben la fotosíntesis, causando fotooxidación de pigmentos y produciendo daños irreversibles en la constitución genética de las células (Reynolds y Walsby 1975).

Un resultado frecuente de la formación de florecimientos superficiales es la lisis masiva de células y la rápida desintegración de grandes poblaciones pláncónicas, lo cual es seguido por un aumento acelerado en el número de bacterias y desoxigenación de las aguas superficiales, causando alteraciones en las poblaciones animales del lago (Fogg *et al.* 1973, Fay 1983).

Reynolds y Walsby (1975) hicieron una revisión completa de este fenómeno y llegaron a la conclusión de que su formación se debía a la incapacidad del alga de reducir su vacuolización. Tal incapacidad refleja la imposibilidad de mantener altas tasas de fotosíntesis en la superficie a pesar del elevado nivel de iluminación existente, ya que ambos métodos de regulación de las vacuolas de gas (presión de turgencia y crecimiento celular) dependen de la actividad fotosintética. De esta manera se deducen varias causas de fallo fotosintético. Una de ellas fue sugerida por Booker y Walsby *in* Walsby (1977) quienes experimentalmente simularon un lago estratificado. Observaron que cuando una cianoficea planctónica crecía en condiciones de intensidad luminosa baja e incremento de nutrientes -especialmente fosfatos- la población algal aumentaba, la actividad fotosintética era intensa, por lo cual había consumo de nutrientes, las poblaciones algales subían a la superficie al estar altamente vacuoladas, acumulándose en ese nivel. No se sabe si una explicación parecida es válida para las aguas naturales. Las grandes proliferaciones de cianoficeas causan daños considerables, interfieren los suministros de agua al obstruir los filtros y desprenden sustancias que producen sabores desagradables, pudiendo también afectar adversamente a las pesquerías de agua dulce (Paerl 1996). Algunas cianoficeas formadoras de estas acumulaciones sintetizan poderosas neurotoxinas que pueden causar la muerte del ganado y de animales silvestres (Christoffersen 1996, Neilan 1996, Sellner 1997, Smayda 1997). Además, los florecimientos disminuyen la calidad del agua utilizada

para fines recreativos. En muchos casos, estos problemas se deben a la acción del hombre, ya que las condiciones eutróficas que explican dichas acumulaciones de algas se deben al enriquecimiento en nutrientes de lagos y embalses, procedentes de aguas residuales y de fertilizantes aplicados en exceso a terrenos agrícolas (Reynolds 1984, Paerl 1996).

Otro aspecto que ha sido estudiado recientemente en relación con los florecimientos de cianofíceas, se refiere a su valor como alimento para el zooplancton herbívoro que habita en los ambientes acuáticos. Dos factores principales parecen jugar un papel importante para determinar su conveniencia como alimento, sus propiedades bioquímicas que pueden resultar en efectos tóxicos para el zooplancton y la forma y tamaño de los filamentos y las colonias (Bernardi y Giussani 1990, Sellner *et al.* 1994, 1996). En general, se considera que la mayoría de las especies no constituyen un alimento adecuado para estos organismos.

Los florecimientos algales han sido estudiados en un sentido amplio, sin embargo, aún no se explican totalmente cuáles son los factores que determinan el incremento secuencial, la disminución y la coexistencia de las especies durante el proceso, así mismo, todavía no se conocen todas las especies de cianofíceas que pueden dar lugar a este fenómeno. De acuerdo con el trabajo de Reynolds y Walsby (1975) los géneros registrados como generadores de florecimientos tanto de ambientes marinos como de aguas continentales son: *Coelosphaerium*, *Gomphosphaeria*, *Mycrocystis*, *Oscillatoria*, *Spirulina*, *Trichodesmium*, *Anabaena*, *Anabaenopsis*, *Aphanizomenon* y *Gloeotrichia*. Paerl (1988, 1996) registra además *Lyngbya*, *Nodularia*, *Calothrix*, *Cylindrospermum*, *Mastigocladus*, *Richelia*, *Rivularia*, *Scytonema* y *Tolypothrix*. Es posible que la clave del éxito de una determinada especie sea única para esa especie y dependerá de sus capacidades y tolerancias fisiológicas y ambientales, así como también de la influencia de otros

organismos que la preceden y que coexisten con ella en la sucesión. Es probable que una explicación distinta sea aplicable en tiempos y lugares diferentes (Darley 1987).

En México se tienen algunos registros de florecimientos que se han desarrollado en los lagos de Chapultepec, D.F. (Alcocer *et al.* 1988, Alcocer y Lugo 1995) y en los canales de Xochimilco (Montejano 1995, comunicación personal), sin embargo son escasos los trabajos publicados relacionados con este aspecto en particular.

México es un país con amplias zonas de tectonismo y vulcanismo. La Faja Volcánica Transversal (FVT) tiene su origen en el Plio-Pleistoceno y se desarrolló plenamente en el Cuaternario; forma una barrera natural que constituye el límite del último período glacial que afectó la porción norte del país (Tamayo 1962, 1980), separando así dos grandes zonas climáticas: la neártica y la neotropical, las cuales forman las regiones de Norteamérica y Centroamérica. Estas características han influido en el establecimiento de una biota particular, aún poco explorada. Mucho menos investigada se encuentra la flora acuática que se localiza en los lagos de origen volcánico de esta región, debido posiblemente a su aislamiento. Entre ellos se encuentran los del Valle de Santiago y Tacámbaro, Gto., y los de la Cuenca de Oriental, Pue. (Arredondo *et al.* 1983). En esta última cuenca se ubican seis estructuras volcánicas con lagos internos, denominados comúnmente "axalapazcos" -voz náhuatl que significa vasijas de arena llenas de agua- (Reyes 1979, Simeón 1988). Estos lagos cráter presentan las características particulares para ser considerados como lagos tipo "maars", con diámetro inferior a 2 Km (Hutchinson 1957), son estructuras volcánicas con forma de cono, algunos tienen más de 40 m de profundidad y son alimentados principalmente por las aguas del manto freático y la precipitación pluvial que captan sus pequeñas cuencas (Alvarez 1950, Reyes 1979). Uno de ellos es el lago cráter Alchichica, objeto del presente estudio. Garzón (1990) registró un

intenso florecimiento de una cianoficea filamentosa, durante un corto período de tiempo en la época de secas, sin embargo, éste fenómeno ha sido observado desde hace muchos años por los lugareños de la zona, lo llaman comúnmente "enfermedad del lago". Este florecimiento cambia drásticamente el aspecto del lago, variando su color natural azul hacia el amarillo verdoso o verde oscuro, característico de las densas natas flotantes que forma el alga (Fig. 1). El lago cráter Alchichica es un cuerpo de agua con características limnológicas particulares, tales como la naturaleza química de sus aguas (atalasohalinas), y pH básico, por lo que es un ecosistema único y diferente al compararlo con el ambiente marino o dulceacuícola (Williams 1981, Alcocer y Escobar 1992). Este lago presenta endemismos y otras especies de reducida área de distribución que es necesario conocer y preservar, por lo que es innegable su valor científico, así como su importancia económica, estética y recreativa (Alcocer 1995). El presente estudio tiene el propósito de contribuir al conocimiento de la variación vertical y temporal de la comunidad fitoplanctónica durante el florecimiento de una cianoficea filamentosa en el lago cráter Alchichica.

Por lo anterior se proponen las siguientes hipótesis:

La presencia del florecimiento de cianoficeas en el lago cráter Alchichica influye en la distribución y abundancia del resto de la comunidad fitoplanctónica antes durante y después del florecimiento.

El comportamiento de las variables físicas y químicas, y el período de estratificación-circulación del lago cráter Alchichica influyen para determinar la presencia del florecimiento de cianoficeas.



Figura 1. Vistas del lago de Alchichica sin florecimiento (arriba) y con el florecimiento de *Nodularia spumigena* (centro). Detalle de la superficie durante el florecimiento (abajo). Fotos de Javier Alcocer.

2. OBJETIVOS

Objetivo General

- Conocer la estructura de la comunidad fitoplanctónica en el lago cráter Alchichica antes, durante y después del florecimiento de cianofíceas (marzo, abril, mayo junio y septiembre).

Objetivos Particulares

- Evaluar los cambios en la composición de la comunidad fitoplanctónica en relación con las condiciones ambientales antes, durante y después del florecimiento.
- Determinar la abundancia y la distribución espacial y temporal de las especies de fitoplancton durante el período mencionado, como una forma de evaluación de los cambios de dicha comunidad
- Analizar la relación entre las condiciones ambientales (temperatura, oxígeno disuelto, % de saturación de OD, conductividad específica (K_{25}), pH, transparencia y penetración de la luz, nutrientes (N, P) y clorofila *a*) con la abundancia y composición de las especies encontradas durante el período de estudio.
- Analizar las posibles causas que permiten el desarrollo del florecimiento de cianofíceas en el lago cráter Alchichica.

3. ANTECEDENTES

Entre las primeras contribuciones realizadas en la Cuenca de Oriental están las de Ordóñez (1906) en las que presenta una descripción general de la morfología de los axalapazcos, así como una secuencia geológica de la zona. Posteriormente Gasca (1981) hace un estudio geomorfológico y climático de los lagos cráter de esta región. Fuentes (1972) y Reyes (1979) describen las características generales del área donde se localizan los lagos cráter. Arredondo *et al.* (1983) presentan la batimetría y morfometría de los lagos tipo "maars" de la Cuenca de Oriental. Escobar y Alcocer (1983) y Alcocer y Escobar (1988) realizaron trabajos de recopilación de la información limnológica existente sobre el lago Alchichica. Alcocer y Escobar (1990) hacen un estudio sobre los axalapazcos de la Altiplanicie Mexicana e indican la importancia de los lagos cráter como un recurso de explotación para los habitantes de esa zona. Garzón (1990) caracteriza a los lagos cráter desde el punto de vista saprobio y trófico y señala que el lago cráter Alchichica corresponde a la categoría oligo-mesotrófico y xeno-oligosaprobio. Vilaclara *et al.* (1993) realizan un estudio comparativo sobre la química de los mismos. Alcocer *et al.* (1998) analizan la problemática de los lagos salinos de la cuenca de Oriental por actividades humanas.

Desde el punto de vista biológico, Taylor (1943) describe un nuevo anfibio ambistómido (*Ambystoma subsalsum*) adaptado a las aguas salinas de Alchichica. De Buen (1945) realiza investigaciones sobre ictiología mexicana y describe a la especie *Poblana alchichica*, aterínido endémico de Alchichica. Alvarez (1950) hace una contribución al conocimiento de los peces de la región de los Llanos, estado de Puebla, relacionada con los fenómenos de especiación, taxonomía y distribución de los aterínidos. Alcocer *et al.* (1993

a y b) describen la macrofauna bentónica de la cuenca de Oriental así como los quironómidos de Alchichica. Lugo (1993), Lugo *et al.* (1993, 1998) y Macek *et al.* (1994) estudiaron la comunidad de protozoarios litorales en los lagos cráter. Alcocer (1995) hace un análisis de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos litorales de seis lagos cráter con un gradiente de salinidad, en el que registra 44 especies de macroinvertebrados para el lago Alchichica. Con respecto a estudios florísticos, están los de Ramírez-García y Novelo (1984) y los de Ramírez-García y Vázquez-Gutiérrez (1989) que determinan la vegetación acuática vascular en los lagos cráter del estado de Puebla, estos autores encuentran en el lago de Alchichica a dos especies de hidrófitas tolerantes a la salinidad. Con respecto al estudio de la comunidad algal en la cuenca de Oriental, Piña (1984) estudia la variación estacional del fitoplancton de los lagos La Preciosa, Quechulac y Aljojuca. Arredondo *et al.* (1984) correlacionan la diversidad y distribución vertical del fitoplancton con algunos parámetros físicos y químicos del lago cráter Alchichica. Recientemente Tavera y Komárek (1996) estudiaron las cianofíceas de la zona litoral del lago cráter Alchichica.

4. ÁREA DE ESTUDIO

El lago cráter Alchichica se localiza cerca del poblado del mismo nombre, al noreste del estado de Puebla (19° 24' 13" de latitud N, 97° 24' 00" de longitud W, 2345 m.s.n.m). Se encuentra ubicado en los Llanos de San Juan al norte de la planicie poblana y pertenece al grupo Techachalco de la Cuenca de Oriental, junto con Atexcac, La Preciosa y Quechulac (Arredondo *et al.* 1983, Alvarez 1950). Se localiza a un costado de la carretera Huamantla-Perote, sobre el Km 64.

El lago tiene forma circular, con una longitud máxima de 1733 m en dirección SE-NO. Su perímetro es de 5.06 Km, con un área de 1.81 Km² y un volumen de 69.92 millones de m³ (Fig. 2). Sus paredes son muy inclinadas y la profundidad aumenta con gran rapidez al alejarse de la orilla, esta acentuada inclinación finaliza en una plataforma a los 60 m, desplazada ligeramente hacia el NE y cortada por la parte más profunda, que alcanza aproximadamente los 64 m. En la zona litoral, casi a lo largo de toda la orilla, se presentan bajos o salientes de roca volcánica, que configuran una pequeña plataforma, sobre todo hacia el NE, N y NO (Arredondo *et al.* 1983, 1984). Alchichica es el lago natural más profundo que se conoce en México (Escobar y Alcocer 1983). La composición geológica de la cuenca incluye materiales como tezontle, pómez, material andesítico y depósitos cineríticos y piroclásticos, así como basalto (Reyes 1979).

El clima en el área donde se ubica el lago cráter Alchichica es templado seco, con verano seco y poca oscilación térmica (BS₁w"k(i)g). Los datos promedio de diecisiete años registrados en la estación meteorológica ubicada en la orilla del lago, indican un marcado déficit de agua debido a la evaporación, sobre todo en el mes de marzo (García 1988).

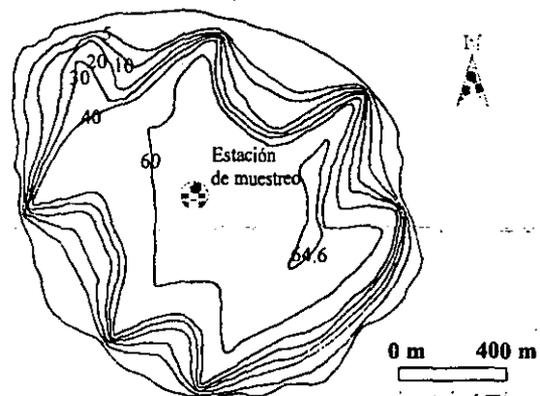
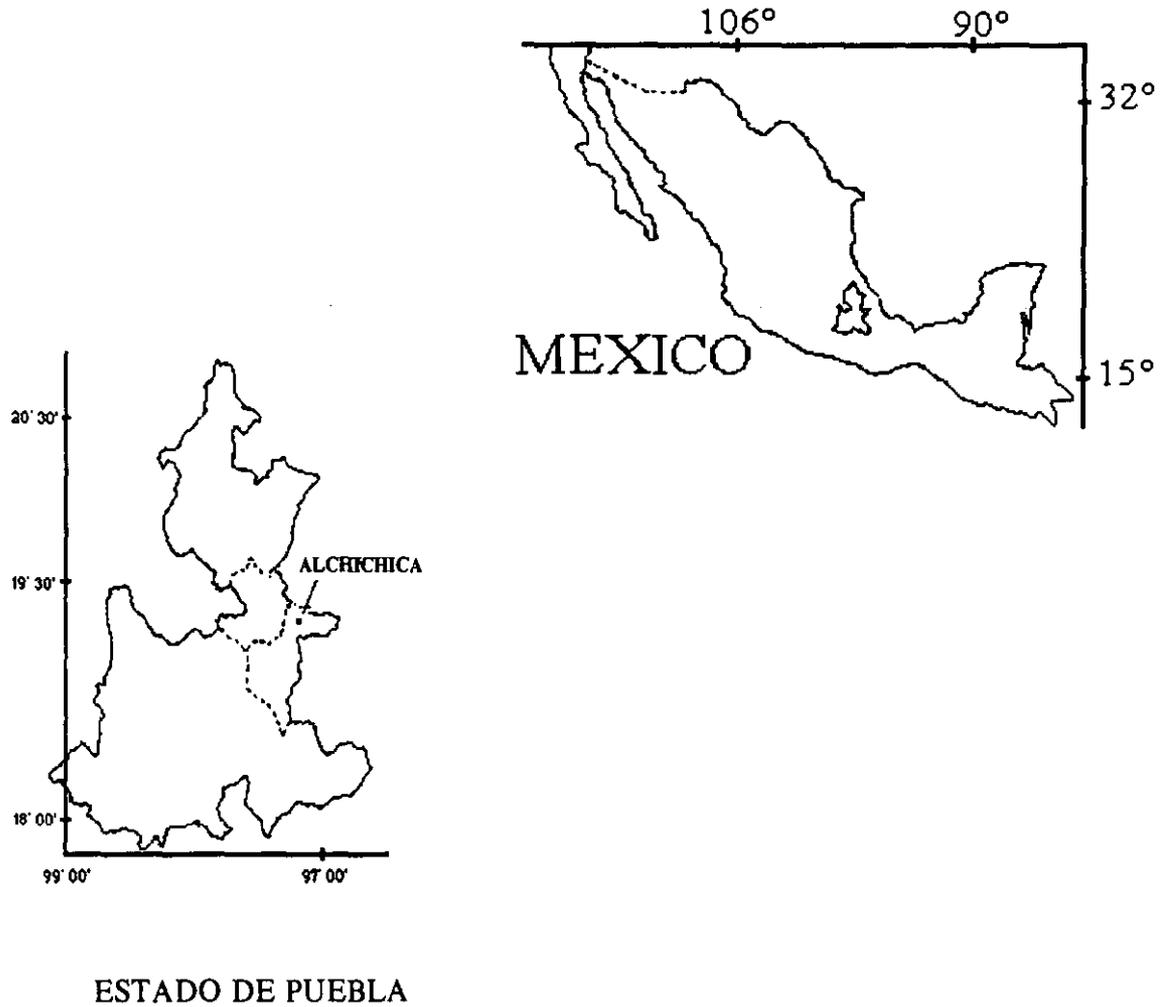


Figura 2. Localización geográfica, morfometría y batimetría del lago cráter Alchichica mostrando la ubicación de la estación de muestreo

La precipitación muestra ser estacional y se presenta durante el verano alcanzando un valor máximo de 90 mm en el mes de junio (Arredondo *et al.* 1984). Con respecto a la temperatura, existen amplias variaciones que van desde 9.2°C hasta un valor máximo de 15.4°C correspondiendo diciembre, enero, febrero y marzo a los meses más fríos y abril, mayo y junio a los más cálidos (García 1988). Con relación a la fauna característica que habita este lago Alvarez (1950) señala la presencia del pez endémico *Poblana alchichica alchichica* (familia Atherinidae). Taylor (1943) describió a una especie nueva también endémica de Alchichica que llamó *Ambystoma subsalsum*. Posteriormente, el organismo fue correctamente redescrito por Brandon *et al.* (1981) como *Ambystoma taylorii*. Sobre la vegetación de macrófitas acuáticas presentes en el lago Alchichica se encuentran dos especies: *Cyperus laevigatus* (Familia Cyperaceae), que se distribuye en algunas zonas al borde del lago y *Ruppia maritima* (Familia Ruppiceae), la cual ocupa áreas densas y regulares en las partes protegidas a lo largo de la zona litoral y mesolitoral, llegando hasta una profundidad de dos metros (Ramírez-García y Novelo 1984; Ramírez-García y Vázquez-Gutiérrez 1989).

5. MATERIAL Y MÉTODO

5.1. Trabajo de Campo.

Se realizaron seis muestreos en la zona limnética del lago durante el período marzo-septiembre de 1995, abarcando el período anterior, durante y posterior al florecimiento de cianofíceas. Las fechas de muestreo fueron: 31 de marzo (antes del florecimiento), 22 de abril, 29 de abril y 6 de mayo (durante el florecimiento), 26 de junio y 9 de septiembre (después del florecimiento). Se seleccionó una estación central (Fig. 2) localizada en la parte profunda (62 m). En cada ocasión se tomaron 5 muestras en las siguientes profundidades: 0.5, 10, 20, 30 y 40 m. Se utilizó una botella muestreadora tipo van Dorn de 5 l de capacidad. Del agua recolectada en la botella, se obtuvieron alícuotas para la determinación de variables físicas y químicas y las muestras para la cuantificación de los organismos del fitoplancton.

Para las muestras de fitoplancton se usaron botellas de 500 ml, las cuales se fijaron con aceto lugol. Como apoyo para la identificación taxonómica, se realizaron arrastres horizontales con una red de fitoplancton con abertura de malla de 20 μm , estas muestras se fijaron con formol al 4% con agua de la localidad (González y Novelo, 1986).

Para determinar las características ambientales de la zona limnética durante el período de estudio se determinaron perfiles verticales (0.5, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 m) de las siguientes variables: temperatura, oxígeno disuelto, % de saturación de oxígeno disuelto, conductividad específica (K_{25}), por medio de una sonda multisensor marca Hydrolab Data Sonde 3 conectada a un almacenador electrónico de datos Surveyor 3.

La transparencia se midió con un disco de Secchi y se realizaron perfiles de penetración de luz con un irradiómetro subacuático Modelo 268 WA 310 de Kahl Scientific Instruments en tres muestreos (22 de abril, 29 de abril y 6 de mayo).

Como un método de estimación de la biomasa del fitoplancton se determinó la concentración de la clorofila *a* en cada una de las profundidades en donde se muestreó el fitoplancton. Estas muestras fueron colocadas en garrafones de plástico de 5 l y almacenadas a 4°C y en obscuridad hasta su procesamiento en el laboratorio.

5.2. Trabajo de Laboratorio

La extracción de clorofila *a* se realizó utilizando metanol en frío (4°C, 24 h) (Jeffrey y Humphrey 1975). La concentración del extracto se midió mediante un espectrofotómetro UV/VIS marca Hewlett-Packard modelo 8450 y los resultados obtenidos no fueron corregidos para la interferencia por feofitinas.

Para la determinación de la concentración de los nutrientes se utilizó el laboratorio portátil marca Hach modelo DREL\2000. Los métodos analíticos utilizados fueron (Hach 1993): Nitrógeno amoniacal (método de Nessler modificado), nitritos (método-concentración baja mediante diazotización (Nitri-Ver 5), nitratos (método-concentración media por reducción con cadmio (Nitra-Ver 5), fósforo reactivo (ortofosfatos) (método de Phos-Ver 3).

La cuantificación del fitoplancton se hizo con el método de Utermöhl, el cual consistió en poner a sedimentar una alícuota de agua, tomada de cada una de las profundidades señaladas anteriormente, utilizando cámaras de sedimentación de 10, 50 y 100 ml, dependiendo de la concentración de los organismos. Se cuantificaron mediante observación directa con un invertoscopio modelo D de Carl Zeiss con óptica de contraste de fases y aumentos de 128X a 806X. Las cuentas se realizaron con un criterio flexible, en función de la densidad de los organismos y el tamaño de las células. Se contaron únicamente las células con contenido celular y se consideró el número de campos, hasta

totalizar 400 células o 400 filamentos del organismo más abundante, según fuera el caso. Con este criterio el intervalo de confianza para el valor medio es de $\pm 10\%$ (Wetzel y Likens 1979). El aumento para hacer la cuantificación se eligió de acuerdo al tamaño de las células. En el caso de no tener el mínimo de 400 células, se contó toda la cámara. Para medir los filamentos se tomó en cuenta el diámetro de campo calculado para cada aumento del invertoscopio y, con las medidas de las células de los filamentos contados, se calculó el número de células por ml. Para determinar el número de células por mililitro, en los dos casos anteriormente explicados, se siguió la fórmula indicada por APHA *et al.* (1985):

$$\text{No. De organismos/ml} = \frac{C \times A_t}{A_f \times F \times V}$$

$$A_f \times F \times V$$

C = No. de organismos contados

A_t = Area total del fondo de la cámara

A_f = Area de un campo

F = No. de campos contados

V = Volumen de la muestra

El tiempo de sedimentación fue de 1 hora por milímetro de altura de la cámara de sedimentación (APHA *et al.* 1985).

La identificación del fitoplancton se hizo con un fotomicroscopio de contraste de fases marca Zeiss, modelo III, con óptica corregida, y aumentos de 100X a 2000X y con ocular micrométrico. Para la identificación del fitoplancton se utilizó la siguiente bibliografía: Anagnostidis y Komárek (1985, 1988); Battarbee *et al.* (1984); Bourrelly (1970, 1972, 1981); Comas (1996); Desikachary (1959); Geitler (1932); Germain (1981); Huber-Pestalozzi (1941); Hustedt (1930 a, b, c, 1959, 1961-1966); Komárek y Fott (1983);

Komárek y Anagnostidis (1986, 1989); Komárek *et al.* (1993); Komárková-Legnerová (1969); Krammer y Lange-bertalot (1986, 1988, 1991 a, b) Ortega (1984); Parra *et al.* (1982 a, b, 1983.); Patrick (1943); Patrick y Reimer (1966, 1975); Philipose (1967); Prescott (1962); Reháková (1969); Smith (1933); Theriot y Stoermer (1982); Tiffany y Britton (1952); Vinyard (1979). En el caso de las Bacillariophyceae se utilizó el esquema de clasificación de Simonsen (1979). Para la clase Chlorophyceae se siguió el esquema de clasificación de Komárek y Fott (1983). Para la clase Cyanophyceae se utilizó el esquema de clasificación de Anagnostidis y Komárek (1985, 1988) y Komárek y Anagnostidis (1986, 1989). Para la clase Cryptophyceae se siguió el esquema de clasificación de Huber-Pestalozzi (1950) y Bourelly (1970). La terminología usada en la descripción de las especies de diatomeas es la sugerida por Ross *et al.* (1979) y por Barber y Haworth (1981).

Se elaboraron preparaciones semipermanentes y permanentes (González y Novelo 1986) y se hizo la técnica de limpieza de diatomeas para eliminar materia orgánica (Maidana 1985), que consistió en enjuagar las muestras para eliminar sales y fijadores y fueron tratadas con oxidantes (KMnO_4), ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y agua oxigenada (H_2O_2) al 30%. Se elaboraron preparaciones permanentes utilizando Naphrax® como medio de montaje para su observación al microscopio de luz (ML). Las muestras se depositarán en el Herbario IZTA (ENEP-Iztacala, UNAM).

Una porción del material limpio se utilizó para hacer observaciones al Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca JEOL modelo JSM-5200, con distancia de trabajo de 10 mm (Departamento de Física Experimental del Instituto de Física, UNAM). Para ello las muestras fueron montadas con cinta de doble cara en bases de aluminio para el MEB y recubiertas con plata pura 0.999 (para evitar la acumulación de electrones en el blanco).

5.3. Análisis de la información

Se realizó un análisis gráfico de los resultados de las variables físicas y químicas y del fitoplancton. Mediante una gráfica de frecuencia *versus* abundancia se determinaron las especies de fitoplancton dominantes, constantes, temporales y raras, durante el período de estudio. En esta gráfica se observa el porcentaje de frecuencia (como el número de muestras en que una especie determinada se presenta * 100/número total de muestras) contra el logaritmo natural de la abundancia total de cada especie ($\text{Log} (n+1)$). Las líneas divisorias son las medias de los porcentajes de frecuencia y del logaritmo de la abundancia para todas las especies. El diagrama permite definir las especies dominantes como aquéllas con alta frecuencia y alta abundancia (rectángulo superior derecho); las temporales son las que presentan baja frecuencia y alta abundancia (rectángulo superior izquierdo); las constantes, que tienen baja abundancia pero elevada frecuencia (rectángulo inferior derecho), y las raras, que presentan baja frecuencia y abundancia (rectángulo inferior izquierdo) (García de León 1988).

Con los datos de cada muestreo se obtuvieron las especies más importantes, de acuerdo con su frecuencia y su abundancia en cada uno de los cinco muestreos realizados. Para determinar las relaciones entre las variables ambientales y las densidades celulares del fitoplancton se realizó un análisis de correlación multivariado empleando el coeficiente de correlación de Pearson mediante el paquete estadístico Statgraphics versión 5.0 (1991). Los datos de las variables fueron estandarizados mediante su transformación a valores de $\log (n)$ (temperatura, K_{25} , OD, % de saturación de oxígeno y clorofila *a*) o $\log (n + 1)$ ($N-NH_3$, $N-NO_2$, $N-NO_3$ y PO_4). Al pH se le restaron 7 unidades. Los valores de las densidades de fitoplancton también fueron transformados a $\log (n + 1)$ (Steel y Torrie 1989).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y discusión están organizados en tres partes. En la primera se presenta el análisis y discusión de los resultados biológicos, considerando la riqueza específica, dominancia, descripción de especies dominantes y temporales, así como la variación espacial y temporal de las especies encontradas. En la segunda parte se hace el análisis y discusión de las variables físicas y químicas determinadas, además del análisis de correlación. En la tercera parte se presentan las conclusiones en relación a la caracterización biológica, física y química asociada al florecimiento de *Nodularia spumigena* durante el periodo de estudio en el lago cráter Alchichica, Pue.

6.1. Biológicos

6.6.1. Riqueza específica

Se revisaron 30 muestras colectadas en una estación de muestreo, a las profundidades de 0.5, 10, 20, 30 y 40 m de la parte central del lago, durante el período marzo-septiembre de 1995. Se identificaron 20 especies de fitoplancton, 9 pertenecen a la clase Bacillariophyceae (45%), 7 a la clase Cyanophyceae (35%), 3 a la Chlorophyceae (15%) y 1 a la Cryptophyceae (5%).

6.1.2 Lista Sistemática

Clase Bacillariophyceae

Orden Centrales

Familia Thlalassiosiraceae

Cyclotella Kützing ex A. de Brébisson 1838

Cyclotella quillensis Bailey 1922

Familia Chaetoceraceae

Chaetoceros C. G. Ehrenberg 1844

Chaetoceros elmorei Boyer 1914

Orden Pennales**Familia Naviculaceae**

Anomoeoneis Pfitzer 1871

Anomoeoneis sp.

Cymbella Agardh 1830

Cymbella mexicana (Ehrenberg) Cleve 1894

Gomphonema Ehrenberg (Agardh) 1832

Gomphonema olivaceum (Hornemann) Brébisson 1838

Diploneis Ehrenberg 1844

Diploneis pseudovalis Hustedt 1930

Familia Achnanthaceae

Cocconeis Ehrenberg 1838

Cocconeis placentula var. *euglypta* (Ehrenberg) Grunow 1884

Familia Epithemiaceae

Epithemia Brébisson ex Kützing 1844

Epithemia argus (Ehrenberg) Kützing 1844

Familia Surirellaceae

Surirella Turpin 1828

Surirella striatula Turpin 1828

Clase Chlorophyceae**Orden Chlorococcales****Familia Oocystaceae Bohlim 1901**

Oocystis A. Braun 1855

Oocystis parva W. y G.S. West 1898

Oocystis submarina Lagerheim 1886

Familia Chlorellaceae Brunthaler 1915

Monoraphidium Komárcová – Legnerová 1969

Monoraphidium minutum (Näg.) Kom.-Legn. 1969

Clase Cyanophyceae**Orden Chroococcales****Familia Microcystaceae**

Merismopedia Meyen 1839

Merismopedia tenuissima Lemmermann 1898

Synechocystis Sauvageau 1892

Synechocystis aquatilis Sauv. 1892

Gomphosphaeria Kützing 1836

Gomphosphaeria cf. *lacustris* Chodat 1898

Familia Chroococcaceae Nägeli

Chroococcus Nägeli 1849

Chroococcus dispersus (Keissl.) Lemmermann 1904

Orden Nostocales**Familia Nostocaceae Kützing 1843**

Nodularia Mertens ex Bornet et Flahault 1886

Nodularia spumigena Mertens ex Bornet et Flahault 1886

Orden Oscillatoriales**Familia Pseudanabaenaceae**

Pseudanabaena Lauterborn 1915

Pseudanabaena sp.

Familia Oscillatoriaceae

Género *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont 1892

Oscillatoria sp.

Clase Cryptophyceae**Orden Cryptomonadales****Familia Cryptomonadaceae**

Cryptomonas Ehrenberg 1838

Cryptomonas ovata Ehrenberg 1838

6.1.3 Dominancia

El análisis del diagrama (Fig.3) de frecuencia (%) *versus* abundancia ($\text{Log } n+1$) muestra que las especies dominantes fueron *Cyclotella quillensis*, *Chaetoceros elmorei*, *Oocystis parva*, *Oocystis submarina*, *Synechocystis aquatilis*, *Chroococcus dispersus* y *Nodularia spumigena*. Las especies temporales fueron *Cymbella mexicana*, *Monoraphidium minutum* y *Merismopedia tenuissima*. Las especies raras fueron *Anomoeoneis* sp., *Gomphonema olivaceum*, *Diploneis pseudovalis*, *Cocconeis placentula* var. *euglypta*, *Epithemia argus*, *Surirella striatula*, *Gomphosphaeria lacustris*, *Pseudanabaena* sp., *Oscillatoria* sp. y *Cryptomonas ovata* (Apéndice I).

En el caso del presente trabajo los resultados del diagrama de frecuencia *vs* abundancia indicaron que no se registraron especies constantes.

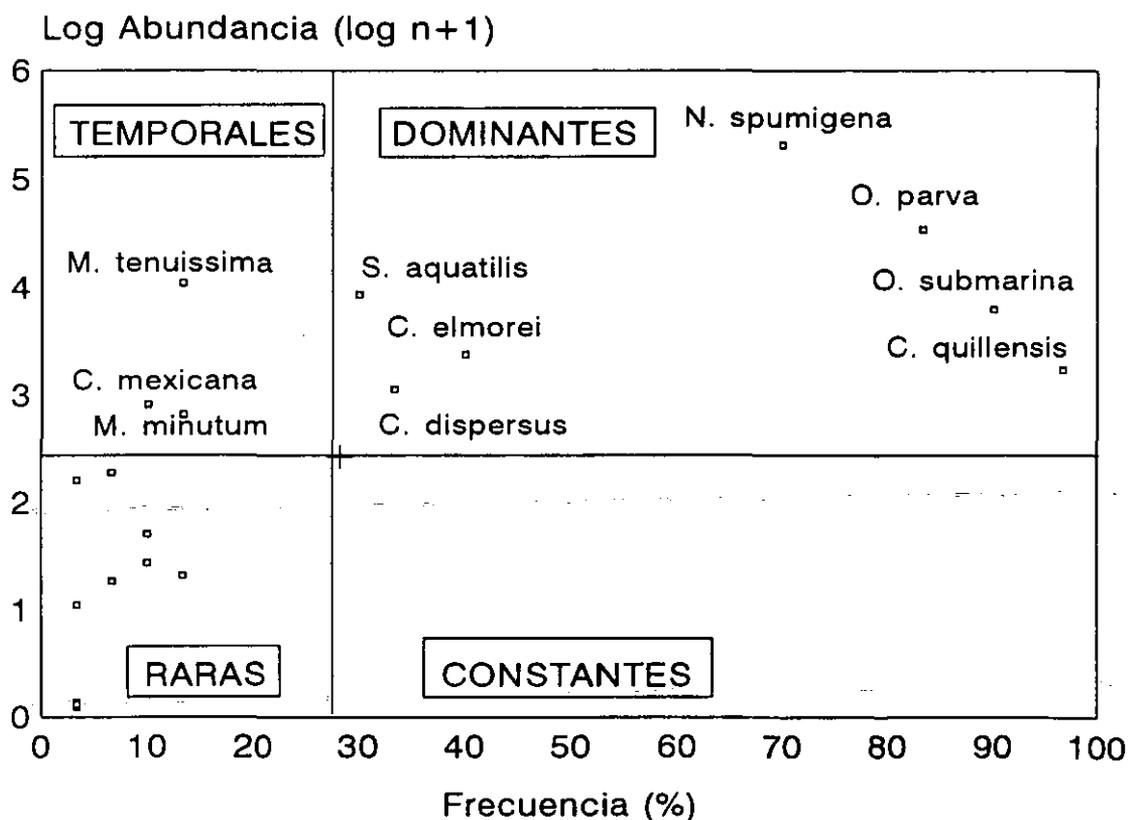


Figura 3. Diagrama de frecuencia *vs* abundancia para las especies de fitoplancton. 1995.

En la tabla I que muestra la presencia-ausencia de las especies en cada muestreo, se observa que las 7 especies dominantes se presentaron en todos los muestreos, excepto *Synechocystis aquatilis* que no se observó en el muestreo del mes de mayo.

MUESTREO	1	2	3	4	5	6
ESPECIES						
<i>Anomoeoneis</i> sp	-	-	-	-	X	-
<i>Chaetoceros elmorei</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>euglypta</i>	X	-	-	-	-	-
<i>Cyclotella quillensis</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Cymbella mexicana</i>	X	-	-	-	X	X
<i>Diploneis pseudovalis</i>	X	-	-	-	-	-
<i>Epithemia argus</i>	-	X	-	-	X	-
<i>Gomphonema olivaceum</i>	-	-	-	-	-	X
<i>Surirella striatula</i>	-	-	-	-	X	-
<i>Monoraphidium minutum</i>	-	-	-	-	X	X
<i>Oocystis parva</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Oocystis submarina</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Chroococcus dispersus</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Gonphosphaeria lacustris</i>	-	X	X	-	-	-
<i>Merismopedia tenuissima</i>	X	X	-	-	X	-
<i>Nodularia spumigena</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Oscillatoria</i> sp.	-	X	-	-	-	-
<i>Pseudanabaena</i> sp.	-	-	X	X	X	-
<i>Synechocystis aquatilis</i>	X	X	X	-	X	X
<i>Cryptomonas ovata</i>	X	X	-	-	-	-

Tabla I. Presencia-ausencia de las especies de fitoplancton en cada muestreo.

En la Tabla II se hace una comparación del número de especies y porcentaje de grupos del fitoplancton encontrados en algunos lagos salinos y en lagos de agua dulce tropicales, con el presente estudio. En general, se observa una marcada disminución en el número de especies en los lagos salinos. Williams *et al* (1990), Alcocer y Escobar (1992) y Alcocer y Williams (1993) mencionan que el número de especies en los lagos de salinidad

LAGOS	SALINIDAD	RIQUEZA ESPECÍFICA	% CYANO	% CHLORO	% EUGLE	% BACILLA	% CHRYS	% CHRYP	% DINOPHY	REFERENCIA
Lanao	105 $\mu\text{S cm}^{-1}$	70	17	63	6	6	1	4	3	Lewis (1978 a)
Tangafica	210 $\mu\text{S cm}^{-1}$	103	20	35	1	17	13	5	9	Hecky <i>et al.</i> (1978)
Naivasha	285 $\mu\text{S cm}^{-1}$	143	18	48	4	10	11	6	4	Kalff y Watson (1986)
Oloidien	660 $\mu\text{S cm}^{-1}$	94	24	40	4	7	9	10	5	Kalff y Watson (1986)
Onondaga	4626 $\mu\text{S cm}^{-1}$	28	14	39	7	29	-	7	4	Sze y Kingsbury (1972)
Sonachi	5650 $\mu\text{S cm}^{-1}$	14	50	14	-	7	-	23	7	Kalff y Watson (1986)
Pirámide	5 g l ⁻¹	37	13	15	-	76	-	-	-	Galat <i>et al.</i> (1981)
Alchichica	14180 $\mu\text{S cm}^{-1}$	20	35	15	-	45	-	5	-	Presente estudio
Nakuru	20 000 $\mu\text{S cm}^{-1}$	12	25	33	-	8	-	25	8	Kalff y Watson (1986)
Elmenteita	30 000 $\mu\text{S cm}^{-1}$	9	50	20	-	20	-	-	10	Kalff y Watson (1986)

Tabla II. Comparación de la riqueza específica y el porcentaje por grupo del fitoplancton registrado en algunos lagos tropicales de agua dulce y salinos. Modificado de Kalff y Watson (1986).

moderada o elevada, es menor cuando se compara con las localidades dulceacuícolas, hecho que coincide con el número de especies encontradas en el presente estudio.

6.1.4 Descripción de las especies dominantes

Cyclotella quillensis Bailey 1922

Planctónica, células solitarias circulares de 46-63 μm de diámetro, valvas con dos zonas, una marginal ocupando aproximadamente la tercera parte del radio, estrías 8-12/10 μm , 2 espinas marginales dirigidas en dos sentidos, dispuestas cada dos o tres estrías, la zona central con líneas radiales hacia la zona marginal. Con el microscopio de luz se observa un anillo irregular de puntos los cuales representan a las fultopórtulas centrales. Con el microscopio electrónico de barrido (MEB) se observaron de 9 a 19 fultopórtulas centrales con tres poros satélites. Las fultopórtulas de la región marginal con densidad variable 1:1, 1:2:1; con una sola rimopórtula marginal (Fig. 4).

OBSERVACIONES. Los organismos encontrados en el lago cráter Alchichica son semejantes en morfología y dimensiones a los observados por Battarbee, *et al.* (1984), sin embargo la disposición de las fultopórtulas marginales del material revisado en Alchichica, no corresponde a la indicada por estos autores (1:1) ya que además de observar células con disposición 1:1 se encontraron células con arreglo 1:2:1. *C. quillensis* está más relacionada con *C. meneghiniana*, ésta solo difiere en el tamaño, en el número de fultopórtulas centrales y en el grado de oclusión alveolar, caracteres que pueden ser variables.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. *Cyclotella quillensis* es una especie que se presenta en lagos salinos, y en México se ha registrado en Texcoco (Bradbury 1970,1971); México central (Metcalf 1988); Puente de Dios, S.L.P. (Cantoral 1997) y en el Valle de Tehuacán, Puebla (Novelo 1998). También ha sido observada en diferentes localidades de los lagos

Saskatchewan, Canadá y en los sedimentos del Holoceno temprano del lago Valencia, Venezuela. Battarbee *et al.* (1984) mencionan que *C. quillensis* se ha encontrado en los sedimentos del lago Devil's al norte de Dakota y en el lago Medicine al sur de Dakota con conductividades de 7 000-63 000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y pH de 8.2-9.2. Durante el período estudiado, en el lago Alchichica se registraron valores de conductividad de 13 350-14 180 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y pH de 8.8-9.4, los cuales coinciden con los intervalos requeridos por *Cyclotella quillensis*.

***Chaetoceros elmorei* Boyer 1914**

Planctónica, con MEB sus células son rectangulares en vista conectiva, unidas en cadenas de más de 13 células, en algunas ocasiones se llegaron a observar cadenas hasta de 20 células, convexas o planas de 5.5-10.9 μm de ancho y de 5.7-13.6 μm de largo. Vista valvar elíptica con procesos bien definidos en la mayor parte de las células. Setas intercalares robustas y ligeramente onduladas que divergen en un ángulo de aproximadamente 45°. Las esporas de resistencia fueron muy escasas de 10.9 μm de ancho y 11.5 μm de largo con pared lisa (Fig. 5).

OBSERVACIONES. Rushforth y Johansen (1986) en su trabajo de *Chaetoceros* de aguas interiores de Norte América hacen algunas consideraciones taxonómicas. Mencionan que algunas poblaciones de *Chaetoceros elmorei* y *C. muelleri* var. *muelleri* son bastante similares, ambos taxa producen esporas lisas con morfología similar y ambos pueden tener procesos en sus valvas, sin embargo, estos autores indican que dichos taxa pueden ser separados porque las poblaciones de *C. elmorei* consistentemente forman cadenas largas de células, tienen una alta proporción de células con procesos y sus setas son ligeramente onduladas, estas características fueron observadas en los ejemplares revisados con el MEB, por lo que se consideró que la especie del lago de Alchichica corresponde a *Chaetoceros*

elmorei.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Boyer (1914) hizo la primera descripción de *Chaetoceros elmorei*, la localidad de la muestra estudiada correspondió al lago Devil's al norte de Dakota, alcalino, salobre y con elevadas concentraciones de sales de magnesio y sodio. Blinn (1984) cita algunas de las investigaciones que se han realizado sobre esta especie en Norte América, como las de Verch y Blinn (1971) que hacen un estudio acerca de su periodicidad estacional en el lago Devil's. Kuehne (1941) y Rawson y Moore (1944), colectaron *C. elmorei* en los 14 lagos salinos del sur de Saskatchewan, Anderson (1958) estudió la periodicidad estacional de esta especie en el lago Lenore, Washington.

Galat et al. (1981) encontraron a *C. elmorei* en el lago Piramide, Nevada; Hammer et al. (1983, in Rushforth y Johansen 1986), también la colectan en los lagos salinos de Saskatchewan, Canadá. *Chaetoceros elmorei* no se ha encontrado en otros cuerpos de agua mexicanos por lo que es un nuevo registro para México.

***Oocystis parva* W. et G.S. West 1898**

= *O. planctonica* Chodat, 1931; *O. Chodatii* Woloszynska 1962; (posiblemente *O. lacustris*).

Planctónica, células elipsoidales, ovaladas, solitarias, o dentro de una pared celular materna lisa, sin engrosamientos polares de 10.9-12.7 μm de ancho. Células de 3.6-9 μm de largo y de 2-5.7 μm de ancho. Pared celular lisa sencilla con bordes redondeados sin papilas. Cloroplasto parietal laminar con un pirenoide. Reproducción asexual por la formación de 4 autosporas (Fig. 6).

OBSERVACIONES. Al hacer un análisis comparativo de las características taxonómicas de algunas de las especies de *Oocystis* (*O. marssoni*, *O. lacustris* y *O. parva*) se encontró que *O. parva* está relacionada con *O. lacustris* y *O. marssonii* en cuanto a la forma de la colonia,

pared celular, y tipo de cloroplasto, sin embargo, la especie que se encontró en las muestras revisadas del lago de Alchichica, se ajusta más a las características diacríticas para *O. parva* según los criterios de Reháková (1969), Komárek y Fott (1983) y Comas (1996), por lo que se utilizó este mismo nombre. Reháková (1969) menciona que *O. lacustris*, *O. marssonii* y *O. parva* pueden presentar gran variabilidad tanto en muestras de ambientes naturales como en condiciones de cultivo. Comas (1996) afirma que las estrechas relaciones entre *O. lacustris*, *O. marssonii* y *O. parva* no solo han originado confusiones en las identificaciones, sino también diferentes criterios.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Hutchinson (1967) señala que esta especie puede ser dominante en lagos profundos (oligotróficos). Caljon (1983) la registra como una especie dominante a través del año en ensenadas oligotróficas, prefiriendo agua de alta temperatura, esporádicamente en aguas mesohalinas y eurihalinas. Yacubson (1969) la encontró en el lago Maracaibo, Venezuela a los 5 m de profundidad. Parra *et al.* (1983), la registró en ríos, lagos y lagunas de Chile, Comas (1996) considera que esta especie es cosmopolita y la ha encontrado en el plancton y perifiton de ambientes eutróficos.

En América *O. parva* se registra en el lago Onondaga, Nueva York (Sze y Kingsbury 1972 y Sze 1980) y en el lago Grande Salado, Utah, U.S.A (Felix y Rushforth 1979).

En México se ha registrado en el Valle de Tehuacán, Puebla, creciendo en natas y películas compactas. Planctónica y edáfica en lagos y suelos (Novelo 1998).

***Oocystis submarina* Lagerheim 1886**

Planctónica, células elipsoidales, ovaladas, reunidas en grupos de 2-4-8 individuos, dentro de una pared celular materna lisa, con engrosamientos polares que le dan el aspecto citriforme de 10.9-21 μm de ancho y de 16.3-29 μm de largo, células de 5.4-11.7 μm de largo

y de 2.7- 4.5 μm de ancho. Pared celular lisa, sencilla, con bordes redondeados y sin papilas. Cloroplasto parietal laminar con un pirenoide, o a veces dos. La reproducción es asexual por la formación de 4-8 autosporas (Fig. 7).

OBSERVACIONES. *Oocystis submarina* se comparó con las características taxonómicas de *O. gloeocystiformis*, encontrándose que estas especies están relacionadas en cuanto a la forma de la colonia, pared celular y tipo de cloroplasto. Sin embargo, la especie observada en el lago Alchichica, se ajusta más a la descripción de Komárek y Fott (1983) para *O. submarina* por lo que se utilizó este nombre para designar a la especie encontrada en este trabajo.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Esta especie es característica de aguas dulces y salobres, frecuente en cuerpos de agua cercanos a la costa (Komárek y Fott 1983); Pasher (1915) la citó para ambientes salobres de Suecia, Noruega y Australia. Prescott (1962) y Hutchinson (1967) la citan para el fitoplancton de los lagos de Wisconsin.

Oocystis submarina no se ha encontrado en otros cuerpos de agua mexicanos, por lo que es un nuevo registro para México.

Oocystis pertenece a los géneros más difíciles de la taxonomía de las Chlorococcales, ya que muchos caracteres tradicionalmente usados para la identificación de las especies son en realidad muy variables, teniendo como consecuencia no sólo la descripción de numerosos taxa, sino también diferentes interpretaciones, los caracteres diacríticos aún no están bien definidos, pero de acuerdo con la literatura actual las especies pueden diferenciarse por el número y tipo de cloroplasto, tipo de pared celular materna, liberación de las autosporas, entre otros (Comas 1996). La morfología de las especies es muy variable, por lo que es muy importante hacer observaciones de poblaciones en muestras naturales de las cuales se sugiere a partir de ellas obtener cultivos, aunque Komárek y Fott, (1983), mencionan que la mayoría de las especies son muy difíciles de cultivar.

Oocystis es un taxón cosmopolita, aunque algunas especies se conocen sólo o están más ampliamente distribuidas en los trópicos (Comas 1996). Hutchinson (1967) menciona que el género *Oocystis* puede ser un elemento fitopláctico dominante en lagos oligotróficos.

***Synechocystis aquatilis* Sauvageau 1892**

Planctónica, solitarias o en grupos de 2-4 células esféricas o hemisféricas recién divididas, de 2.7-6.3 μm de diámetro. División celular por fisión binaria. Contenido celular homogéneo, vaina delgada incolora (Fig. 8 b y c).

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Novelo (1998) indica que esta especie se ha encontrado en Estados Unidos, Argentina, Italia, Alemania, India y Polonia en suelos de zonas áridas, lagos, lagunas, aguas marinas y en aguas alcalinas con alto contenido de sales minerales. Lewis (1986) también la registra en el lago Valencia, Venezuela con valores de conductividad de 1900 - 2 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (25°C) y pH de 8.5 - 9.5.

Kalff y Watson (1986) mencionan que *S. aquatilis* parece estar restringida a lagos tropicales.

En México se ha registrado en el Valle de Tehuacán, Puebla; Cuenca del Pánuco (Novelo 1998).

***Chroococcus dispersus* (Keissl.) Lemmermann 1904**

Planctónica, células esféricas o semiesféricas, solitarias o en grupos de dos a cuatro individuos, vainas individuales incoloras, muy poco evidentes, contenido celular homogéneo. Células de 1.8-3.6 μm de diámetro (Fig. 8 a).

OBSERVACIONES. El tamaño de las células encontradas en este estudio coincide con *C. dispersus* var. *minor*, la cual difiere de la especie tipo por tener células de menores dimensiones (1.7-2.5 μm de diámetro). Smith (1933) comenta que *C. dispersus* es una especie frecuentemente encontrada en los lagos de América pero nunca como muy abundante.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Yacubsob (1969), la encuentra en el lago Maracaibo entre los 5 y 10 m de profundidad; Prescott (1962), la encontró en aguas duras de algunos lagos de Michigan, Wis., Caljon (1983), la registra como abundante en una ensenada oligohalina en Bélgica. Lewis (1986), también la registra para el lago Valencia, Venezuela con datos de conductividad de 1 900-2 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (25°C) y pH de 8.5-9.5.

Chroococcus dispersus no se ha encontrado en otros cuerpos de agua mexicanos, por lo que corresponde a un nuevo registro para México.

***Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet et Flahault 1886**

Planctónica, filamentos rectos, en algunos casos ligeramente curvados, uniseriados, únicos, o formando densas natas de color verdoso de 9-13.5 μm de ancho; vaina delgada, fina pero distinguible, incolora y transparente. Tricomas con constricciones en los septos, de 7-12 μm de ancho, cilíndricos, no atenuados hacia la parte terminal. Células cortas en forma de barril, discoidales más anchas que largas de 2.7-5.3 μm de largo, con vesículas de gas. Heterocitos intercalares localizados a distancia más o menos regular unos de otros, subsféricos o discoidales de 8.5-14.2 μm de ancho y 3.5-5.7 μm de largo. No se observaron acinetos (Fig. 9).

OBSERVACIONES. En el lago Alchichica, durante el período de máximo florecimiento se registraron 34 heterocitos mm^{-1} . Huber (1986) menciona que en el estuario Harvey, Australia el florecimiento de *N. spumigena* fue denso y prolongado, siendo la frecuencia de los heterocitos variable, pero alta durante el período rápido de crecimiento (20 heterocitos mm^{-1}). Frecuentemente los filamentos se encontraron epifitados por el protozoario *Rhabdostyla nebulifera* al igual que ocurrió en el lago cráter Atexcac, Puebla (Macek *et al.* 1994).

Nordin y Stein (1980), hacen la revisión taxonómica del género *Nodularia* con material

colectado en el campo, desarrollo de cultivos en el laboratorio y estudio de ejemplares de herbario, indicando que todos los taxa descritos pertenecen ya sea a *N. harveyana* o a *N. spumigena*, en su opinión, las dimensiones son el principal carácter diacrítico para diferenciar ambas especies. Por otro lado, Komárek *et al.* (1993), consideran como una característica importante, la presencia o ausencia de vesículas de gas, *N. harveyana* nunca las presenta, es perifítica y béntica en ambientes salinos, en el litoral de los lagos y áreas costeras. *N. spumigena* forma vesículas de gas y es una especie euplanctónica en ambientes marinos en el mar Báltico y aguas interiores, con alto o moderado contenido en sales minerales. Estos autores han considerado características morfológicas y condiciones ecológicas particulares para separar al género *Nodularia* en siete especies.

Komárek *et al.* (1993), describen a *Nodularia spumigena* como una especie con filamentos que pueden ser rectos, curvados, irregularmente espiralados o enrollados. La especie encontrada en el lago de Alchichica corresponde a una población de filamentos rectos, algunas veces ligeramente flexuosos pero nunca enrollados o en espiral. Por otro lado, estos mismos autores indican que *Nodularia spumigena* y *N. litorea* a menudo son difíciles de distinguir con el microscopio de luz, sin embargo, son claramente diferentes considerando sus características ultraestructurales, tamaño de sus vesículas de gas y su densidad por μm^2 , ancho de la vaina y número de tilacoides. Šmarda y Šmajš (1996) hacen un estudio de microscopía electrónica de transmisión, con relación a las características de las vesículas de gas de las especies de *Nodularia*, contando el número de vesículas por $0.1\mu\text{m}^2$. Tavera y Komárek (1996), mencionan que para identificar las poblaciones de *Nodularia spumigena/baltica/litorea* estas deben de ser estudiadas utilizando métodos de biología molecular. Se recomienda también estudiar a esta especie en condiciones de cultivo.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Geddes (1984) registró para el lago Alexandrina, Sur de

Australia, florecimientos de *N. spumigena* desde 1966 hasta 1977 en general para finales de primavera y principios de verano. Horne y Galat (1985) y Galat *et al.* (1990), indican que en el lago Pirámide, Nevada el florecimiento de *N. spumigena* se presentó en el verano y otoño. Hamel y Huber (1985), Huber y Hamel (1985), Huber (1986) y Lukatelich y McComb (1986) mencionan que en el sistema estuarino de Peel-harvey, Oeste de Australia, el florecimiento de *N. spumigena* se desarrolló durante los meses de primavera y verano. Nehring (1993) observó un florecimiento de superficie de *N. spumigena* en un lago salobre Banter See de las costas del Mar del Norte Alemán en el mes de agosto de 1990.

Frecuentemente se han observado florecimientos de *N. spumigena* en el lago Walker, Nevada durante mayo y principios de junio, antes o cerca del inicio de la estratificación termal de verano, repitiéndose durante el verano y principios de otoño cuando la estratificación termal es estable, por lo que la estratificación térmica no sería un prerequisite para la formación de los florecimientos (Galat *et al.* 1990). Los florecimientos de *Nodularia* también han sido observados en lagos salinos polimícticos como el lago Corangamite, Australia y en el Mar Báltico (Horne y Galat 1985, Galat *et al.* 1990, Komárek *et al.* 1993).

N. spumigena se ha encontrado en Norte América (Felix y Rushforth 1979; Nordin y Stein 1980, Galat *et al.* 1981).

N. spumigena se encuentra en ambientes naturalmente alcalinos, moderadamente salinos y con pH elevado (Nordin y Stein 1980, Geddes 1984, Blackburn *et al.* 1996). Galat *et al.* (1981) la citan para el lago Pirámide, con valores de salinidad de 5.3 g l⁻¹; pH de 9.2 y conductividad de 8 420 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Pérez *et al.* (1999), la registran en la laguna Castillos, Uruguay con valores de pH de 7.5- 8.3 y valores de conductividad de 7 000 - 8 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Pérez *et al.* (1999) mencionan que la ocurrencia del florecimiento de *Nodularia* en la laguna Castillos, Uruguay apoya la hipótesis de que se trata de un evento natural y no

necesariamente consecuencia de un proceso de eutroficación (Hallegraeff 1993). Los resultados del presente trabajo indicarían también, que el desarrollo del florecimiento de *N. spumigena* en el lago Alchichica se asocia más bien a un evento natural ya que se caracteriza por ser un lago oligotrófico la mayor parte del tiempo.

En el lago Alchichica, el florecimiento de superficie de *N. spumigena*, se observó en el mes de abril y se caracterizó por desarrollarse en condiciones de calma y cuando el lago presentó estratificación térmica poco marcada. *N. spumigena* también se ha encontrado en el lago cráter Atexcac, Puebla y las poblaciones son idénticas a las observadas en el lago Alchichica (Tavera y Komárek 1996).

En todo ambiente con un florecimiento en superficie, puede suceder que se levante un viento fuerte que dispersará a las células en la columna de agua, o bien que sople una brisa suave que dé lugar a la acumulación de las células, formando natas de diferente aspecto. La periodicidad con que se producen los florecimientos, puede ser diaria, anual o a intervalos no predecibles (Pizzolon 1996).

6.1.5 Descripción de especies temporales

Cymbella mexicana (Ehr.) Cleve 1894

= *Cocconema mexicanum* Ehrenberg 1844; *Cymbella kamtschatica* Grunow 1875

Valvas dorsoventrales, con el margen dorsal arqueado, margen ventral ligeramente curvado, extremos redondeados, de 20-27 μm de ancho y de 95-135 μm de largo. Área axial arqueada, área central pequeña, ensanchada debido a que las estrías centrales son más cortas en ambos lados, con un estigma bien diferenciado en la parte central. Rafe lateral filiforme, los extremos proximales terminan en un punto evidente, los distales se recurvan hacia el margen dorsal. Estrías en la parte dorsal media de la valva 6-8/10 μm , en la parte ventral

media de la valva 8/10 μm y en los extremos de 8-10/10 μm . Las estrías están formadas por areolas de 8-11/10 μm . Los extremos de la valva se observan libres de estrías (Fig. 10 a).

OBSERVACIONES. Los ejemplares revisados con microscopio de luz coinciden con las características morfológicas mencionadas por Patrick y Reimer (1975) y por Terao *et al.* (1993).

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. *Cymbella mexicana* ha sido registrada para aguas estancadas (Watanabe 1990; Mizuno Saito 1990 *in* Terao *et al.* 1993), formando colonias sobre rocas sumergidas en el río Tama, Tokio (Terao *et al.* 1993). Se encuentra principalmente en aguas duras, especie epifítica, probablemente alcalífila (Patrick y Reimer 1975).

Cantoral, (1997) menciona su distribución en México: El Salto, El Meco, Micos, Puente de Dios, San Luis Potosí; Guanajuato, río Lerma cerca de Acámbaro; Hidalgo, cerro San Andrés (Ortega 1984); México central, (Metcalf 1985, 1988); Texcoco, Estado de México (Bradbury 1971); San Luis Potosí, Huasteca Potosina (Cantoral 1990, 1993; Carmona 1993); Tlaxcala (Quintana 1961); Morelos (Valadez 1992); Puebla, Tehuacán (Cuesta 1993).

C. mexicana también se ha registrado en sedimentos lacustres del paleolago Tlaxcala, Tlax. de las minas de "Santa Bárbara" y "el Lucero" (Cuna 1997, Rodríguez 1998, Juárez 1998).

Se ha encontrado en rápidos, pozas, terrazas comunicadas con velocidad de corriente lenta, forma parte de crecimientos filamentosos adheridos sobre lodo, natas de Zygnematales. Perifítica de *Cladophora glomerata*, en aguas calcáreas (Cantoral *et al.* 1995). En el lago cráter Alchichica se encontró en la zona limnética, sin embargo la mayor abundancia de esta especie se encuentra en el litoral, por lo que se piensa que su presencia se debe a que se desprendió de su sustrato y fue acarreada por el viento hasta esta zona.

***Monoraphidium minutum* (Naegeli) Komárková-Legnerová 1969**

= *Raphidium minutum* Nägeli 1849; *Selenastrum minutum* (Nägeli) Collins 1909; *Ankistrodesmus minutissimus* Korschikoff 1953; *Ankistrodesmus lunatus* Belcher et Swale 1962; *Choricystis minuta* (Nägeli) Hind. 1988.

Planctónica, células solitarias rectas, arqueadas o ligeramente sigmoides; extremos redondeados o ligeramente atenuados. Pared celular lisa, cloroplasto parietal que ocupa casi todo el contenido celular, no se observó pirenoide. Células de 3.6-6.3 μm de largo y 0.9-1.8 μm de ancho. No se observaron autosporas (Fig. 10 b).

OBSERVACIONES. Comas (1996) señala que en las investigaciones de Eloranta (1979) y Krienitz *et al.* (1983) se ha demostrado la existencia de pirenoides con diferente estructura y sin cubiertas de almidón, solo visibles al microscopio electrónico por lo que no se debe de considerar la presencia o ausencia de pirenoide como un carácter diacrítico. Komárková-Legnerová (1969), hace un estudio sobre la sistemática y ontogénesis de los géneros *Ankistrodesmus* y *Monoraphidium* en el que caracteriza a *M. minutum* como una especie sin pirenoide. Los ejemplares revisados en el lago Alchichica coinciden con los caracteres morfológicos y las dimensiones celulares descritas por Komárkova-Legnerová (1969) y por Komárek y Fott (1983) por lo cual se consideró el nombre de esta especie.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. *M. minutum* es cosmopolita, frecuente en los trópicos en ambientes más o menos alcalinos (Comas, 1996). Común y a menudo abundante a través del año en ensenadas oligohalinas, prefiere altas temperaturas del agua, menos común en ensenadas mesohalinas, excepto en una pequeña ensenada mesohalina donde se observaron 1 400 000 cél. ml⁻¹; eurihalino limnobionte, eutrófico, mesosapróbico, planctónica (Caljon

1983).

Novelo, (1998) menciona su distribución para Japón, Estados Unidos, India, y Buenos Aires, Argentina.

En México se ha encontrado en el Valle de Tehuacán, Puebla y en la cuenca del Pánuco en lagos, dunas de arena y ríos.

***Merismopedia tenuissima* Lemmermann 1898**

= *Agmenellum quadruplicatum* (Meneh.) Bréb.

Colonias pequeñas en forma de placa rectangular, formadas generalmente por 16 células esféricas o hemisféricas de reducidas dimensiones de 1-2.5 μm de diámetro, arregladas en una envoltura gelatinosa poco perceptible, contenido celular homogéneo. Colonias de 16-18 μm de diámetro (Fig. 10 c).

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Theodulus (1981) *in* Parra *et al* (1982) la encontró en las lagunas Figueroa, Lynch, Rubens y lagos Pehoe, Porteño y Toro del sistema de lagos de la Cordillera del Paine y alrededores en Chile

M. tenuissima es una especie muy común a través del año en ensenadas y riachuelos oligohalinos, abundante durante el período otoño-invierno. Eurihalino limnobionte; mesosaprobia (Caljon1983).

Ortega (1984) menciona su distribución en México: Estado de México; Ixtepec, Oaxaca y Veracruz.

De las especies dominantes y temporales descritas para el lago cráter alchichica *Oocystis parva*, *Synechocystis aquatilis*, *Monoraphidium minutum* y *Merismopedia tenuissima* se han registrado en ambientes tropicales de agua dulce como el lago Naivasha y en el lago Oloidien, Kenia, con valores de conductividad de 285 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y 660 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (25°C)

respectivamente; también se han encontrado en los lagos salinos tropicales como el lago Sonachi, Kenia, con valores de conductividad de $5\ 650\ \mu\text{S cm}^{-1}$ y en los lagos Nakuru y Elmenteita, con valores de conductividad de $20\ 000\ \mu\text{S cm}^{-1}$ y $30\ 000\ \mu\text{S cm}^{-1}$ respectivamente (Kalfy y Watson 1986), lo cual indica que estas especies tienen un amplio rango de distribución.

FIGURA 4. *Cyclotella quillensis* Bailey 1922

- a. Micrografía de luz con contraste de fases. Vista externa de la valva completa. 800 X. pág. 31
- b. Micrografía con MEB. Vista interna de la valva completa.
- c. Micrografía con MEB. Vista interna mostrando anillo de las fultopórtulas centrales.
- d. Micrografía con MEB. Vista externa mostrando margen externo y la disposición de las espinas.
- e y f. Micrografía con MEB. Detalle del área central mostrando canales radiales.
- g. Micrografía MEB. Vista interna de la zona marginal mostrando la disposición de las fultopórtulas y la abertura de la rimopórtula.
- h. Micrografía con MEB. Detalle de la rimopórtula mostrando la abertura en forma de S.
- i. Micrografía con MEB. Detalle de las fultopórtulas centrales.

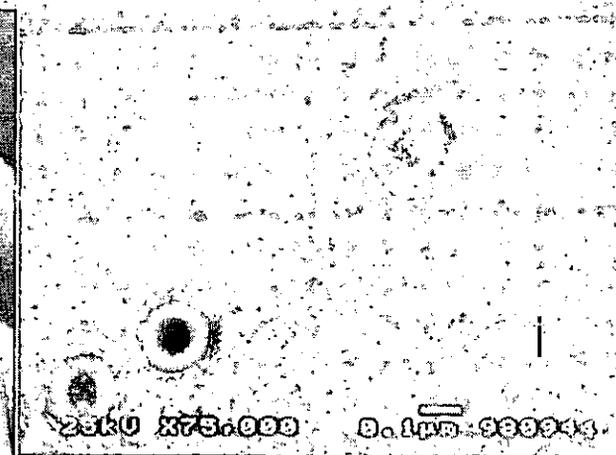
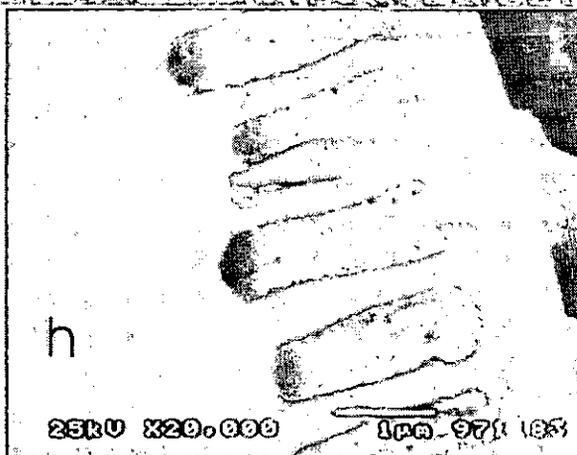
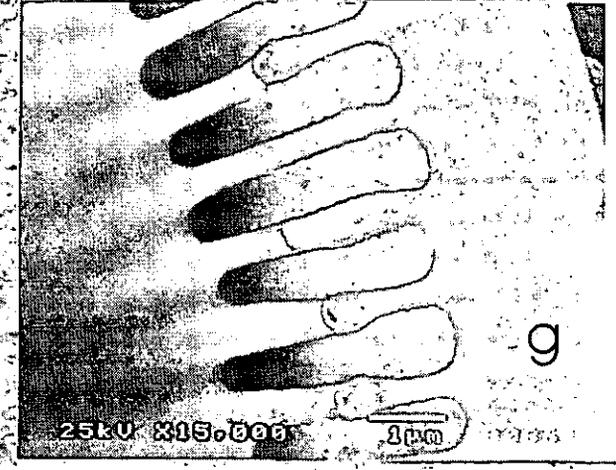
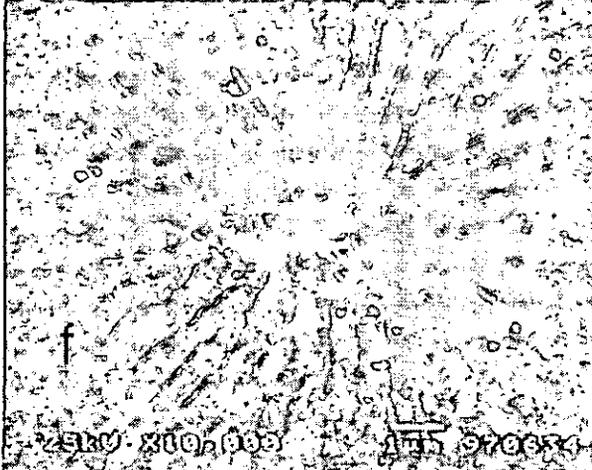
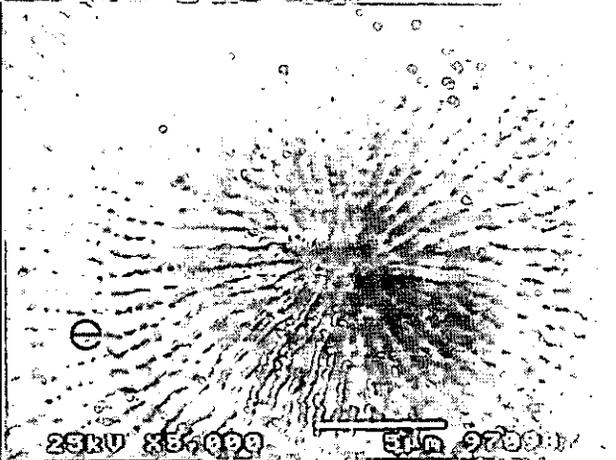
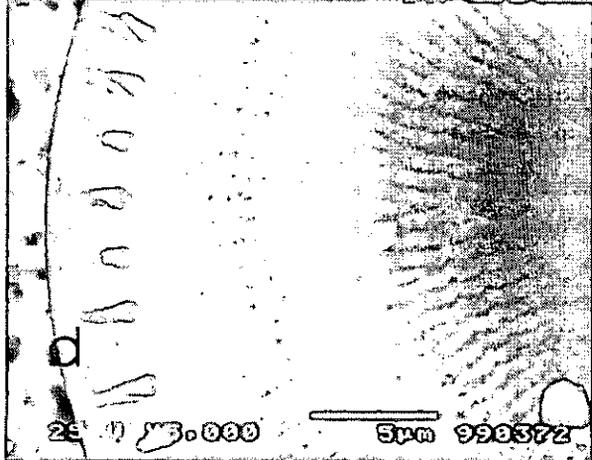
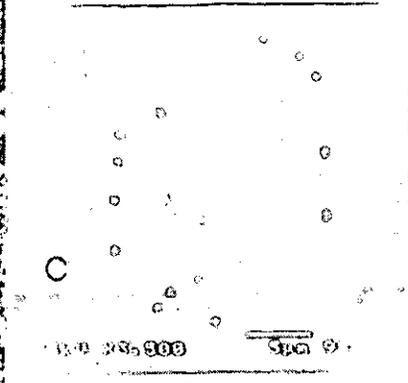
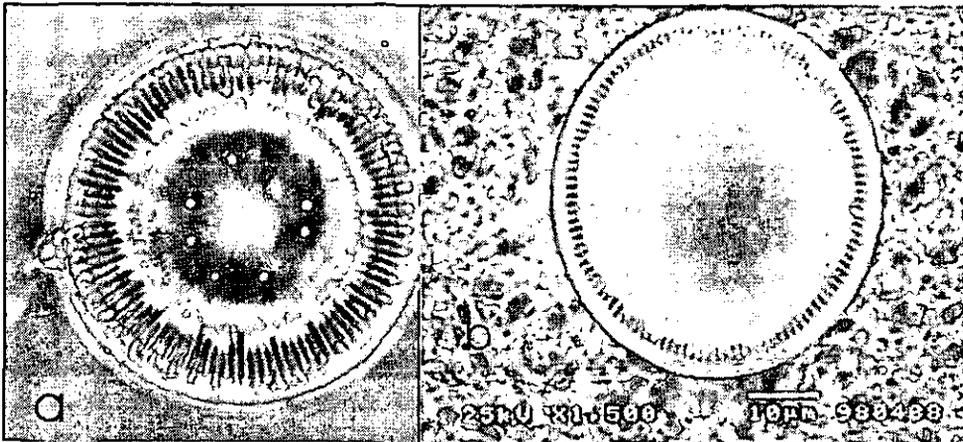


FIGURA 5. *Chaetoceros elmorei* Boyer 1914

- a. Micrografía de luz con contraste de fases. Vista conectiva de la cadena mostrando la disposición de las setas. 640X, pág. 32
- b. Micrografía con MEB. Vista conectiva de la cadena.
- c. Micrografía con MEB. Vista conectiva de la cadena y detalle de la superficie externa de la valva.

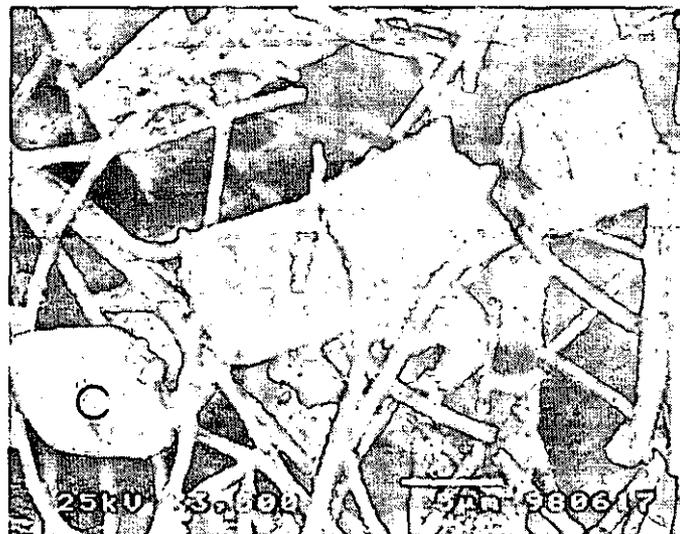
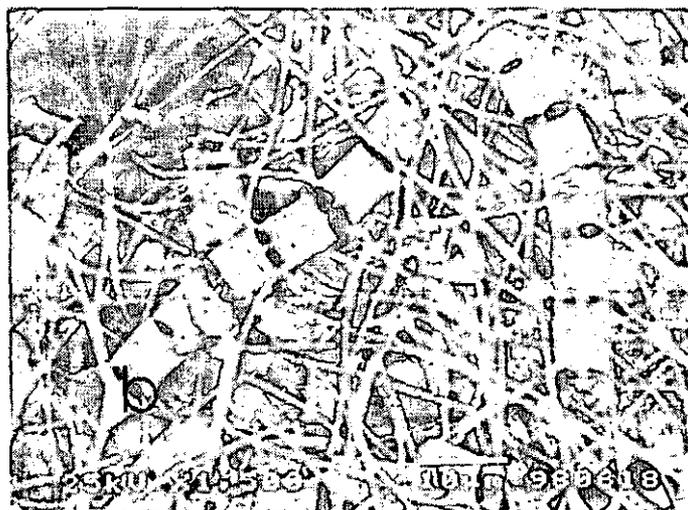
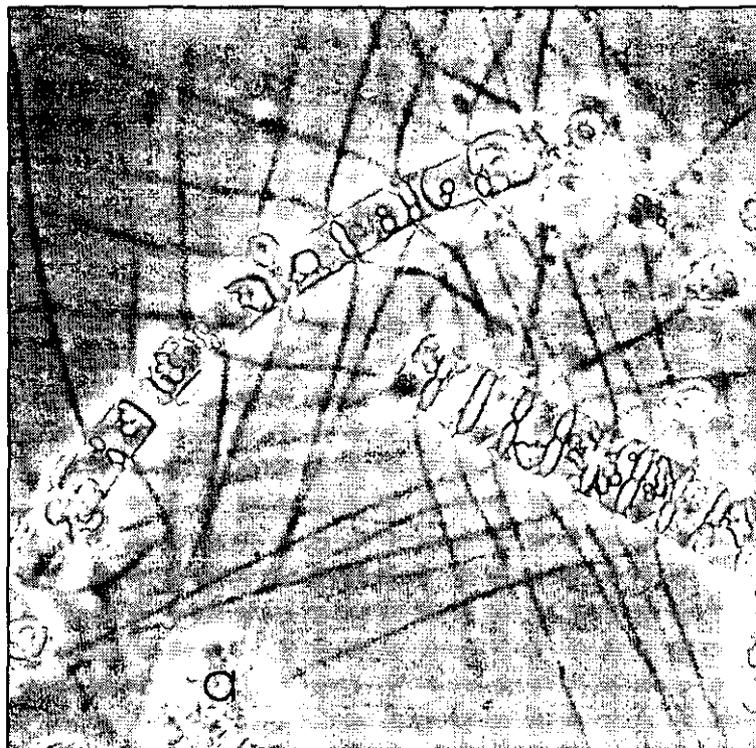


FIGURA 6. *Oocystis parva* W. & G.S. West 1898

- a. Micrografía de luz con contraste de fases. Células solitarias. 1 260X, pág. 33
- b. Micrografía de luz con contraste de fases. Células dentro de una pared celular materna lisa. 1 260X.

FIGURA 7. *Oocystis submarina* Lagerheim 1886

- a. Micrografía de luz con contraste de fases. Células en grupos de 4-8 mostrando la pared celular materna lisa con engrosamientos polares. 1 260 X. pág. 34
- b. Micrografía de luz con contraste de fases. 1 600X.

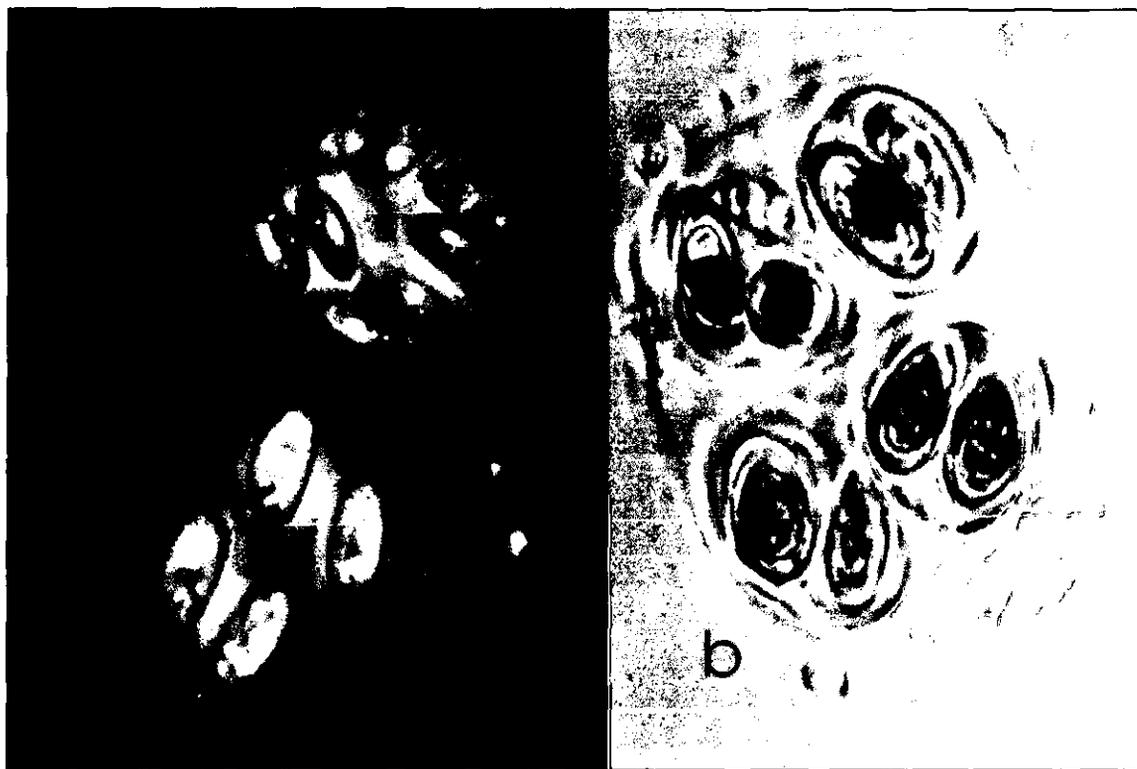
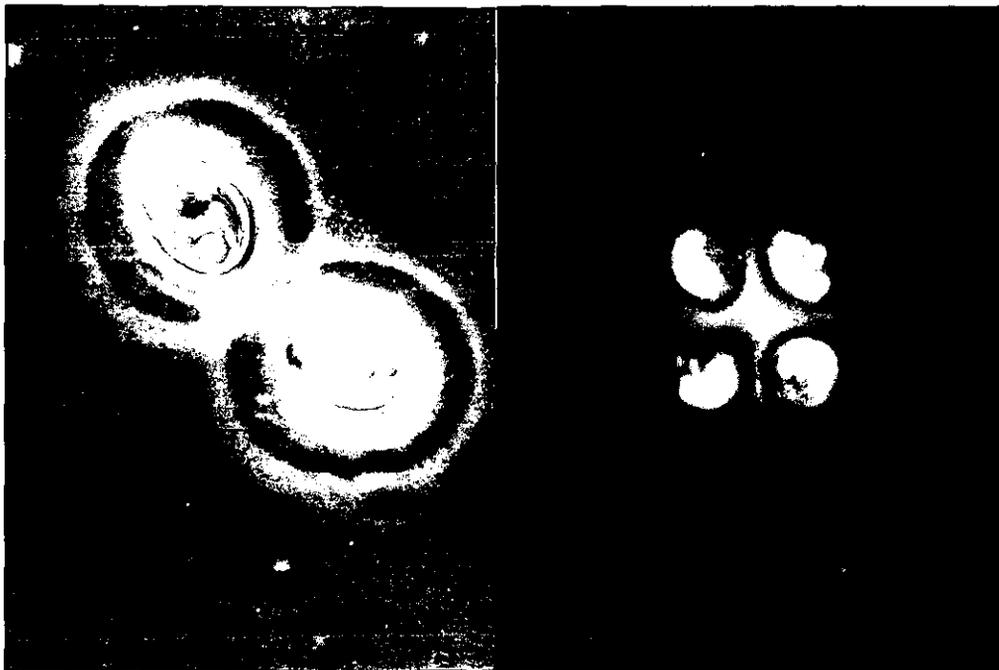


FIGURA 8.***Chroococcus dispersus* (Keissl.) Lemmermann 1904**

- a. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Células solitarias y en proceso de división celular. pág. 36

***Synechocystis aquatilis* Sauv. 1892**

- b. Micrografía de luz con contraste de fases. Células solitarias y en proceso de división celular. 1 260X. pág. 36
- c. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Células solitarias y en proceso de división celular.

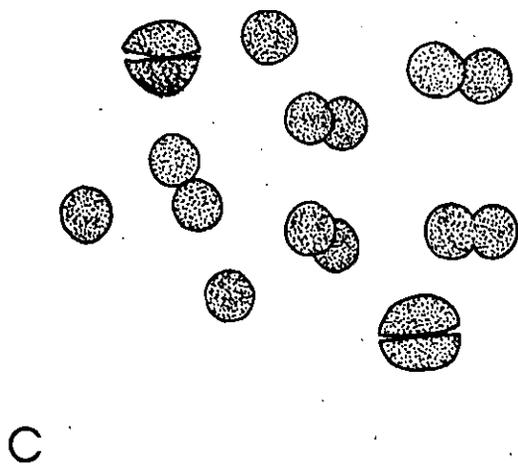
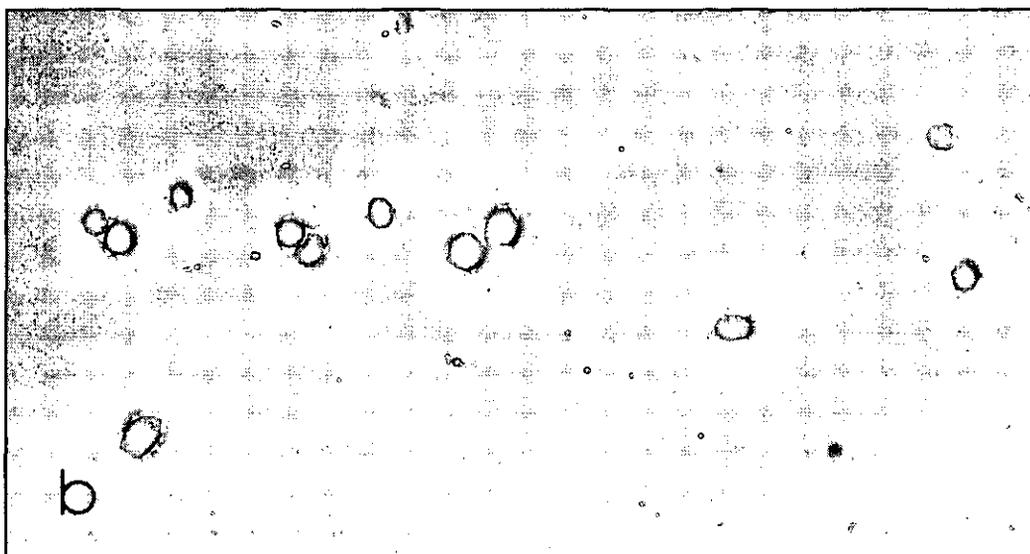
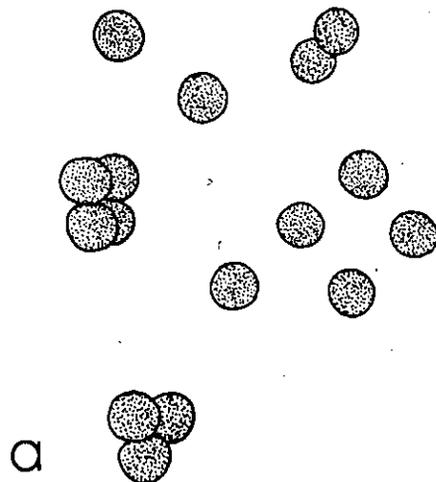


FIGURA 9. *Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet et Flahault 1886

- a. Micrografía de luz con contraste de fases. Grupo de filamentos. 200X, pág. 37
- b. Micrografía de luz con contraste de fases. Detalle del filamento mostrando los heterocitos. 800X.

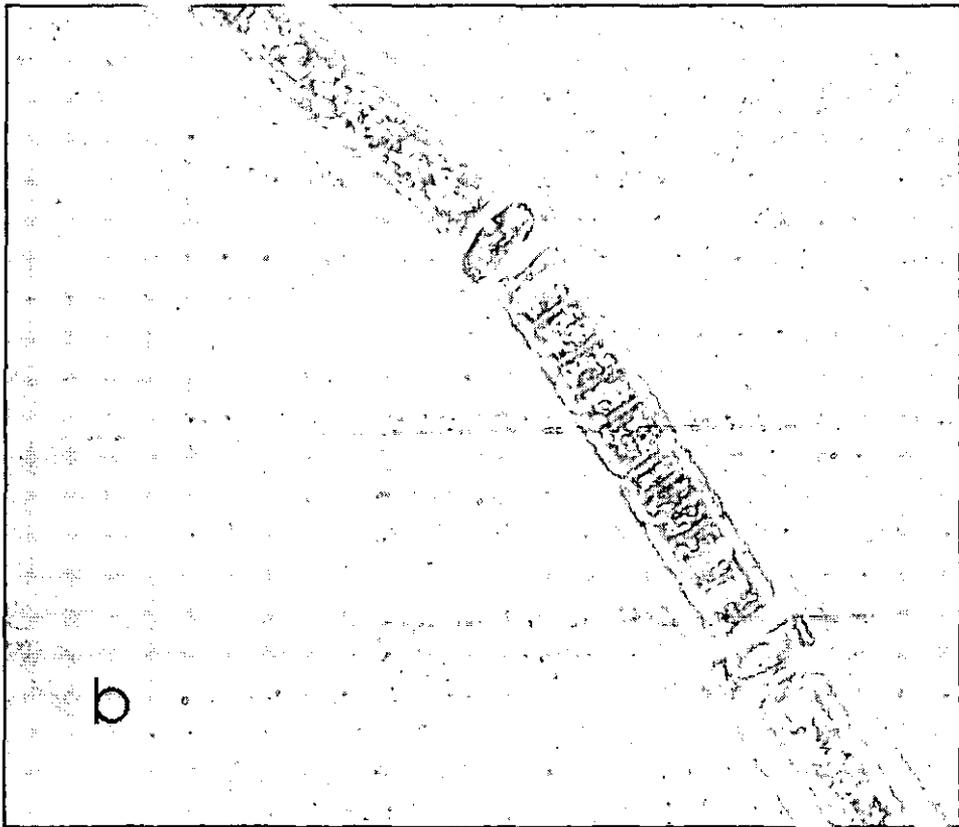
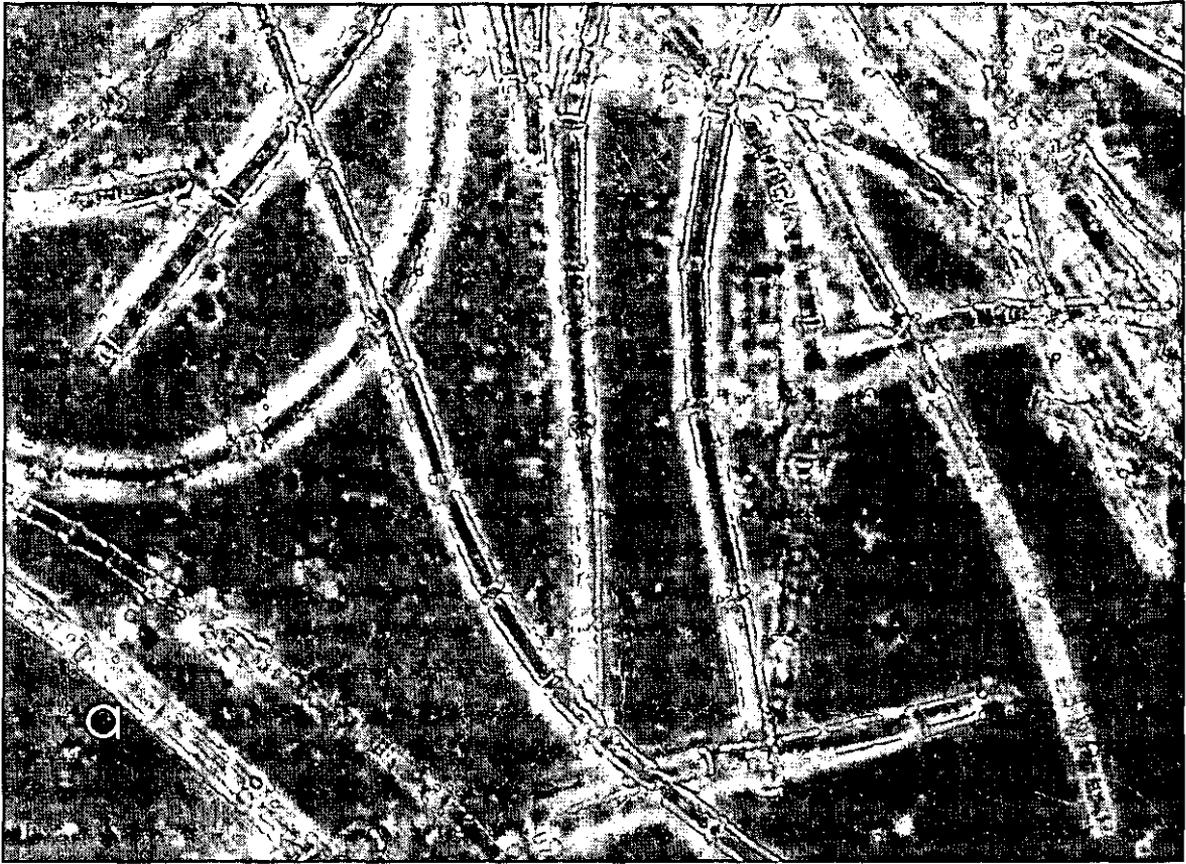


FIGURA 10.

Cymbella mexicana (Ehrenberg) Cleve 1894

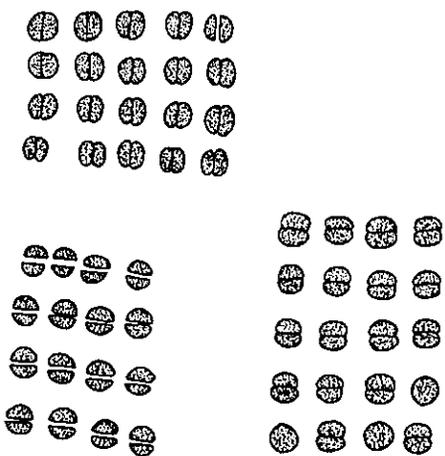
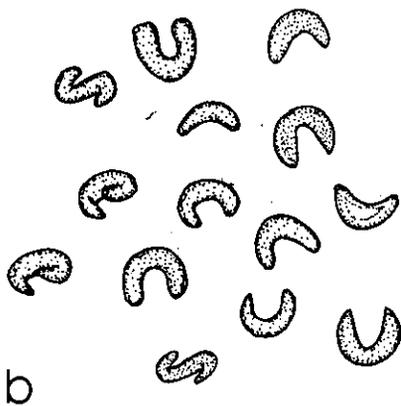
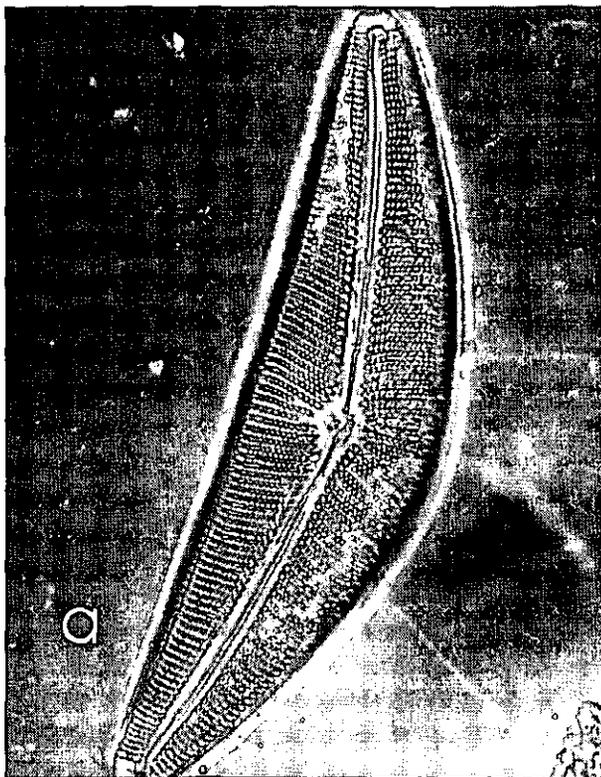
- a. Micrografía de luz con contraste de fases. Vista valvar de la célula completa mostrando el detalle de las estrias. 500X, pág. 40

Monoraphidium minutum (Näg.) Kom-Legn. 1969

- b. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Células solitarias. pág. 42

Merismopedia tenuissima Lemmermann 1898

- c. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Placa rectangular de células. pág. 43



c

6.1.6 Variación espacio-temporal

En la figura 11 se muestra la variación porcentual de los grupos de algas fitoplanctónicas durante el período de estudio; se observa la relación de los máximos de *N. spumigena* y los grupos mejor representados en el momento de crecimiento intenso.

En las figuras 12 y 13 se presenta una comparación de abundancia entre *N. spumigena* y las cinco especies con las mayores densidades.

Tres estados de composición algal ocurrieron en el lago en relación con sus períodos de circulación y estratificación. En el muestreo inicial de este estudio, marzo, cuando el lago se encontraba en la parte final de período de circulación, *N. spumigena*, *O. parva* y *O. submarina* tuvieron valores de abundancia relativamente similares 974, 699 y 347 cél ml⁻¹ respectivamente y fueron observadas principalmente entre 0.5 y 20 m de profundidad.

Los meses de abril, mayo y junio correspondieron a la fase de transición circulación-estratificación del lago. En el mes de abril se presentó el florecimiento de *N. spumigena*, los picos de abundancia de *N. spumigena* aumentaron notablemente, especialmente en la muestra del 22 de abril con valores de 159 592 cél ml⁻¹ en superficie (0.5 m). *O. parva* y *O. submarina* se mantienen más o menos estables con relación a la fecha anterior (1 829 cél ml⁻¹ y 254 cél ml⁻¹ respectivamente) a 10 m de profundidad y se observa un aumento de *C. elmorei* (1 350 cél ml⁻¹).

Desde el muestreo de mayo se observa un pico de abundancia de *O. parva* y de *O. submarina* con diferentes fluctuaciones hasta el muestreo de septiembre, que coincide con una marcada caída de *N. spumigena*; una situación similar se observa en junio 26 en la cual *O. parva* llega a ser muy abundante con valores de 11 064 y 7 817 cél ml⁻¹ en 0.5 y 10 m de profundidad respectivamente en relación con *N. spumigena* con valores de 4 318 en el nivel superficial, ya que a mayores profundidades únicamente se observaron 10 y 78 cél ml⁻¹ en 20

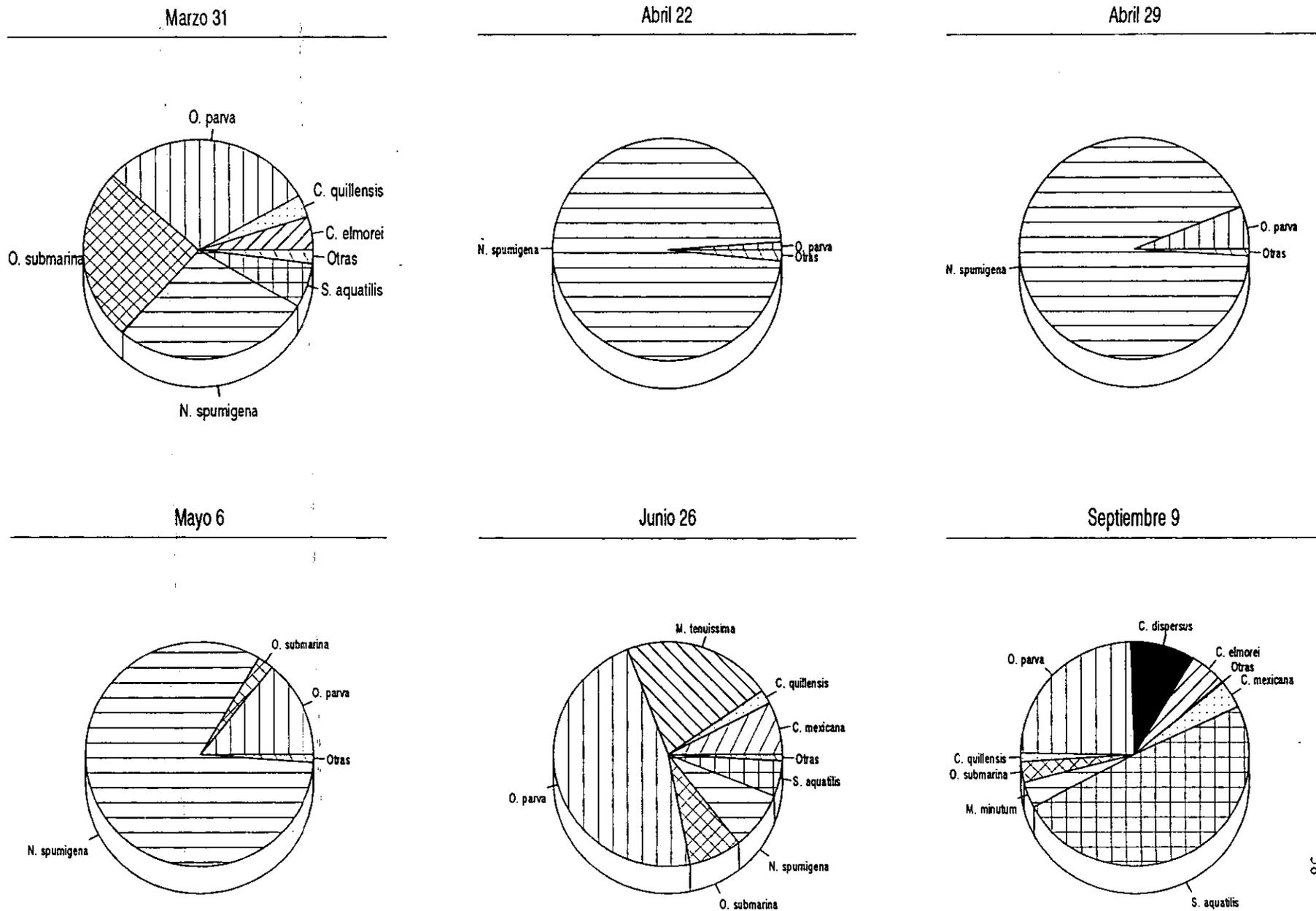
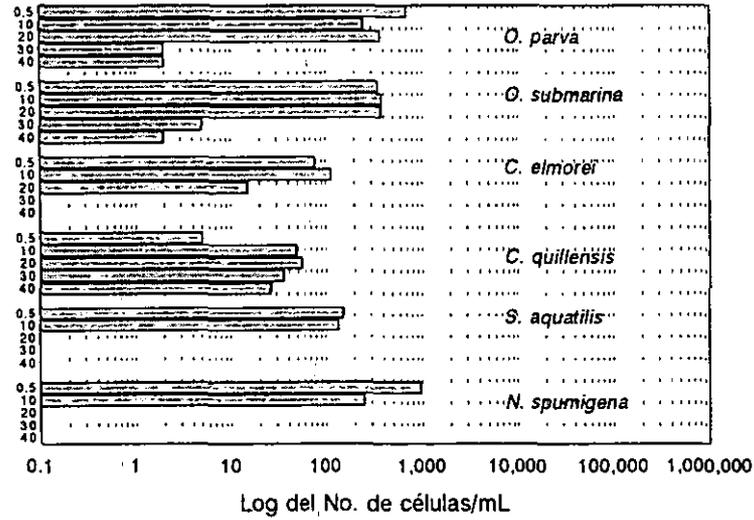


Figura 11. Variación porcentual de la composición del fitoplancton durante el periodo de estudio.

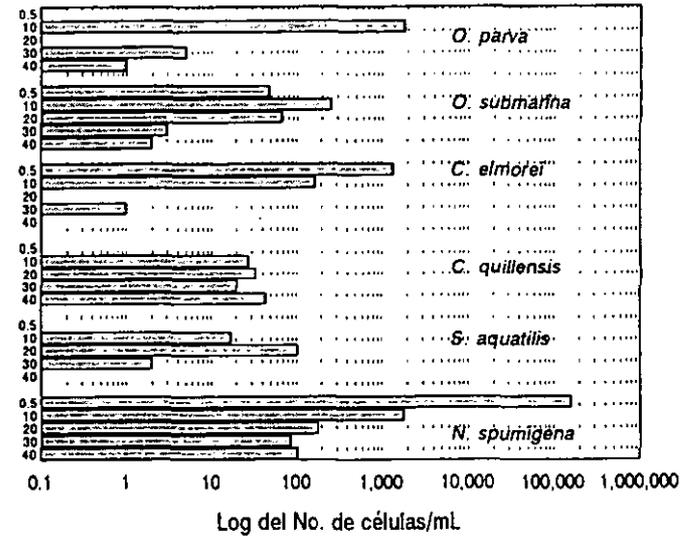
Marzo 31

Prof. (m)



Abril 22

Prof. (m)



Abril 29

Prof. (m)

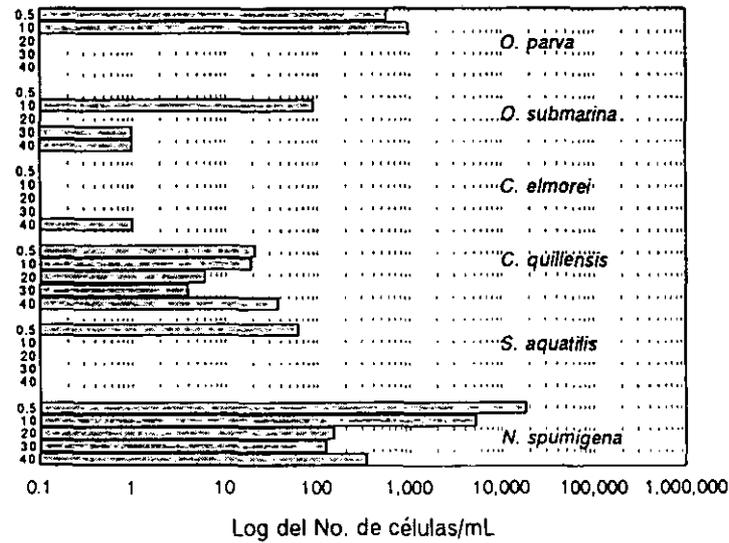
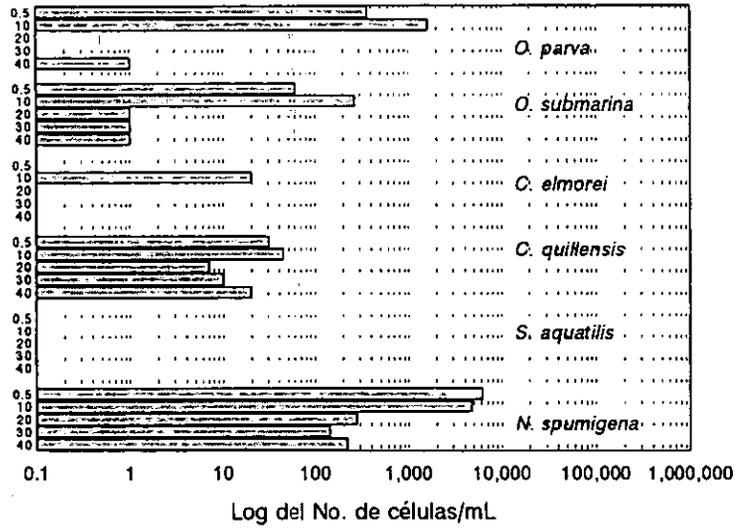


Figura 12. Comparación de densidades entre *N. spumigena* y las especies más abundantes. Marzo-Abril 1995

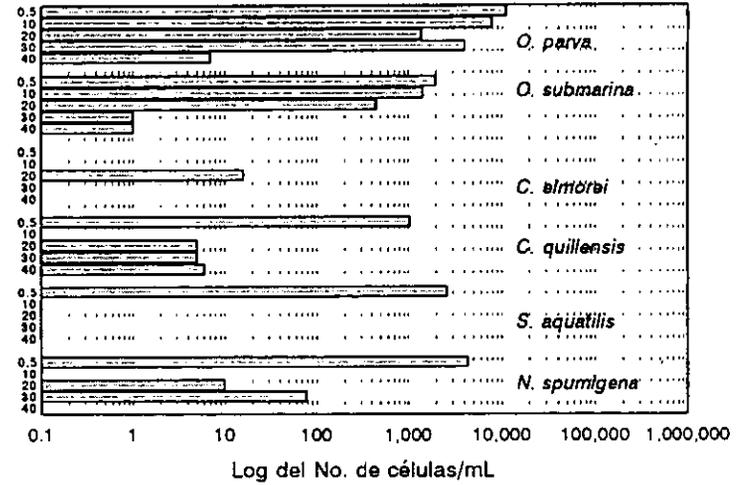
Mayo 6

Prof. (m)



Junio 26

Prof. (m)



Septiembre 9

Prof. (m)

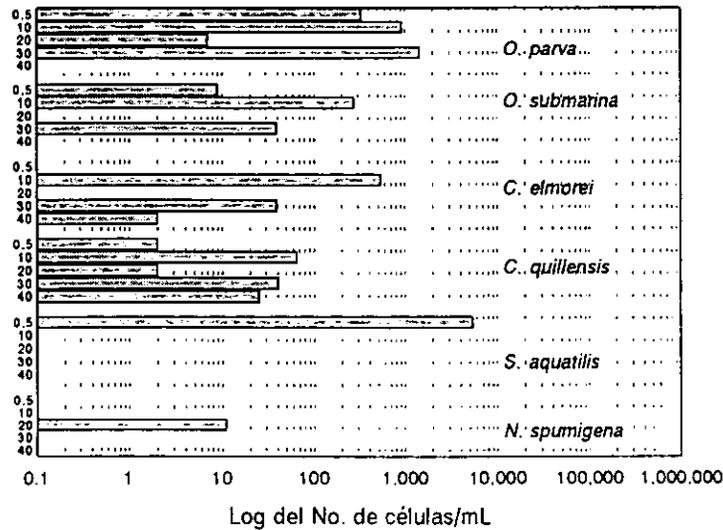


Figura 13. Comparación de densidades entre *N. spumigena* y las especies más abundantes. Mayo-Septiembre 1995

y 30 m de profundidad.

En el muestreo del mes de junio *C. quillensis* tuvo valores de abundancia superiores a los de los otros meses con 1 040 cél ml⁻¹ a 0.5 m de profundidad. Esta especie se presentó en todos los muestreos y en la totalidad de las profundidades, con excepción de junio 26 a 10 m de profundidad.

Otras especies importantes cuya presencia con elevadas densidades coincidió con la caída del pico de abundancia de *N. spumigena*, que se observaron en el muestreo de septiembre, cuando el lago se encontraba ya estratificado, fueron *C. dispersus*, y *S. aquatilis* con valores de abundancia de 990 cél ml⁻¹ a 30 m de profundidad y de 5 394 cél ml⁻¹ a 10 m de profundidad respectivamente. *C. dispersus* se encontró en todos los muestreos, principalmente a profundidades de 30 y 40 m; *S. aquatilis* se observó entre los 0.5 y 30 m de profundidad, siendo sus valores de abundancia en general bajos.

Las especies que sólo se encontraron en forma abundante durante algunos de los meses estudiados fueron: en junio, *Merismopedia tenuissima*, con valores de 10 834 cél ml⁻¹ a 20 m de profundidad. *Cymbella mexicana* se observó en junio y septiembre entre 0.5 y 10 m de profundidad con valores de abundancia de 362 y 442 cél ml⁻¹ respectivamente. *Monoraphidium minutum* también se observó en junio y septiembre pero sus mayores valores de abundancia estuvieron entre 10 y 20 m de profundidad con 352 y 240 cél ml⁻¹ respectivamente.

Las diatomeas, con excepción de *C. elmorei* y *C. quillensis*, que tuvieron valores de abundancia muy bajos fueron *Anomoeoneis* sp. que se observó únicamente en junio a 30 m de profundidad, *Cocconeis placentula* var. *euglypta* se observó en marzo entre 0.5 y 20 m de profundidad. *Diploneis pseudovalis* se observó en marzo a 10 m de profundidad, *Epithemia argus* se observó en abril y junio a 20 y 30 m de profundidad respectivamente.

Ghomphonema olivaceum se observó en septiembre a 20 m de profundidad y *Surirella striatula* se observó en junio a 40 m de profundidad. Estas diatomeas se caracterizan por ser bénticas y son abundantes en la zona litoral del lago, por lo que su presencia se pudo deber a que fueron acarreadas por las corrientes de agua.

Las cianofíceas con valores muy bajos de abundancia, pero que se observaron durante el florecimiento de *N. spumigena*, fueron *Gomphosphaeria* cf. *lacustris* y *Oscillatoria* sp. a 20 m de profundidad, sin embargo, a esta profundidad, *N. spumigena* tuvo un valor de abundancia similar a esta dos especies (179 cél ml⁻¹). La presencia de *Pseudanabaena* coincide con la desaparición total de *N. spumigena* a 40 m de profundidad en el mes de junio. *Cryptomonas ovata* se observó en marzo, abril y junio entre 20 y 30 m de profundidad en este caso también cuando la abundancia de *N. spumigena* a estas profundidades fue baja. *N. spumigena* fue muy abundante en las muestras de abril 22 y 29 entre 0.5 y 10 m de profundidad, iniciando su declinación en mayo hasta su menor abundancia en el mes de septiembre en el que sólo se observaron filamentos aislados.

Con respecto a lagos tropicales, Kalff y Watson (1986), mencionan que las diatomeas, cianofíceas y clorofíceas fueron los grupos dominantes en el lago Naivasha, Kenia, mientras que el lago Oloidien, Kenia, fue mucho menos diverso, dominando las cianofíceas. En los dos lagos estos autores registran a *C. dispersus*, *M. tenuissima*, *S. aquatilis*, *M. minutum* y *O. parva*, especies que también se encontraron en el lago Alchichica.

De las especies encontradas en el lago cráter Alchichica durante el período de estudio *C. quillensis*, *C. elmorei* y *N. spumigena* se han registrado como características de ambientes salinos. *Anomoeoneis* sp. *C. placentula* var. *euglypta*, *C. mexicana*, *D. pseudovalis*, *E. argus*, *G. olivaceum*, *S. striatula*, *M. minutum*, *O. parva*, *O. submarina*, *C. dispersus*, *G. lacustris*, *M. tenuissima*, *S. aquatilis* y *C. ovata* han sido citadas para ambientes de salinidad variable,

desde dulceacuícolas hasta salinos, por lo que puede considerarse que su rango de tolerancia a la concentración de sales disueltas es muy amplio. Como resultado del presente estudio se amplía el intervalo de distribución para estas especies en ambientes salinos.

Lewis (1973, 1978 a, b, 1986) en sus estudios realizados en el lago Lanao, Filipinas y en el lago Valencia, Venezuela, mostró que la variación temporal del fitoplancton en los lagos tropicales es afectada por los eventos de estratificación termal. En los lagos templados la secuencia temporal del fitoplancton tiene un ciclo regular anual caracterizado por la dominancia de diatomeas en la primavera y de cianofíceas y dinoflagelados al final del verano (Reynolds 1984). En contraste, en el lago Lanao se observó que el grupo de las criptofíceas es también importante y su período de deominancia ocurre antes del período en que dominan las cianofíceas (Lewis 1978 b).

Galat *et al.* (1981 y 1990) hicieron el estudio limnológico del del lago Piramide, Nevada, durante el período 1972-1986, analizaron la variación espacio temporal del fitoplancton, y observaron en general que éste estuvo representado principalmente por diatomeas, con diferentes especies de *Cyclotella* que dominaron el epilimnion durante el invierno, en primavera aparecieron especies de clorofíceas del género *Crucigenia* y cianofíceas del género *Chroococcus*. Durante la estratificación del verano y otoño se presentó el florecimiento de *Nodularia spumigena* observándose también *Chaetoceros elmorei*, especie frecuente en los lagos salinos de Norte América (Rawson y Moore 1944). Es importante hacer notar que el lago Alchichica comparte con el lago Pirámide, además de algunas especies fitoplantónicas, características tales como el ser hiposalino, monomítico calido y presentar un pH elevado (Galat 1981).

En otros estudios realizados, como en el lago Titicaca, Bolivia, se observó que en muchos aspectos, éste se comporta físicamente como un lago tropical estratificado de menor

altitud, a pesar de su elevación alta y temperaturas bajas. La diferencia de temperatura entre el epilimnion y el hipolimnion es muy pequeña (3° C) y el modelo de mezcla es monomítico cálido (Vincent *et al.* 1985, Richerson *et al.* 1986). El modelo de variación temporal del fitoplancton registrado por Richerson *et al.* (1986) para el lago Titicaca es semejante al modelo clásico presentado por Lewis (1978). Las diatomeas dominan durante el período de mayor profundidad de mezcla, seguidas por las clorofíceas, cianofíceas y finalmente los dinoflagelados. Un modelo similar fue observado por Talling (1966) *in* Richerson *et al.* 1986) en el lago Victoria (este de Africa) y en el lago Valencia, Venezuela (Lewis 1986). Otro modelo de sucesión es el del lago Kinneret, Israel, monomítico subtropical, que se caracterizó por la presencia de los grupos pirrofito-clorofita complementado en algunos años por cianofíceas. En este lago se observó una marcada periodicidad en la composición del fitoplancton con alta abundancia en invierno-primavera y baja abundancia durante los meses del verano, estando relacionada con la marcada estabilidad de la estratificación en verano. El florecimiento algal en el lago Kinneret ocurrió en invierno-primavera (Serruya y Berman 1975; Pollinher 1986).

Los estudios mencionados anteriormente presentan solo algunos puntos de coincidencia con el comportamiento observado en el lago Alchichica.

Por lo que se refiere a los estudios realizados en el lago Alchichica, en el período 1993-1994 Lugo *et al.* (1999), observaron el desarrollo de un florecimiento de diatomeas durante los primeros meses del año en el período de circulación. En el presente estudio se observó la presencia de clorofíceas y diatomeas en la fase final de circulación (marzo), seguidas por el florecimiento de cianofíceas con heterocitos en el período de transición circulación-estratificación (abril, mayo y junio). Cuando el lago se encontraba ya estratificado (septiembre) estuvieron presentes clorofíceas, diatomeas y cianofíceas sin

heterocitos.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el modelo de sucesión temporal para el lago crater Alchichica, clorofíceas-diatomeas-cianofíceas con heterocitos y clorofíceas- diatomeas-cianofíceas sin heterocitos, sería diferente de los modelos de sucesión observados en otros lagos templados y tropicales.

6.2 Variables físicas y químicas

6.2.1 Luz

El lago cráter Alchichica se caracterizó por tener alta transparencia la mayor parte del período de estudio (marzo 6.5 m, mayo 4.7 m, junio 5 m y septiembre 6.7 m). Durante el muestreo del mes de abril la transparencia disminuyó notablemente (2.45 y 3.92 m) coincidiendo con las máximas densidades del florecimiento de *N. spumigena*.

En general, la profundidad de la zona eufótica (1% de la irradiancia en superficie) para el lago Alchichica osciló entre 20 y 30 m, no obstante, en el muestreo del 22 de abril la profundidad de la zona eufótica fue de 11 m, y en los muestreos del 29 de abril y del 6 de mayo de 15 m, en este período se observó el desarrollo masivo de *N. spumigena* en superficie (Fig. 14).

Otros estudios en los que se han observado condiciones similares a las del lago cráter Alchichica, serían los de Galat *et al.* (1981) que registran para el lago Pirámide, Nevada, una zona eufótica promedio de 11 m en 1976 y 1977. La penetración mínima de la luz (5.5 m), se observó como resultado de la formación del florecimiento de *N. spumigena* en agosto de 1977. La máxima profundidad de la zona eufótica (15.5 m) coincidió con la condición isotermal del lago, en enero de 1977. El desarrollo de *Nodularia* cerca de la superficie en el lago Pirámide se distingue del de otros géneros que fijan nitrógeno como *Anabaena*, *Oscillatoria* o *Gloeotrichia*. Las condiciones de luz cerca de la superficie generalmente dañan

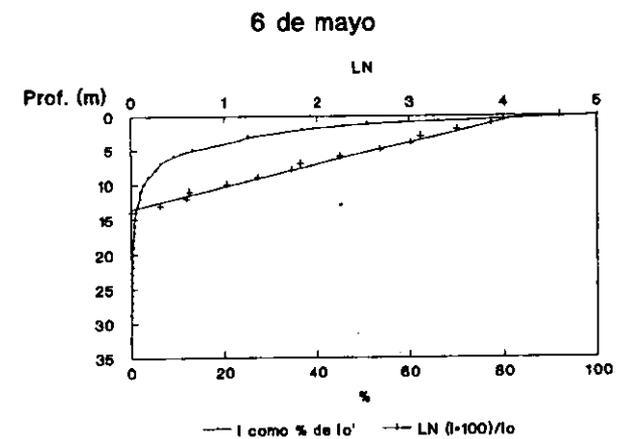
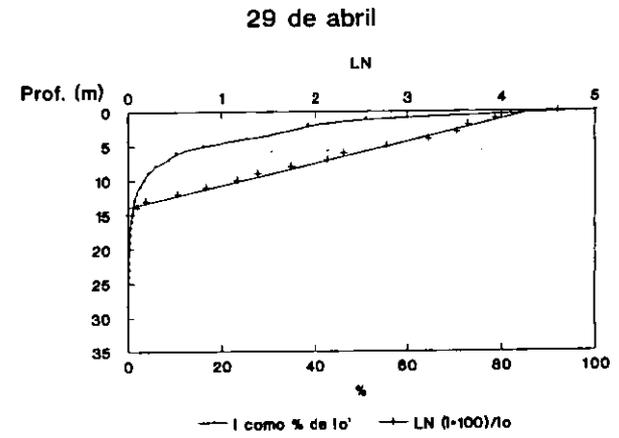
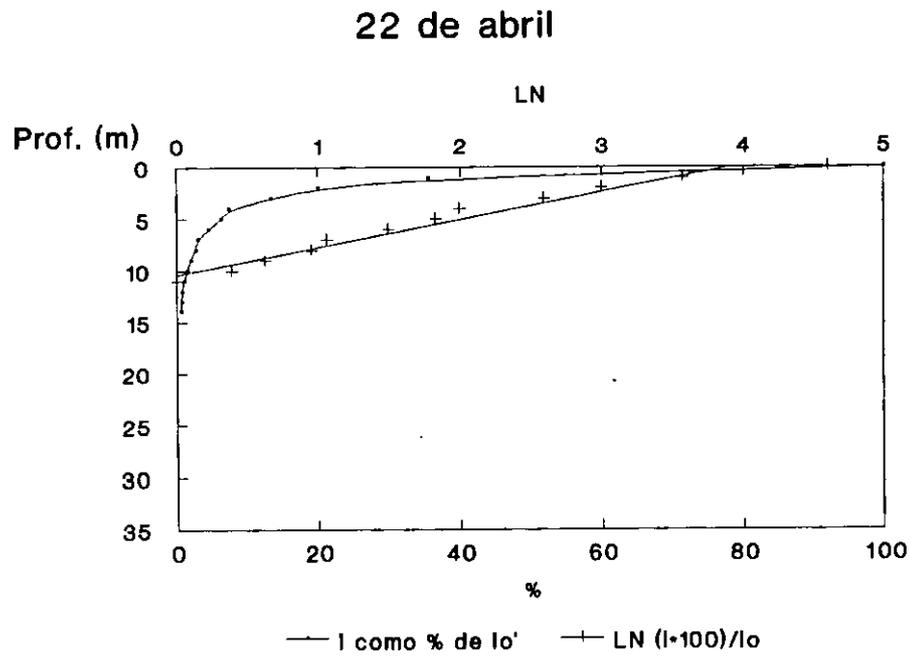


Figura 14. Perfiles de penetración de la luz durante el florecimiento de *N. spumigena*. 1995

a las algas plantónicas, a menos que cuenten con algún tipo de protección. El mecanismo de protección para *Nodularia* no se conoce del todo, pero la presencia de la enzima superóxido dismutasa puede ser la clave para la supervivencia de estas algas, bajo condiciones de elevado potencial de foto-oxidación en la superficie de los lagos (Oberley 1982 *in* Horne y Galat 1985).

En el lago Alexandrina, sur de Australia, se registraron valores promedio de disco de Secchi de 0.19 m y profundidad de la zona eufótica de 0.80 m y aunque estos datos difieren con los del lago Alchichica, su coincidencia sería el periodo en el que se desarrolló el florecimiento de *N. spumigena* ya que se observó al final de la primavera y principio de verano en 1965, 1966, 1973 y 1977 (Geddes 1984).

Durante el florecimiento de cianofíceas que se observó en la laguna Grande de San Pedro Concepción, Chile en el período abril-agosto de 1977, se registraron valores de disco de Secchi entre 1.4 y 2.8 m y zona eufótica de 10 m de profundidad (Parra *et al.* 1980), características que fueron similares a las observadas en el lago Alchichica.

6.2.2 Temperatura

Los modelos de circulación y estratificación térmica del agua en los lagos influyen de manera importante en numerosos procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en ellos, aunque no siempre son tan regulares, ya que existen variaciones meteorológicas y características-particulares de la morfometría lacustre o el movimiento de las masas de agua en relación con las diferencias locales o regionales como la altitud. La estratificación térmica en los lagos es un regulador predominante de casi todos los ciclos físicos y químicos y por lo tanto del metabolismo del lago y su productividad (Wetzel 1981).

La variación de la temperatura en el lago cráter Alchichica tuvo un comportamiento temporal (Fig. 15). En el mes de marzo, al final de la época de frío y sequía, el intervalo de

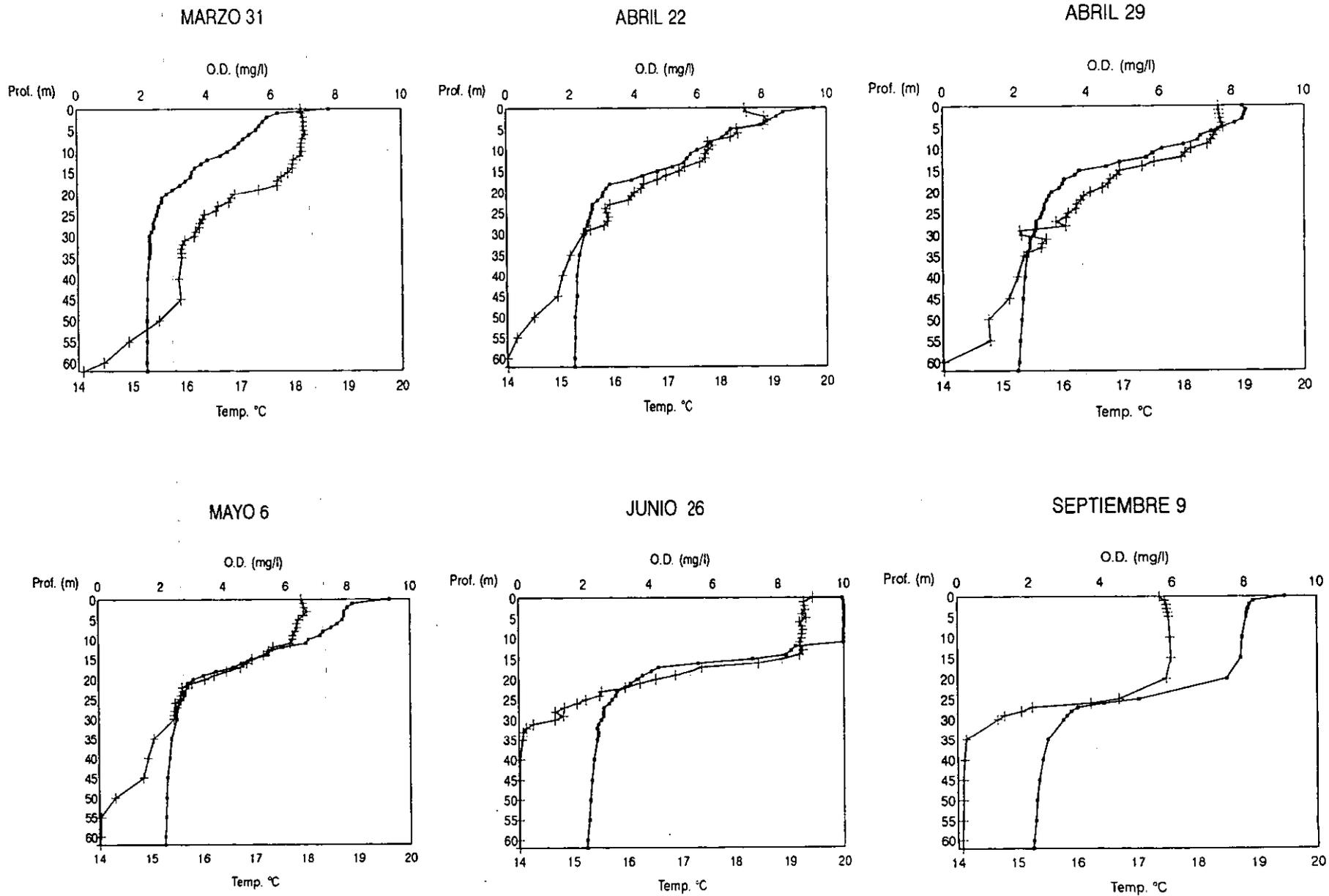


Figura 15. Perfiles de temperatura y oxígeno. 1995 (Línea con puntos: Temperatura; Línea con cruces: Oxígeno)

temperatura a lo largo de la columna de agua varió entre 15.2 (fondo) y 18.7°C (superficie). La temperatura de la zona superficial se incrementó durante abril y mayo (19.0 - 19.8°C) y el aumento continuó hasta alcanzar el valor máximo en el mes de junio (20°C), en la época cálida y lluviosa. En septiembre, al final de esta misma época, la temperatura máxima presentó un ligero descenso (19.5°C). En contraste, la temperatura de la parte más profunda varió muy poco, manteniéndose alrededor de los 15°C durante todo el período de estudio.

La temperatura del agua presentó una variación máxima de 5°C en toda la columna de agua, diferencia que fue suficiente para causar una estratificación térmica durante una parte del lapso estudiado. Cuando las aguas superficiales se calientan, haciéndose menos densas, la resistencia termal relativa a la mezcla aumenta de forma muy notable. Para evitar una circulación completa de toda la columna de agua es suficiente una diferencia de unos pocos grados, en especial en lagos tropicales (Wetzel 1981). En marzo, el lago cráter Alchichica se encuentra al final del período de circulación que ocurre durante la época fría del año.

La diferencia de temperatura entre la superficie y fondo es todavía pequeña (3.5 °C) y la estratificación térmica no está bien marcada. Durante abril y mayo la diferencia de temperatura entre la parte superficial y la del fondo se incrementó (4.2 °C) sin embargo puede considerarse que la estratificación es aún poco evidente. Para finales de junio ya se puede observar una estratificación mucho más marcada, de tal manera que el período de transición circulación-estratificación se presentó entre abril y junio. En septiembre el lago se encontraba ya claramente estratificado (Figura 15). En general, comportamientos similares al del lago cráter Alchichica se presentan en el lago Kinneret, Israel ($z_m = 41$ m), que es un lago subtropical, monomítico cálido y se caracteriza porque su período de circulación ocurre en la época fría entre diciembre y febrero y la estratificación térmica se extiende desde abril-mayo hasta noviembre (Serruya y Berman 1975, Pollingher 1986). En el lago Pirámide con

profundidad máxima de 103 m, se observa un prolongado período de estratificación térmica durante los meses del verano (mayo-septiembre), seguido por un periodo de mezcla en invierno-primavera (noviembre-marzo), y que lo caracteriza como un lago monomítico cálido (Galat *et al.* 1981).

Durante la época de estratificación de Alchichica el epilimnion abarcó desde la superficie hasta aproximadamente 25 m de profundidad. El metalimnion, considerado como la capa donde se presentaron las mayores diferencias de temperatura por metro de profundidad (es decir la termoclina), se encontró a partir de los 25 m y hasta los 30 m de profundidad. Por tanto el grosor del hipolimnion varió desde los 25-30 m hasta el fondo y su temperatura siempre estuvo muy cercana a los 15 °C.

El patrón de circulación del lago cráter Alchichica fue reconocido recientemente. Díaz y Guerra (1979) y Arredondo *et al.* (1984) consideran incorrectamente que Alchichica es un lago polimítico que se estratifica y circula varias veces al año. Sin embargo, Garzón (1990) menciona que el lago Alchichica presenta un período de mezcla en la época más fría, esto aunado al hecho de que su temperatura siempre fue mayor de 4°C lo sitúa como un lago monomítico cálido, este punto de vista es confirmado por Lugo *et al.* (1999). Los datos obtenidos en el presente trabajo, aunque no abarcan un ciclo anual, también coinciden con la presencia de un período de estratificación estable y permanente a partir de la mitad de la época cálida y lluviosa y un período de circulación durante la época seca y fría del año. Estas características son discutidas por Lewis (1983) en su estudio sobre el lago Valencia, Venezuela, en el que indica que la duración de la estratificación térmica en este lago y probablemente en muchos otros lagos tropicales monomíticos cálidos es considerablemente más larga que en los típicos lagos templados. Los resultados obtenidos por este autor en el lago Valencia soportan el concepto de que muchos lagos de los trópicos previamente

considerados como oligomícticos, realmente serían monomícticos cálidos con un periodo de estratificación anual y uno de circulación.

Los organismos del fitoplancton exhiben una relación importante entre la temperatura y su actividad metabólica, al elevar su tasa de crecimiento cuando aumenta la temperatura, hasta algún valor óptimo, después del cual disminuye, con frecuencia drásticamente, hasta cero. En general los óptimos de temperatura para muchos de los organismos del fitoplancton están dentro del límite de 18° a 25 °C, aunque las formas de aguas frías tienen generalmente óptimos menores (Darley 1987).

Con respecto a la relación de la temperatura y formación de florecimientos algales, Hammer (1964) *in* Reynolds y Walsby (1975) observó para los lagos de Saskatchewan, Canadá, que el tiempo de aparición y secuencia de la formación de florecimientos estuvo estrechamente relacionado con la temperatura. Fogg *et al.* (1973) señalan que la temperatura del agua óptima para las especies que forman florecimientos se encuentra entre los 25°- 35 °C aunque en especies, como *Anabaena flosaquae* la tasa de crecimiento aumenta entre 10° y 15 °C, en *Aphanizomenon flosaquae* a 20°C o en *Microcystis aeruginosa* que tiene un amplio rango de tolerancia térmica entre 0° y 26°C. En general los florecimientos se presentan entre 14° y 26°C (Reynolds y Walsby 1975).

En el lago cráter Alchichica el florecimiento de *N. spumigena* se observó en el mes de abril y mayo con temperaturas de 19° y 19.8°C en superficie; coincidiendo con el inicio de la estratificación térmica. Comparando los datos del lago Alchichica con los encontrados por otros autores, Geddes (1984) registra para el lago Alexandrina, sur de Australia, un florecimiento de *N. spumigena* a finales de primavera y principios del verano con temperatura del agua de 24°C. Lukatelich y McComb (1986) registran para el sistema estuarino de Peel-Harvey, Australia, temperaturas del agua de 26°y 27°C en superficie durante el verano y

presencia de un florecimiento de *N. spumigena*. En el lago Piramide el florecimiento de *N. spumigena* se presentó en verano y otoño con temperatura de 24°C y cuando el lago está térmicamente estratificado (Horne y Galat 1985; Galat *et al.* 1990). Estos autores consideran que la estratificación térmica no parece ser un prerequisite para la formación de florecimientos, en contraste, Reynolds (1973) *in* Reynolds y Walbsy (1975) relacionan la formación de florecimientos con temperatura alta y el inicio de las condiciones de estratificación térmica. Paerl (1996) menciona que generalmente los florecimientos están asociados con valores de temperatura que oscilan alrededor de 20°C, acompañados con estratificación térmica. Estas últimas características coinciden con lo observado en el lago cráter Alchichica.

6.2.3 Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno en los ambientes acuáticos, influye de manera importante en la solubilidad de muchos nutrientes inorgánicos. Los cambios de disponibilidad de nutrientes están regulados por las variaciones temporales que se llevan a cabo en las regiones lacustres fluctuando de un ambiente aerobio o anaerobio, lo que provoca crecimientos rápidos de organismos capaces de aprovecharse de ellos (Wetzel 1981).

En las aguas estratificadas, el movimiento vertical de los solutos y de los gases a través de la termoclina es muy lento. Como resultado, los nutrientes orgánicos e inorgánicos liberados por la descomposición bajo la termoclina no retornan a la zona eufótica para mantener la producción primaria mientras perdura la estratificación. Al mismo tiempo, la descomposición de la materia orgánica en las zonas profundas puede dar lugar a una disminución de oxígeno disuelto (OD) llegando incluso a la anoxia y a la acumulación de productos de fermentación y de H₂S (Cole 1994).

En general, se considera que la presencia de un hipolimnion anóxico durante el verano

es característico de los lagos eutróficos templados, relativamente poco profundos y ricos en nutrientes. También se considera que en los lagos oligotróficos la producción es limitada por la baja disponibilidad de los nutrientes y no se produce un hipolimnion anóxico (Wetzel 1981).

La reincorporación de los nutrientes a la zona eufótica tiene lugar cuando el paulatino enfriamiento de la capa superficial durante la época fría del año causa la desaparición de la estratificación y con frecuencia se revela por el florecimiento de las algas, principalmente cuando los nutrientes se encuentran disponibles (Wetzel 1981, Darley 1987).

El lago cráter Alchichica es especialmente interesante debido a que a pesar de que muchas de sus características (elevada profundidad, alta transparencia, bajos números de algas) corresponden con las de un ambiente oligotrófico durante la mayor parte del tiempo, en el lapso de una corta temporada del año sus características cambian drásticamente: la transparencia disminuye notablemente (6.7 m a 2.45 m) y se incrementan considerablemente los números de células fitoplanctónicas (10 a 159 592 cél ml⁻¹). Al parecer, esta época tiene un efecto posterior en la generación de un hipolimnion anóxico durante la estratificación anual.

En el lago cráter Alchichica durante el período estudiado el OD varió desde ausente hasta 9 mg l⁻¹ (Fig. 15). Los valores más elevados se midieron en la parte superficial del lago, correspondiente a la zona fótica, mientras que en la parte profunda el OD estuvo ausente durante 5 de los 6 muestreos. En marzo, el OD estuvo presente en toda la columna de agua, aunque en la parte más profunda (> 60 m) las concentraciones fueron inferiores a 1 mg l⁻¹. El valor máximo en este mes (7 mg l⁻¹) se midió a los 6 m de profundidad, debido a que el fitoplancton generalmente no se encuentra en la zona más cercana a la superficie para evitar

la excesiva radiación solar. Durante los muestreos de abril, la concentración de OD se incrementó debido al florecimiento de *N. spumigena*, los valores máximos medidos fueron 8.2 mg l⁻¹ (3 m, abril 22) y 7.8 mg l⁻¹ (5 m, abril 29). Durante el muestreo del 6 de mayo el florecimiento de *N. spumigena* había prácticamente concluido y esto se reflejó con una disminución del máximo observado (6.6 mg l⁻¹ a 3m).

El mes con mayor cantidad de OD fue abril, sobre todo el primer muestreo, con 8 mg l⁻¹, entre los 0.5 y los 10 m, que es la zona donde se desarrolla el florecimiento algal y donde la actividad fotosintética es mayor. Este muestreo correspondió al inicio de dicho florecimiento.

Las condiciones anóxicas (OD < 1 mg l⁻¹) (Nürnberg 1995) van aumentando a través del tiempo debido a la oxidación que se da por parte de las bacterias para descomponer la materia orgánica sedimentada. En marzo dichas condiciones se presentaron a partir de los 60 m, en abril 22 a partir de los 55 m, en abril 29 y en mayo a partir de los 50 m y en junio y septiembre, cuando el lago se encuentra fuértemente estratificado térmicamente, aproximadamente a partir de los 30 m (fig. 15).

Las condiciones de anoxia parecen ser causadas por la gran cantidad de materia orgánica generada durante el florecimiento de *N. spumigena*. Las células muertas de estas algas se convierten en materia orgánica demandante de oxígeno para su descomposición e inician su sedimentación hacia la parte profunda del lago. Lukatelich y McComb (1986) en su estudio de los sistemas estuarinos Peel-Harvey del suroeste de Australia encuentran características similares a las del lago Alchichica, ya que registran valores pico de OD en superficie coincidentes con sus máximos valores de biomasa de *N. Spumigena*. Las concentraciones mínimas de OD en superficie fueron registradas al final del verano después del colapso del florecimiento de *Nodularia*, cuando la biomasa fitoplanctónica fue la más baja.

La tasa de agotamiento de oxígeno es regida por los aportes de materia orgánica al hipolimnion, resultado de la degradación bacteriana de las algas procedentes del epilimnion (Wetzel 1981, Smayda 1990).

La dificultad de difusión del OD a través del metalimnion durante la época de estratificación es otro factor que determina la ausencia de oxígeno en la parte más profunda del lago durante una parte del año. Hannan *et al.* (1979) registran condiciones anóxicas hipolimnéticas para el reservorio Canyon, Texas, con características oligo-mesotróficas, durante los meses de junio, agosto y septiembre. Estos autores mencionan que los modelos de disminución de oxígeno en el hipolimnion son de normal ocurrencia en muchos reservorios (embalses) profundos, en relación con la estratificación térmica, volumen hipolimnético y demanda de oxígeno. Reynolds y Walbsy (1975) indican que la iniciación de un aumento en las poblaciones de cianofíceas está relacionado con el inicio de la estratificación térmica y con la declinación del contenido de oxígeno en el hipolimnion condición que se presentó en el lago Alchichica durante el proceso de formación del florecimiento durante el período de estudio.

Los lagos atalasoalinos presentan una capacidad disminuida para la disolución de gases conforme se incrementa la salinidad, es decir, la saturación ocurre a más bajas concentraciones a una temperatura dada. Esta concentración también varía con relación a la fotosíntesis de las algas, la descomposición orgánica, la temperatura del agua y la acción del viento (Alcocer 1995). Entre los gases, el oxígeno es esencial para el metabolismo de todos los organismos acuáticos que presentan una respiración aerobia.

De acuerdo con Wetzel (1981) valores ligeramente por debajo o por encima de la saturación pueden considerarse como normales en cuerpos de agua oligotróficos. Los valores del porcentaje de saturación de oxígeno presentaron un comportamiento fuertemente

relacionado con la concentración de OD. La saturación de oxígeno en Alchichica siempre fue menor al 100%. Los valores observados oscilaron entre 0 y 93%. Los valores más altos se determinaron en el muestreo de abril 22, durante el máximo florecimiento de *N. spumigena*, entre los 3 y 4 m de profundidad, en el resto de los muestreos el porcentaje de saturación en el lago Alchichica, disminuyó a valores generalmente inferiores al 80% en la zona superficial y de 0 a 20% en la capa profunda. Díaz y Guerra (1979) determinaron que el % de saturación de oxígeno en el lago Alchichica varió entre 33 y 83%, lo cual aparentemente significa que no encontraron condiciones anóxicas en el lago. Sin embargo, Arredondo *et al.* (1984) si menciona la presencia de condiciones anóxicas en la parte profunda del lago. Comparando estos valores con los presentados por otros autores que registran florecimientos de *N. spumigena* se observa que las condiciones de saturación de oxígeno son similares: Geddes (1984) encontró en el lago Alexandrina valores de saturación de oxígeno en superficie entre 93-100%, llegando a registrar valores de sobresaturación (117%), probablemente como resultado de gran actividad fotosintética. Así mismo, en el fondo registra valores bajos de saturación de oxígeno y en la zona de los sedimentos las condiciones fueron anóxicas. En el caso del lago Banter See, Wilhelmshaven de las costas del mar del Norte Alemán, la saturación de oxígeno fue de ~100% al inicio de septiembre y después por procesos de sedimentación y remineralización del florecimiento de *N. spumigena* (septiembre) se registraron 60% en superficie y 40% de saturación de oxígeno en el fondo (Nehring 1993), lo cual parece señalar el papel de la descomposición de *Nodularia* en la disminución del contenido de oxígeno en la parte profunda del lago.

6.2.4 Potencial redox

El potencial redox (E_h) es una variable relacionada con los efectos de un desequilibrio por el acúmulo de materia orgánica en los sistemas acuáticos. El E_h teórico en el agua varía

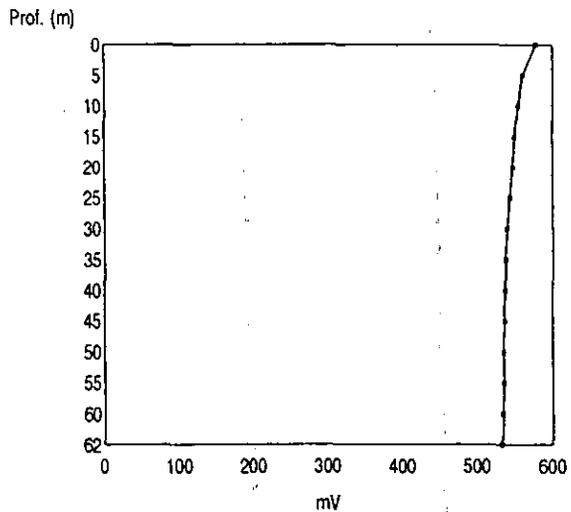
entre +800 y -400 mV. Esta variable está relacionada con el pH y con la concentración de oxígeno disuelto (Jorgensen 1989).

Los valores de E_h referidos al electrodo de hidrógeno medidos en el lago cráter Alchichica variaron entre 589 y 139 mV. Esto se relacionó con condiciones cercanas a la saturación de oxígeno en la superficie del lago durante el florecimiento de *Nodularia spumigena* y condiciones de anoxia en la parte profunda del lago, especialmente en junio y septiembre, meses de estratificación térmica (Fig. 16). La literatura indica que cuando se alcanzan valores de +100 se inicia la desnitrificación (Campbell 1987, Jorgensen 1989, Smayda 1990). A pesar de que el valor mínimo en la capa de agua ubicada sobre el fondo fue de +139 mV se pudo apreciar en las muestras de profundidad la presencia de sulfuro de hidrógeno, cuando teóricamente se requieren valores de E_h de -100 mV para que ocurra la reducción de los sulfatos a sulfuro de hidrógeno. La explicación más sencilla consiste en pensar que en el interior del sedimento el E_h es menor y se alcanzan los valores requeridos para la producción bacteriana de H_2S , el cual se difunde hacia el agua (Jorgensen 1989), esta característica coincide con lo encontrado en el lago cráter Sonachi Nairobi, Kenia, en el cual se detectó la producción de H_2S en estrato más profundo del lago (Njuguna 1988).

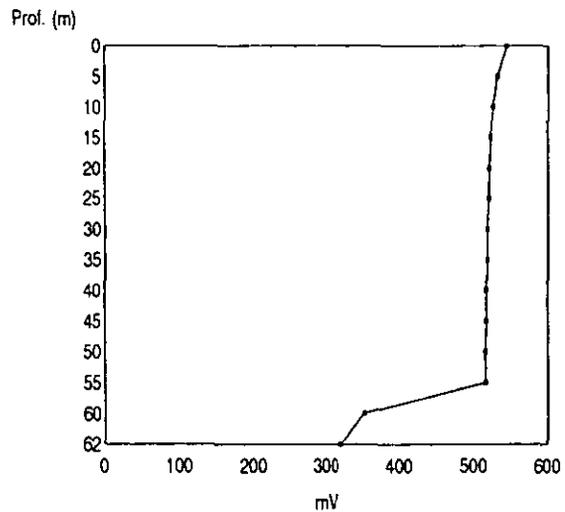
El intercambio de fósforo entre los sedimentos y el agua inmediatamente superior a ellos es un factor importante en el ciclo del fósforo de las aguas naturales, su importancia radica en el movimiento del fósforo hacia los sedimentos en condiciones aeróbicas. Los cambios a través de la interfase del sedimento están regulados por mecanismos relacionados con procesos de intercambio de iones y están fuertemente influidos por los valores del potencial redox, dependientes de la cantidad de oxígeno y de las actividades de los microorganismos (Wetzel 1981; Smayda 1990).

Al disminuir el oxígeno del hipolimnion y del agua próxima a la interfase de los

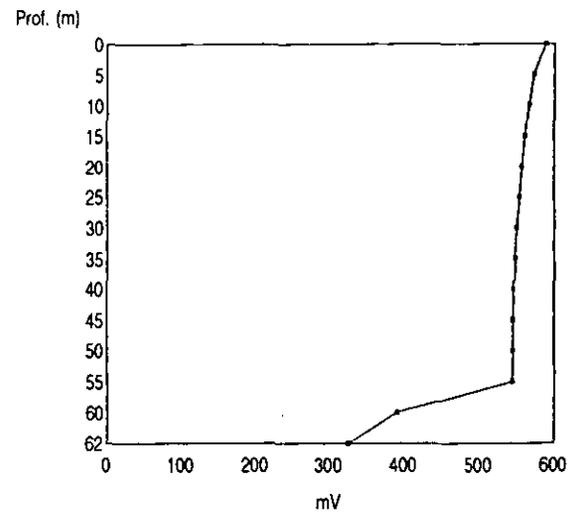
MARZO 31



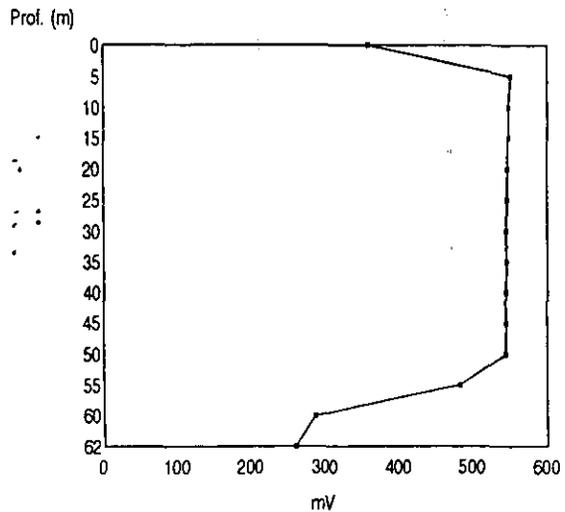
ABRIL 22



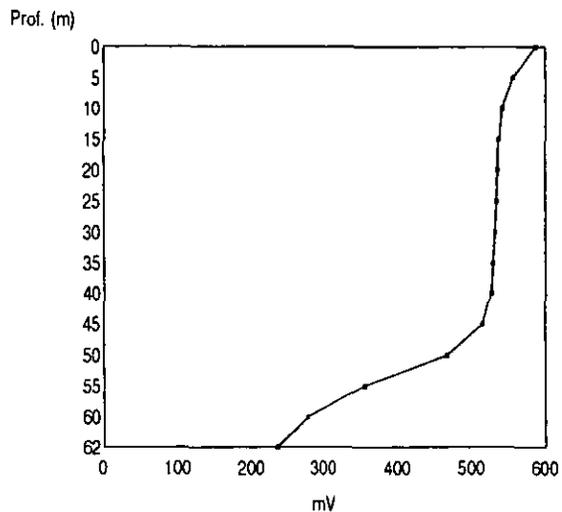
ABRIL 29



MAYO 6



JUNIO 26



SEPTIEMBRE 9

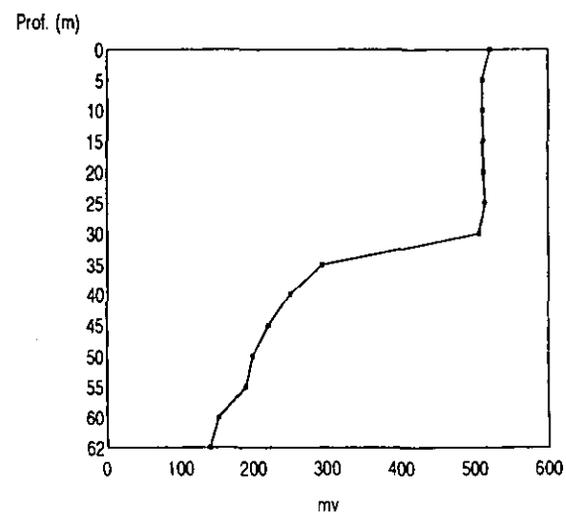


Figura 16. Perfiles de potencial rédox. 1995

sedimentos, la liberación de fósforo y hierro se acentúa notablemente al bajar el potencial redox. Cuando se da el valor de 200 mv se produce una liberación repentina de ion ferroso y de fosfato. Esto es precedido por la reducción del nitrato y una lenta liberación de bases, de CO_2 y amonio. Al reducirse, el hierro ferroso y el fosfato adsorbido se movilizan y aparecen en el agua (Wetzel 1981, Nürnberg 1987, Smayda 1990).

6.2.5 pH

Brock (1973) en sus estudios realizados en ambientes naturales y artificiales observó que los valores de pH menores de 6 impiden el crecimiento de las cianofíceas, éstas se desarrollaron mejor en un intervalo de pH 7.5-9.0. Shapiro (1990) encontró que las cianofíceas llegan a ser dominantes sobre las clorofíceas cuando los valores de pH son altos. Reynolds y Walsby (1975), mencionan que en los lagos con alta reserva alcalina debida a la concentración de iones bicarbonato, con valores de pH entre 8.0 y 8.6, se favorece el crecimiento de las cianofíceas, mientras que en sistemas con baja reserva alcalina, las fluctuaciones de pH podrían ser críticas para el desarrollo de las poblaciones que forman florecimientos.

Las cianofíceas son capaces de utilizar los iones bicarbonato, además de utilizar el CO_2 libre como una fuente de carbono inorgánico para la fotosíntesis. Las cianofíceas planctónicas de esta manera poseen una ventaja competitiva sobre otras algas planctónicas en aguas naturales de elevado pH y elevada alcalinidad. Los iones bicarbonato son convertidos a CO_2 por la acción de la enzima anhidrasa carbónica y su actividad puede aumentar rápidamente cuando la concentración del CO_2 del medio disminuye. Esta ventaja competitiva se debe a que la anhidrasa carbónica de las cianofíceas, se localiza en la membrana celular, mientras que en las algas eucarióticas se encuentra localizada en el interior de las células, sobre la membrana del cloroplasto (Olofsson 1980 *in* Pizzolon 1996).

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

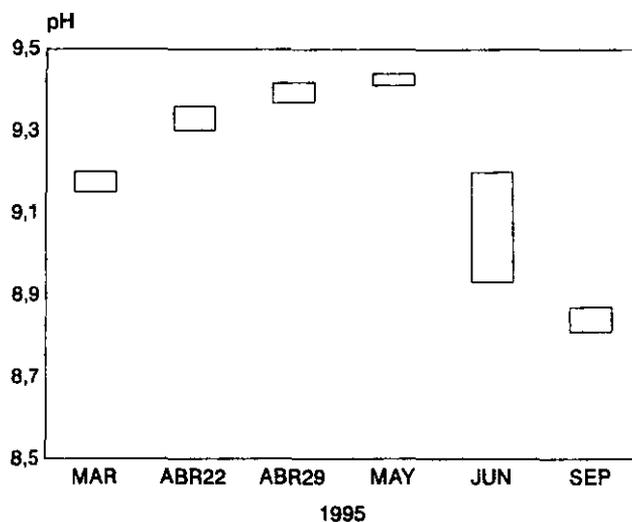


Figura 17. Intervalos de variación del pH en toda la columna de agua por muestreo

Durante el período de estudio, el intervalo de variación de pH en el lago crater Alchichica fue de 8.8 a 9.4 en toda la columna de agua, indicando en todo momento la presencia de condiciones básicas. En el mes de marzo, antes del florecimiento de *N. spumigena*, el pH osciló entre 9.1 y 9.2. En los muestreos de abril y mayo, realizados durante el florecimiento algal, los valores se incrementaron ligeramente y variaron entre 9.3 y 9.4. En los meses de junio y septiembre, cuando el florecimiento había desaparecido, el intervalo de pH descendió a valores entre 8.8 y 8.9 (Fig. 17).

La variación puede explicarse de la siguiente manera: durante marzo los valores fueron elevados debido a la presencia de la fase final del florecimiento de invierno (diatomeas). En abril y mayo se observaron los valores más altos del estudio causados por la intensa actividad fotosintética del florecimiento de *N. spumigena*. A pesar del fuerte consumo de bióxido de carbono durante el florecimiento el aumento de pH es pequeño debido a la

elevada alcalinidad del agua del lago (Arredondo *et al.* 1984, Vilaclara *et al.* 1993). Darley (1987) menciona que las cianofíceas propias de los florecimientos prefieren las aguas moderadamente alcalinas.

Comparando con otros autores en relación con el pH y la formación de florecimientos de *N. spumigena* y lo observado en el lago Alchichica, se tiene que Lukatelich y McComb (1986) registran valores de pH en superficie de 7.3-9.4 para el estuario de Peel y de 7.3-10.0 para el estuario de Harvey, Australia (1977-1983). Geddes (1984), en el lago Alexandrina, Sur de Australia, registra fluctuaciones de pH entre 7.5 y 9.2. Para el lago Banter See de las costas del Mar del Norte Alemán Nehring (1993) indica que durante el florecimiento de *N. spumigena* se observó un aumento significativo en los valores de pH, de 8.0 a 9.1. En el lago soda tropical Sonachi al noroeste de Nairobi, Africa, se registraron valores de pH entre 9.5 y 9.7 donde las especies dominantes fitoplanctónicas fueron principalmente cianofíceas (Njuguna 1988).

El intervalo de pH medido en el presente estudio para el lago Alchichica fue un poco más variable que el presentado en los trabajos de Garzón (1990) y de Vilaclara *et al.* (1993) quienes registran valores de pH en la columna de agua de 8.8 a 9. Valores muy parecidos midieron Díaz y Guerra (1979) quienes encontraron un intervalo de 9.0 a 9.2. Otros trabajos informan de intervalos más amplios como el de Arredondo *et al.* (1984) quienes midieron pH entre 8.5 y 9.9; el de Ramírez-García y Novelo (1984), en el cual el intervalo fue de 8.7 a 9.1 o el de C.F.E (1960) que encontró valores desde 8.1 hasta 10. El intervalo de pH en el presente estudio corresponde con la parte media del intervalo medido por los autores mencionados (8.8 a 9.4).

6.2.6 Conductividad específica (K_{25})

La K_{25} en el lago Alchichica durante los muestreos varió entre 13 350 y 14 180 μ S

cm^{-1} en toda la columna de agua, valores que indican que el lago es hiposalino en relación al agua dulce. El mes con las K_{25} más elevadas fue septiembre, donde se alcanzaron valores ligeramente superiores a los $14\ 000\ \mu\text{S cm}^{-1}$ desde los 25 m hasta el fondo. Los valores más bajos de K_{25} se presentaron en el muestreo del 29 de abril en el que se observa el florecimiento de *N. spumigena* cuando el intervalo de variación fue de $13\ 350$ a $13\ 860\ \mu\text{S cm}^{-1}$. En los otros cuatro muestreos la variación de la conductividad fue muy parecida y osciló entre $13\ 400$ y $13\ 900\ \mu\text{S cm}^{-1}$ (Fig. 18). Las fluctuaciones en la K_{25} a lo largo del período de estudio pueden considerarse moderadas debido a la estabilidad en la concentración de sales del lago Alchichica. Arredondo *et al.* (1984) mencionan que la K_{25} en el lago Alchichica alcanza valores de hasta $10\ 000\ \mu\text{mhos cm}^{-1}$ (esto es $10\ 000\ \mu\text{S cm}^{-1}$) valor que es inferior a los medidos en este estudio. Por otra parte, la C.F.E. (1960) presenta datos de conductividad específica para muestras de Alchichica (aunque no menciona a que temperatura están expresados) que varían entre $11\ 820$ y $13\ 700\ \mu\text{mhos cm}^{-1}$.

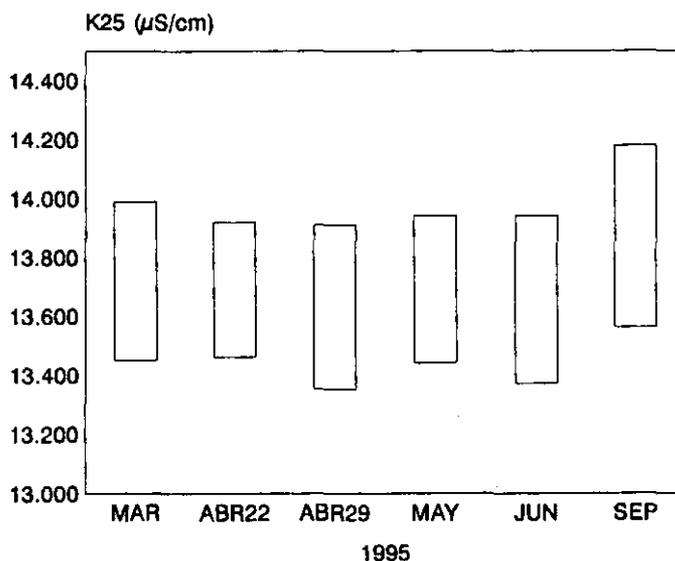


Figura 18. Intervalos de variación de la conductividad específica en toda la columna de agua por muestreo

Vilaclara *et al.* (1993) midieron una K_{25} , promedio de $13\ 000\ \mu\text{S cm}^{-1}$, que concuerda bastante bien con los valores medidos en este estudio. El lago Piramide, Nevada, presentó valores muy similares a los del lago Alchichica con intervalo entre $8\ 200$ y $8\ 650\ \mu\text{S cm}^{-1}$ (Galat *et al.* 1981). El lago Sonachi al Noroeste de Nairobi, Africa, es un lago cráter tropical que presenta valores de conductividad similares a los registrados en el lago Alchichica, desde $5\ 700$ - $7\ 290\ \mu\text{S cm}^{-1}$ en el mixolimnion y desde $8\ 270$ - $14\ 940\ \mu\text{S cm}^{-1}$, en el monimolimnion (Njuguna 1988).

La salinidad del agua del lago Alchichica fue calculada a partir de los valores de conductividad mediante la aplicación de un factor obtenido de los datos de conductividad promedio y sólidos disueltos totales promedio que presentan Vilaclara *et al.* (1993) según lo propuesto en A.P.H.A. *et al.* (1985). De acuerdo con esta aproximación los valores de salinidad del agua del lago Alchichica variaron entre 8.7 y $9.3\ \text{g l}^{-1}$. En otros estudios realizados en este lago, se han registrado valores de salinidad diferentes, como los de Díaz y Guerra (1979) que presentan valores de salinidad entre 5.5 y $10\ \text{‰}$. Arredondo *et al.* (1984), registran valores de $7.1\ \text{‰}$. mientras que Ramírez-García y Vázquez-Gutiérrez (1989) dan valores de $14.03\ \text{g Kg}^{-1}$ y Vilaclara *et al.* (1993) encontraron valores de $8.5 \pm 0.2\ \text{g l}^{-1}$. Williams (1964,1981) considera que son lagos salinos todos aquellos cuya salinidad es mayor a $3\ \text{g l}^{-1}$. Hammer *et al.* (1990) clasifican a los lagos salinos de acuerdo con su concentración de sales, según estos autores, los lagos hiposalinos son aquellos cuya concentración salina es $>$ que 3 y $<$ que $20\ \text{g l}^{-1}$, intervalo dentro del cual se encuentran los valores de salinidad determinados para el lago Alchichica.

La salinidad es considerada como uno de los factores ecológicos más significativos que afectan el crecimiento y formación de florecimientos de *N. spumigena* (Nordin y Stein 1980). Estudios hechos en los estuarios de Peel-Harvey sugieren que los florecimientos de *N.*

spumigena se desarrollan cuando las estructuras de resistencia (acinetos) en los sedimentos germinan en aguas de baja salinidad (menores de 20 g Kg^{-1}), (Huber 1984) y que los florecimientos se mantienen a una salinidad máxima de 30 g Kg^{-1} , arriba de la cual se da lugar al colapso (Lukatelich y McComb 1986). En la laguna de Orielton, Tasmania el florecimiento de *N. spumigena* se presentó con salinidad de $14\text{-}24 \text{ g Kg}^{-1}$, (Jones *et al.* 1994 *in* Blackburn *et al.* 1996), mientras que en el lago Alexandrina se registraron condiciones cercanas al agua dulce (Geddes 1984). En el lago Piramide, Nevada, Galat *et al.* (1981) encontraron una salinidad menor a la del lago Alchichica, cercana a 5.3 g l^{-1} . Blackburn *et al.* (1996) en su trabajo relacionado con el efecto de la salinidad sobre el crecimiento y formación de florecimientos de *N. spumigena* estudian tres poblaciones australianas diferentes, en condiciones controladas de laboratorio, con salinidad desde agua dulce (0 g Kg^{-1}) hasta agua de mar (35 g Kg^{-1}), observaron que había una disminución significativa de crecimiento a 0 g Kg^{-1} más que con las otras concentraciones de salinidad. La producción celular fue pobre tanto en baja como en alta salinidad, con una mejor producción celular entre 12 y 24 g Kg^{-1} . Estos autores sugieren, que las poblaciones de *Nodularia* de las costas de Australia son tolerantes a la salinidad, y ocurren principalmente en aguas entre 5 y 30 g Kg^{-1} . Los florecimientos de *Nodularia* observados en el Mar Báltico se presentaron en aguas con salinidad de $5\text{-}13 \text{ g Kg}^{-1}$ (Sivonen *et al.* 1989 *in* Blackburn *et al.* 1996) y rara vez ocurren fuera de este intervalo, señalan que probablemente las poblaciones de *N. spumigena* del Mar Báltico sean menos halotolerantes que las poblaciones de Australia.

La ocurrencia de florecimientos de *N. spumigena* en el lago Alexandrina, Sur de Australia, con salinidad cercana a la del agua dulce es poco común, sin embargo, considerando los cambios desde aguas esencialmente estuarinas a cercanas al agua dulce desarrollados en más de 50 años en esa localidad (Geddes 1984) y los resultados obtenidos en

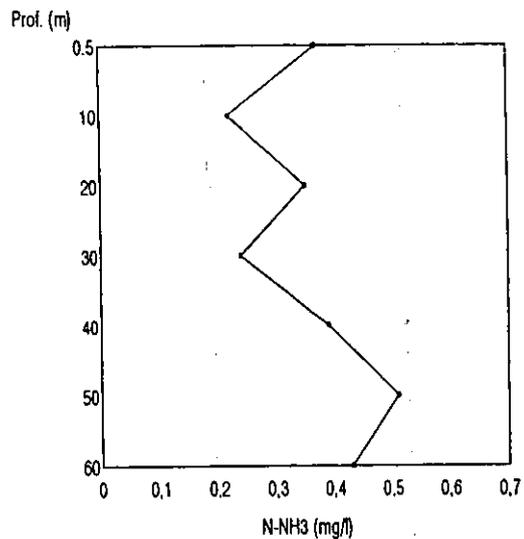
los cultivos de *N. spumigena* aislados del lago Alexandrina, la especie es halotolerante (Blackburn *et al.* 1996). Los intervalos de salinidad registrados en el lago Alchichica (8.7 y 9.3 g l⁻¹), coinciden con los valores presentados en otras localidades, como influentes en el desarrollo de florecimientos. Los datos mencionados indican que las poblaciones de *N. spumigena* pueden tener la habilidad de desarrollarse en amplios intervalos de salinidad, teniendo diferentes respuestas de crecimiento, prefiriendo ya sea condiciones de salinidad moderada o salinidad elevada, además de la interacción de otros factores físicos y químicos.

6.2.7 Nitrógeno como amoníaco (N-NH₃)

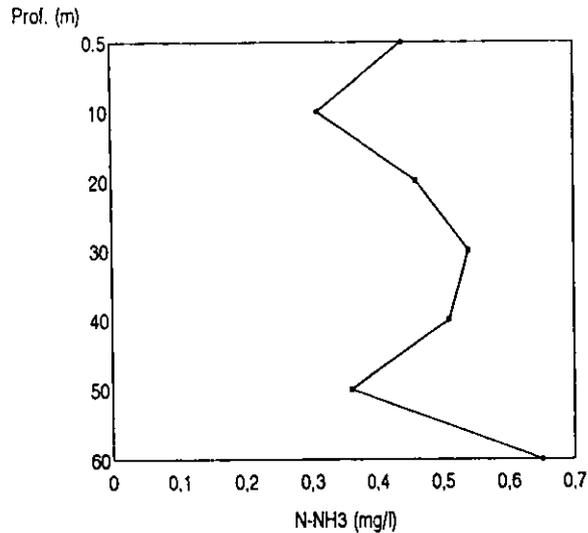
Las concentraciones de N-NH₃ en el lago Alchichica variaron entre 0.01 mg l⁻¹ (medidos en abril 29 a una profundidad de 0.5 m), hasta 0.67 mg l⁻¹ (en septiembre a los 60 m). Según Wetzel (1981), las concentraciones de N-NH₄⁺ en las aguas naturales no contaminadas varían entre 0 y 5 mg l⁻¹ (entre 0 y 3.9 mg l⁻¹ como N-NH₃), encontrándose los valores del lago Alchichica dentro de este intervalo, con tendencia a ser bajos.

La variación temporal y vertical de las concentraciones de N-NH₃ en el lago Alchichica fue la siguiente. En el mes de marzo se encontraron valores elevados que oscilaron entre 0.22 (10 m) y 0.51 mg l⁻¹ (50 m). En el muestreo del 22 de abril, cuando el florecimiento de *N. spumigena* estaba en su nivel máximo, se midieron las concentraciones globales más elevadas de nitrógeno amoniacal en la columna de agua (0.31-0.65 mg l⁻¹), probablemente asociadas con la descomposición bacteriana de los exudados de materia orgánica de *N. spumigena* (Fig. 19). Para el muestreo del 29 de abril el florecimiento ya está en su fase terminal y las concentraciones de nitrógeno amoniacal muestran un inicio de estratificación con bajas concentraciones en la zona superficial (< 0.15 mg l⁻¹) y concentraciones más elevadas a partir de los 40 m (0.2-0.48 mg l⁻¹). Estos valores más elevados en la capa profunda se deben a la descomposición de las algas muertas.

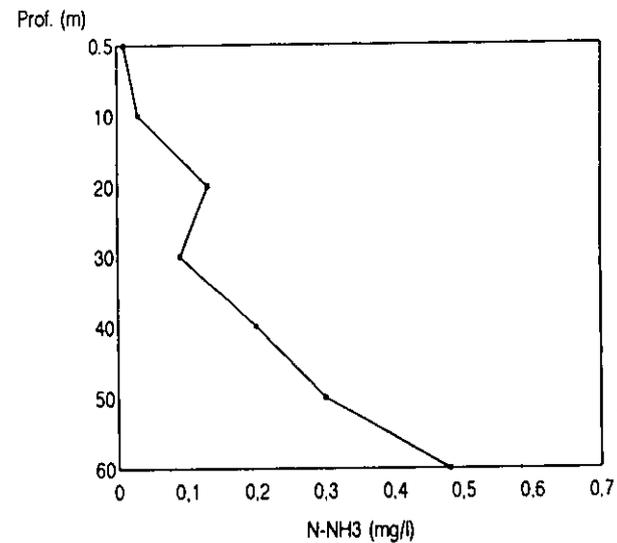
MARZO 31



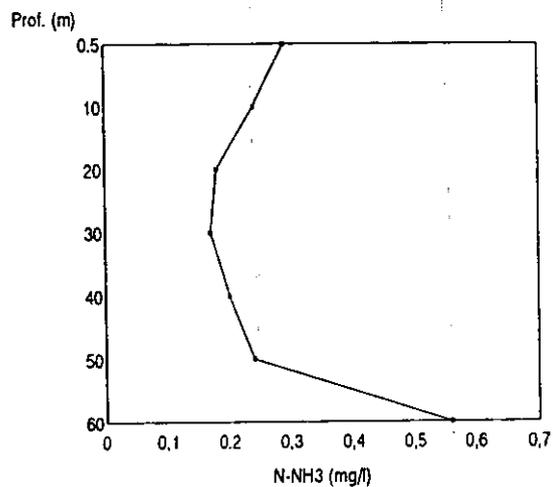
ABRIL 22



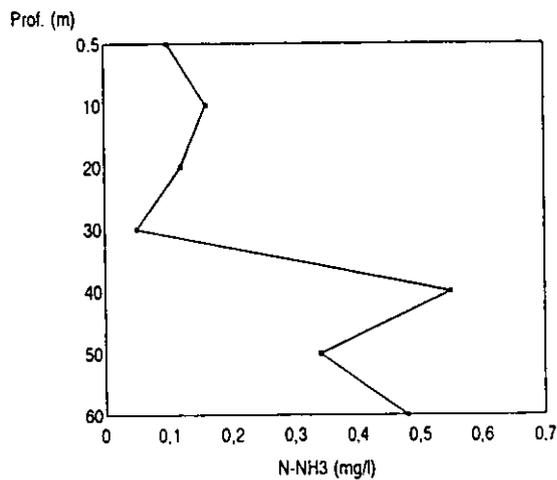
ABRIL 29



MAYO 6



JUNIO



SEPTIEMBRE 9

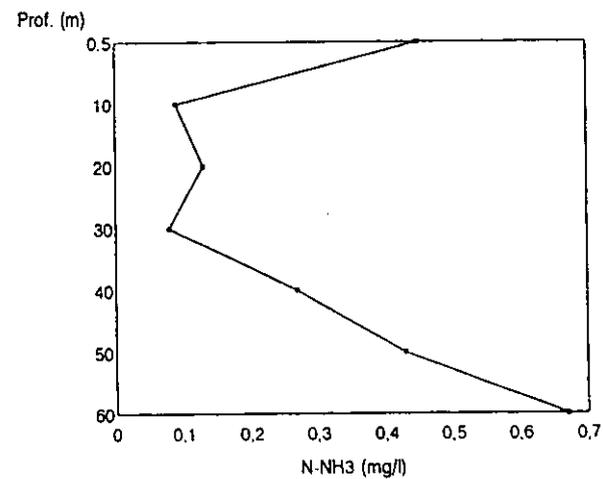


Figura 19. Perfiles de concentración de N-NH₃. 1995

Una semana después (Mayo) el florecimiento prácticamente ha finalizado y quizá como un reflejo de la descomposición de *N. spumigena*, las concentraciones de nitrógeno amoniacal se incrementan en toda la columna de agua (0.17-0.56 mg l⁻¹). Las concentraciones en la capa profunda siguen siendo mayores que en la capa superficial. En el mes de junio, con una estratificación térmica y de oxígeno disuelto mucho más marcada y ya sin la influencia del florecimiento de *N. spumigena*, la estratificación del nitrógeno amoniacal es más evidente. Los valores (< 0.16 mg l⁻¹) en los primeros 30 metros son considerablemente menores que los de la capa anóxica profunda (0.48-0.55 mg l⁻¹). Esta misma situación se mantuvo en el mes de septiembre cuando, con excepción de la zona superficial que presentó un valor elevado (0.45 mg l⁻¹), el resto de las profundidades hasta los 30 m tuvieron concentraciones bajas (0.07-0.13 mg l⁻¹). En cambio, la concentración en la capa profunda se incrementó (0.27-0.67 mg l⁻¹). Al comparar los valores encontrados en el lago Alchichica con otros lagos, se tiene que en el lago salino Onondaga, Nueva York, E.U.A. que es dimíctico, las concentraciones de N-NH₄ en el epilimnion estuvieron entre 1.90 mg l⁻¹ y 2.14 mg l⁻¹, encontrándose niveles bajos de amonio en julio, agosto y principios de septiembre del período 1968-69 (Sze y Kingsbury 1972); en el lago Kinneret, Israel que se caracteriza por ser monomíctico calido, se registraron valores muy bajos de N-NH₄ entre 0.02-0.03 mg l⁻¹ en superficie antes del período de mezcla (Serruya y Berman 1975). En el lago Pirámide, Nevada, también monomíctico cálido se observaron niveles menores de 0.01 mg l⁻¹ durante la holomixis hasta 0.07 mg l⁻¹ concentración registrada en la zona profunda desoxigenada durante la parte final de la estratificación (Galat *et al.* 1981). En general en estos ejemplos se observa la tendencia de encontrar valores más bajos en el epilimnion.

Según el esquema que presenta Wetzel (1981) en relación a las concentraciones del nitrógeno amoniacal en los lagos, Alchichica se comportó de manera más parecida a un lago

eutrófico que a uno oligotrófico. La estratificación del nitrógeno amoniacal es típica de lagos eutróficos con hipolimnion anóxico. En el caso del lago Alchichica, la materia orgánica producida durante el florecimiento de *Nodularia* genera las condiciones anóxicas en el fondo que favorecen la liberación de nitrógeno amoniacal por la acción de las bacterias anaerobias. Lukatelich y McComb (1986), Huber (1986) encuentran condiciones similares a las del lago Alchichica para el estuario Harvey en Australia, con valores de amonio más bajos en superficie y un incremento importante de amonio al final del verano de 1978, liberado desde los sedimentos, después del colapso y descomposición del florecimiento de *N. spumigena* en 1978, también, mencionan que en el invierno de 1979 se presenta otro incremento de amonio, el cual alcanzó un nivel más alto que el de 1978, atribuido a su liberación desde los sedimentos bajo condiciones anóxicas.

6.2.8 Nitrógeno como nitritos (N-NO₂)

En el lago Alchichica los valores de N-NO₂ fueron generalmente bajos, variando entre no detectables y 0.007 mg l⁻¹ (Fig. 20) Esto concuerda con el intervalo observado para la mayoría de los cuerpos acuáticos en donde las concentraciones son bajas y oscilan entre 0 y 0.1 mg l⁻¹ (Wetzel 1981).

Durante el mes de marzo los valores en casi toda la columna de agua fueron de 0.003 mg l⁻¹, no detectándose nitritos a los 30 m de profundidad. En abril 22, durante el florecimiento de *N. spumigena*, los nitritos mantuvieron su concentración baja pero se observó un ligero pico (0.004 mg l⁻¹) a los 50 m. En abril 29 el pico a los 50 m se incrementó a 0.006 mg l⁻¹ y así se mantiene en el muestreo de mayo. En junio la concentración de N-NO₂ en toda la columna de agua disminuyó ligeramente y el pico de los 50 m desapareció. Finalmente, en septiembre, ya con una estratificación muy marcada, se midió la mayor concentración de nitritos (0.007 mg l⁻¹) a una profundidad de 40 m. Margalef (1983) señala

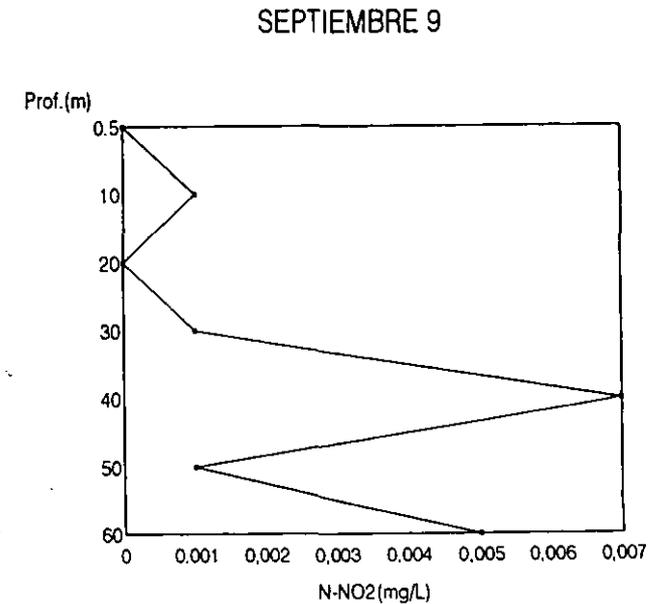
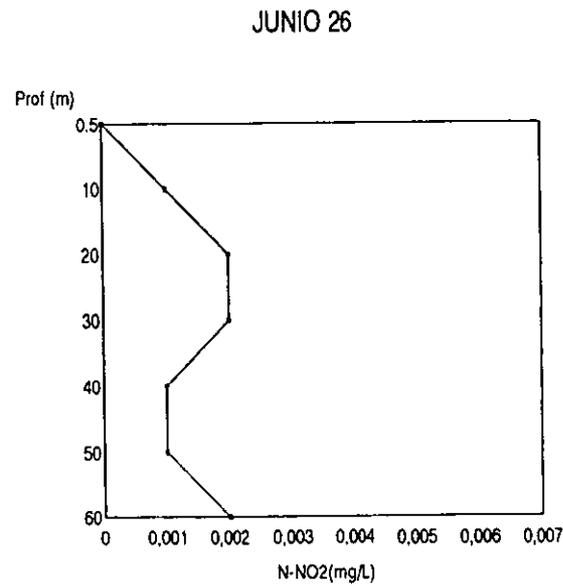
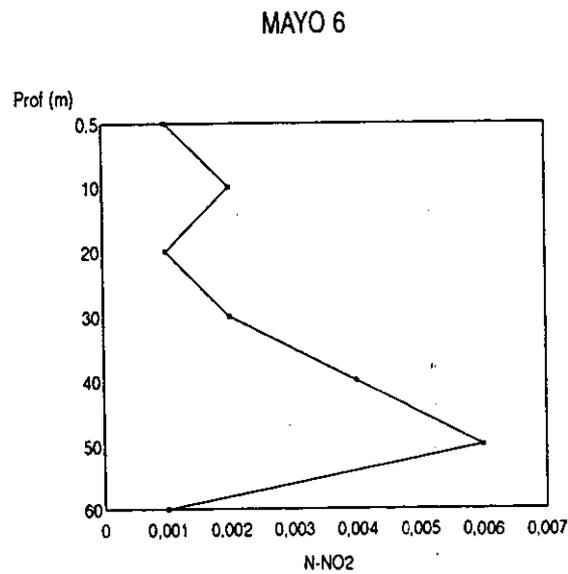
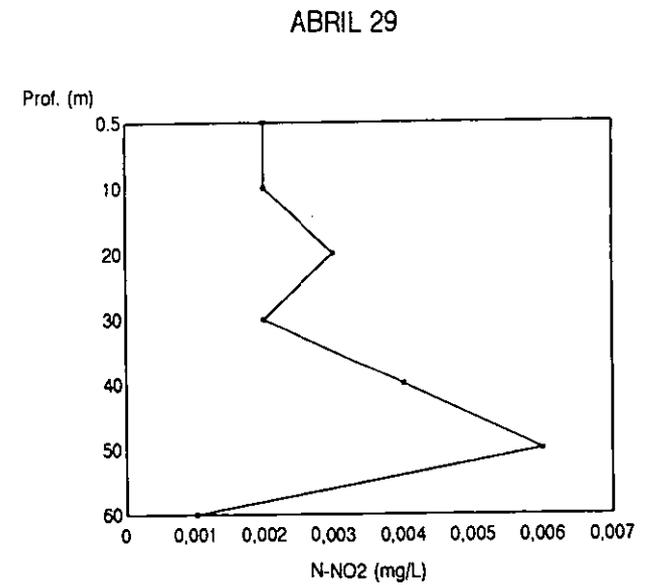
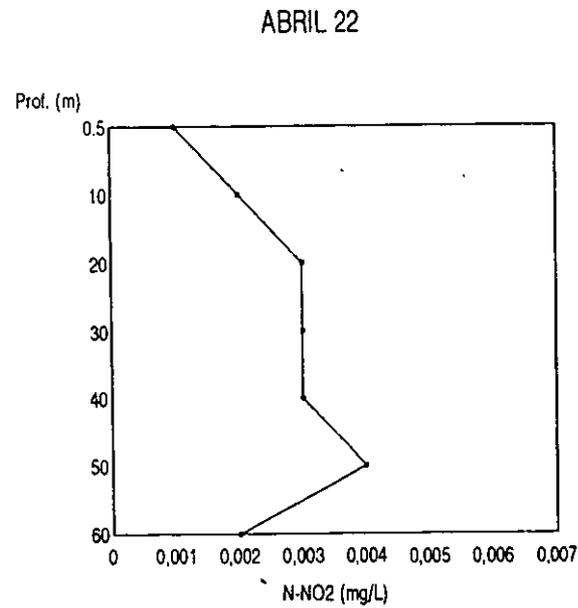
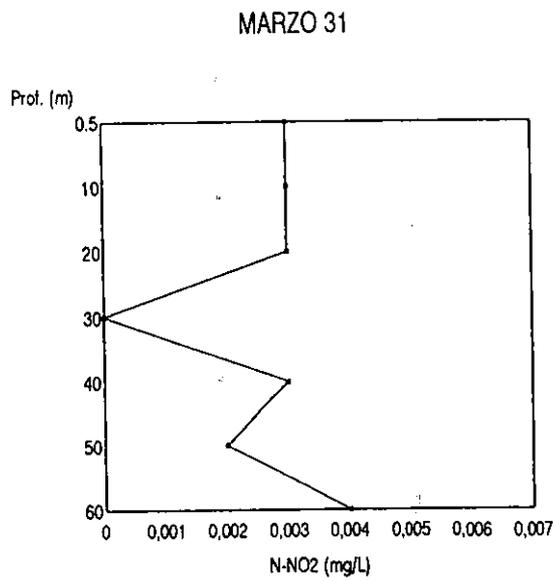


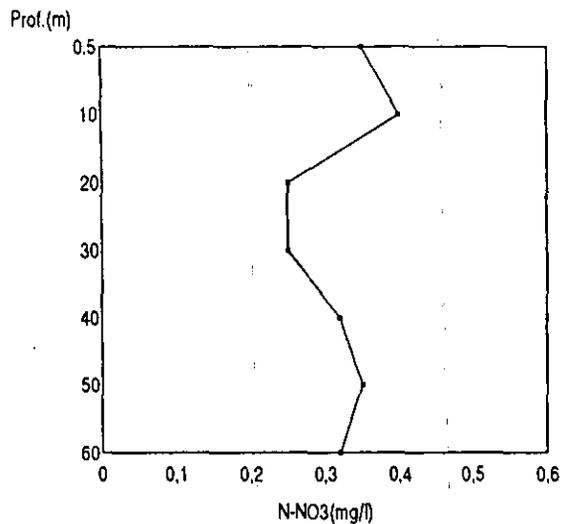
Figura 20. Perfiles de concentración de N-NO₂. 1995

que en el mar es común encontrar un pico de nitritos a los 100 m de profundidad. En la mayor parte de las áreas marinas estratificadas se presenta un notable máximo de nitrito por debajo de la zona fótica, debido a que cuando el fitoplancton vivo se sedimenta y pasa de capas iluminadas con baja concentración de compuestos de nitrógeno a capas sin luz y ricas en nitratos, las células absorben nitrato e inician su reducción con la energía disponible, que no puede pasar de la forma de nitrito, que ya no se asimila sino que se excreta al medio. El mismo efecto, repetido por una lluvia continua de células da origen a una capa de pequeño espesor, y aún de fracción de metros, con concentraciones relativamente elevadas de nitrito. Este mecanismo se ha podido reproducir en el laboratorio (Andersen 1977 *in* Margalef 1983) y opera también en lagos, donde con frecuencia se manifiestan máximos profundos de nitrito, coincidentes con la sedimentación de densas poblaciones de fitoplancton (Fjordingstad y Berg 1973 *in* Margalef 1983). Condiciones similares se observaron en Alchichica como resultado del florecimiento de *N. spumigena*, el pico de N-NO₂ generalmente se encontró a la profundidad de 50 m, en donde el potencial redox se encontraba cercano a los +400 mV señalados por Wetzel (1981) como el valor límite para que pueda ocurrir la transformación bacteriana del amonio en nitritos y nitratos.

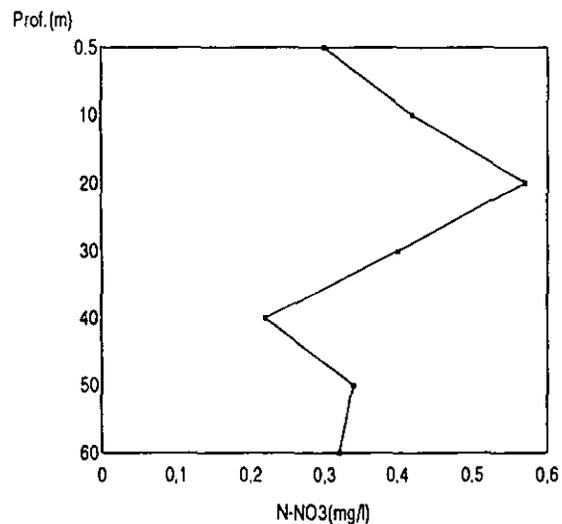
6.2.9 Nitrogéno como nitratos (N-NO₃).

La concentración de N-NO₃ en el lago Alchichica fluctuó entre 0.05 y 0.57 mg l⁻¹ (Fig. 21). La concentración promedio más elevada en columna de agua se cuantificó durante los muestreos de abril en el epilimnion (0.43 mg l⁻¹) en donde el florecimiento de *N. spumigena* fue más notorio. En el muestreo de mayo también se midieron valores altos de nitratos (0.55 mg l⁻¹) pero en este caso en el hipolimnion atribuido a los procesos de descomposición de *Nodularia*. En los muestreos de junio y septiembre, las concentraciones

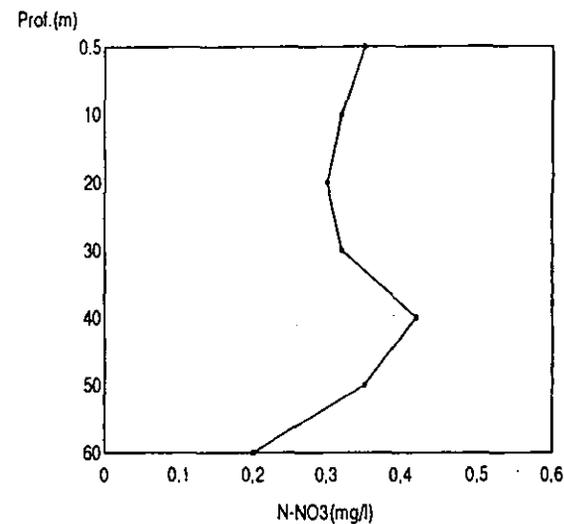
MARZO 31



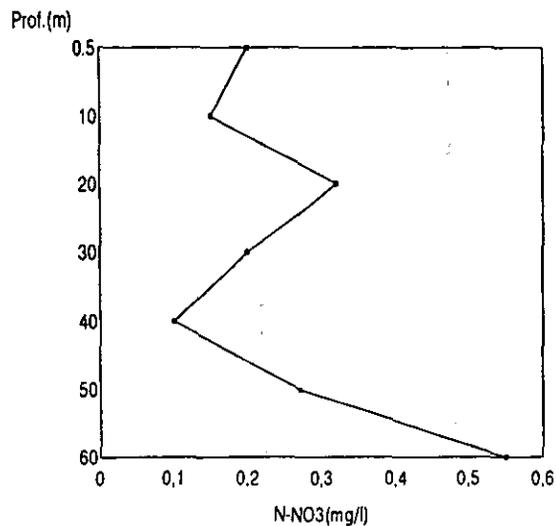
ABRIL 22



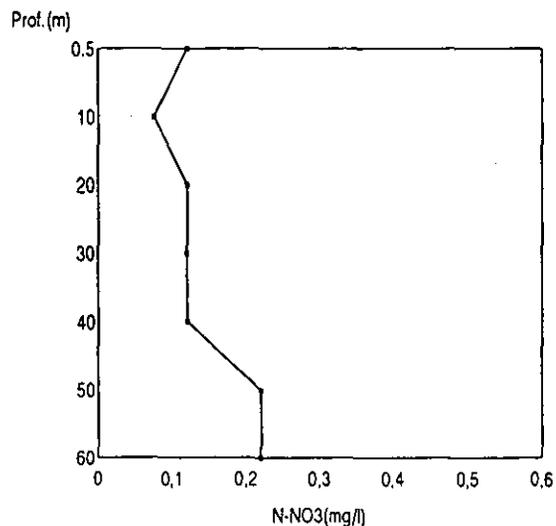
ABRIL 29



MAYO 6



JUNIO 26



SEPTIEMBRE 9

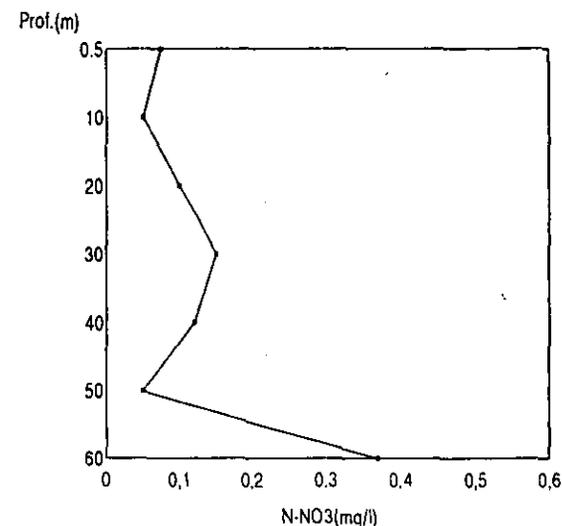


Figura 21. Perfiles de concentración de N-NO₃. 1995

fueron menores en toda la columna de agua entre 0.05 y 0.37 mg l⁻¹. En otros cuerpos de agua en los que se han registrado florecimientos de *N. spumigena* se presentan condiciones similares a las que se observaron en Alchichica. Lukatelich y McComb (1986), indican que para el estuario de Harvey en Australia, los valores de nitratos medidos en agosto de 1978, fueron de 2.1 mg l⁻¹ en el epilimnion y de 0.6 mg l⁻¹ en el hipolimnion, en contraste, a finales del verano, después del colapso del florecimiento de *N. spumigena* los niveles en el fondo de nitratos fueron más altos que en la superficie, atribuido a la oxidación del amonio, liberado por la descomposición de *Nodularia*, señalan también, que en los otros meses del año no hubo diferencias significativas entre la superficie y el fondo. En el lago salino Onondaga, Nueva York, los nitratos solamente aparecieron en cantidades suficientes para propiciar el crecimiento algal desde enero a julio y para finales de julio y hasta noviembre se midieron niveles muy bajos. Las cianofíceas en el lago Onondaga fueron comunes a finales de agosto y principios de septiembre, cuando los nitratos estuvieron en mínima concentración (Sze y Kingsbury 1972). En el lago Pirámide, Nevada los valores de NO₃-N en el epilimnion fueron de 0.03 mg l⁻¹ con un valor promedio de 0.30 mg l⁻¹, los valores más altos fueron de 0.06 mg l⁻¹ coincidiendo con el período de mezcla. En este lago el florecimiento de *N. spumigena* se forma a finales de verano y en otoño cuando aumenta la temperatura del agua (21.4 - 23.1° C) y el nitrógeno inorgánico disminuye en superficie (Galat 1981, Horne y Galat 1985). En un estudio experimental que realizó Toetz (1981) en dos lagos de Oklahoma encontró datos que muestran el efecto inhibitorio del amonio sobre la asimilación de nitratos cuando este se encuentra a concentraciones superiores de 0.21 mg l⁻¹. Skovgaard y Østergaard (1990) encontraron que en los lagos Arreskov y Kvind en Dinamarca, los florecimientos de cianofíceas se presentan en períodos caracterizados por bajas concentraciones de nitrógeno inorgánico.

Al parecer las concentraciones más elevadas de N-NO₃ (0.57 mg l⁻¹ a 20 m de profundidad) en el lago Alchichica están relacionadas con el florecimiento de *N. spumigena*, acumulación de materia orgánica y nitrificación intensa. Cuando el florecimiento desaparece, gradualmente disminuye la concentración de nitrógeno en forma de nitratos.

Wetzel (1981) señala que las concentraciones de N-NO₃ en las aguas dulces no contaminadas pueden variar entre 0 y 10 mg l⁻¹, por lo que las concentraciones medidas en este estudio pueden considerarse bajas. Sin embargo, Garzón (1990) midió concentraciones aún menores pues el valor promedio de N-NO₃ que midió en Alchichica fue de 0.038 ± 0.045 mg l⁻¹

En fuerte contraste con estos resultados, Díaz y Guerra (1979) midieron concentraciones de entre 0.55 y 3.3 mg l⁻¹ como N-NO₃.

6.2.10 Ortofosfatos disueltos (PO₄⁻³)

En la mayoría de las aguas dulces el fósforo es el elemento menos abundante de los principales nutrientes necesarios para el crecimiento del fitoplancton. La forma de fósforo más importante para la nutrición del fitoplancton es el PO₄ inorgánico ionizado. La mayor cantidad de fósforo liberado al agua durante el crecimiento activo de las algas es fosfato inorgánico soluble que es reciclado rápidamente. Durante el proceso de descomposición, la mayor parte del fósforo algal se encuentra en forma orgánica y es biodegradado por las bacterias (Schindler 1977, Kraus 1964 *in* Wetzel 1981, Smayda 1990).

Los ortofosfatos son la forma del fósforo más fácilmente asimilable por las algas (Margalef 1983), por lo que su medida es un indicador importante de la capacidad de producción que puede tener un cuerpo de agua.

Las concentraciones de PO₄⁻³ disueltos medidos en el presente estudio variaron desde no detectables (< 0.01 mg l⁻¹) hasta 1.36 mg l⁻¹. Estos valores son muy variables y se

encuentran dentro del ámbito señalado por Wetzel (1981) para las aguas naturales no contaminadas que varían entre amplios límites desde menos de $1 \mu\text{g l}^{-1}$ hasta $> 200 \text{ mg l}^{-1}$ en lagos salinos cerrados, variando con la cantidad de sales y el tipo de agua. Garzón (1990) encontró un valor promedio para la columna de agua de Alchichica de 0.261 mg l^{-1} de PO_4 (0.087 mg l^{-1} como P- PO_4). Díaz y Guerra (1979) encontraron concentraciones de fósforo en Alchichica de entre 0.03 y 0.84 mg l^{-1} como PO_4 .

La concentración de ortofosfatos (PO_4^{3-}) en el lago Alchichica mostró una clara variación temporal y vertical (Fig. 22). En el muestreo de marzo los valores a lo largo de toda la columna de agua fueron muy bajos (0.03 - 0.12 mg l^{-1}), pero para el muestreo del 22 de abril los valores se incrementaron hasta alcanzar los máximos (0.05 - 1.36 mg l^{-1}) durante el pico del crecimiento de *N. spumigena*. Durante este muestreo los valores más altos (0.42 - 1.36 mg l^{-1}) se asociaron con la zona fótica, hasta los 30 m de profundidad. Una semana más tarde, cuando el florecimiento empieza a declinar, los PO_4 disueltos disminuyen su concentración (0.03 - 0.725 mg l^{-1}) y las concentraciones más altas se observan en el nivel superficial y en el nivel más profundo siendo menores las concentraciones en el resto de la columna. En mayo cuando el florecimiento prácticamente había desaparecido, nuevamente se incrementó la concentración de ortofosfatos (0.22 - 0.94 mg l^{-1}) en prácticamente toda la columna de agua con excepción de la superficie (0.6 mg l^{-1}) y el nivel de 40 m (0.4 mg l^{-1}). En el mes de junio, ya con el lago estratificado térmicamente la concentración de ortofosfatos disminuyó considerablemente (0.01 - 0.3 mg l^{-1}) y también mostró una estratificación vertical. Las concentraciones menores (0.01 - 0.09 mg l^{-1}) se midieron en el epilimnion y a partir de los 30 m de profundidad las concentraciones se incrementaron notablemente (0.12 - 0.3 mg l^{-1}). Este mismo esquema, pero acentuado, se encontró en el mes de septiembre en donde las concentraciones en el epilimnion fueron notablemente menores (no detectables- 0.01 mg l^{-1})

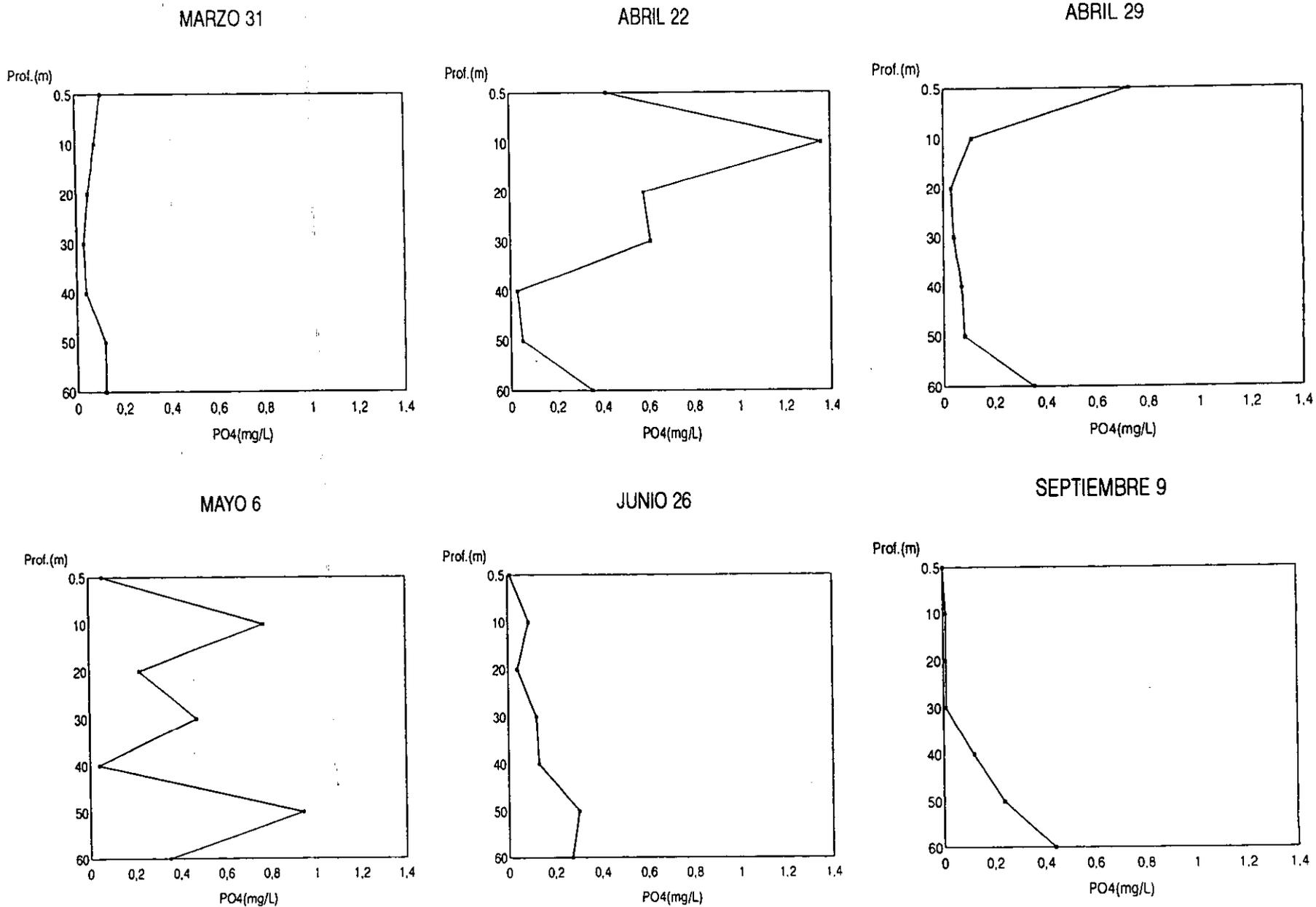


Figura 22. Perfiles de concentración de PO₄ disueltos. 1995

que en el muestreo anterior y las concentraciones en el hipolimnion, ahora considerado a partir de los 40 m, se incrementaron (0.12-0.44 mg l⁻¹).

Comparando los valores de ortofosfatos del lago Alchichica con otros lagos, se tiene que la concentración de fosfatos en el epilimnion del lago Onondaga, Nueva York estuvieron entre 2.8 mg l⁻¹ y 2.9 mg l⁻¹ (Sze y Kingsbury 1972). En laguna Grande de San Pedro, Chile se registraron fluctuaciones de fosfatos desde no detectables, hasta 0.07 mg l⁻¹ (Parra *et al.* 1980). En sistemas experimentales tales como los utilizados en el lago Monroe en Indiana, E.U.A. los resultados indicaron que el fósforo es el nutrimento limitante para la fotosíntesis algal, registrando valores entre 0.003 mg l⁻¹ a 0.012 mg l⁻¹ en junio de 1975 y de < 0.003 mg l⁻¹ a 0.021 mg l⁻¹ en mayo de 1977 (Chang 1982). Horne *et al.* (1979), registra para el lago Clear, California, valores desde no detectables hasta 0.012 mg l⁻¹, presentándose los valores más altos durante el florecimiento de *Aphanizomenon flos-aquae* cianoficea fijadora de nitrógeno. El promedio anual de la concentración de ortofosfatos en el lago Piramide, Nevada fue de 0.24 mg l⁻¹ en superficie (0-10 m), en marzo se registraron valores de 0.45 mg l⁻¹ y de 0.15 mg l⁻¹ en octubre. En este lago se observó el desarrollo de florecimiento de *N. spumigena* cuando las concentraciones de ortofosfatos fueron altas (0.27 mg l⁻¹) (Galat *et al.* 1981). Huber y Hamel (1985), indican que durante el florecimiento de *N. spumigena* desarrollado durante el verano en el sistema estuarino Peel-Harvey se registraron valores menores a 0.03 mg l⁻¹ y concluyen que el fósforo es el nutrimento limitante para *N. spumigena*. Estos resultados sugieren que las concentraciones de ortofosfatos pueden llegar a ser muy variables dependiendo del cuerpo de agua, de la época del año, de la profundidad y la hora del día en que se realice el muestreo. Este hecho corresponde con el particular comportamiento de los fosfatos solubles en los sistemas acuáticos, donde este presenta muy bajos períodos de residencia acompañadas por altas tasas de renovación (Parra *et al.* 1980;

Wetzel 1981).

6.2.11 Relación NO_3/PO_4

De acuerdo con Redfield (1958) *in* Hecky y Kilham (1988), el fitoplancton asimila los nutrimentos en la relación en que se encuentran en el agua, y cuando mueren los organismos planctónicos su descomposición devuelve estos materiales a las aguas en la misma proporción. Las aguas interiores o protegidas, presentan relaciones localmente modificadas; la proporción nitrógeno disponible:fósforo disponible, puede ser variable. Las células fitoplanctónicas pueden ser deficientes en cualquier elemento, y la relación N:P puede variar con las concentraciones relativas del medio. Los grados de renovación de nitrógeno y fósforo, son relativamente altos y varían de un sitio a otro (Russel-Hunter 1970).

Margalef (1983) señala que en general, la limitación de la producción primaria se establece en la relación con el fósforo y con el nitrógeno. Teóricamente el fósforo es el elemento limitante y el nitrógeno solo lo puede ser temporalmente, por la existencia de organismos que pueden pasar nitrógeno de la reserva atmosférica al agua, tales como algunas cianofíceas. En las aguas dulces, las alteraciones de la relación N:P se producen por causas diversas, las cuales propician que las cianofíceas se desarrollen considerablemente.

En los ambientes acuáticos los elementos biológicamente activos están en renovación constante, desde la zona fótica por asimilación y sedimentación de nutrimentos o desde la zona afótica a través del suministro por la mezcla con el agua de los ríos o con el agua de profundidad. Existen otros procesos biogeoquímicos tales como la desnitrificación, fijación de nitrógeno, adsorción de fósforo o eutroficación cultural que pueden remover o enriquecer selectivamente con nutrimentos al agua y crear anomalías locales en la proporción relativa de los elementos esenciales. En ambientes de agua dulce, es muy probable que el principal nutrimento que llega a limitar el crecimiento algal corresponde al P, mientras que en los

sistemas marinos y estuarios, el P, Si y el N son los posibles limitantes (Hecky y Kilman 1988).

La limitación de los nutrientes y el crecimiento algal en los lagos tropicales es un punto de discusión importante entre los limnólogos y los oceanógrafos. Frecuentemente las referencias en la literatura como las de Melack *et al.* (1982), Vincent *et al.* (1984) sugieren que en los lagos tropicales, el nutriente limitante es el N, sin embargo, Peters y MacIntyre (1976) y Kalff (1983) *in* Hecky y Kilman (1988), han demostrado la deficiencia de fósforo en lagos pequeños del este de Africa. Para el lago Tanganyica, Hecky y Kling (1981), registran en un perfil de abril de 1975, una relación N:P baja en superficie y una relación alta debajo de la termoclina a 50 m, indicando que la sedimentación del plancton y los detritos estuvieron regenerando nutrientes. El lago es anóxico debajo de los 100 m y la desnitrificación presumiblemente produce una relación N:P baja a profundidad.

Los grandes lagos tropicales dependientes del ciclo interno de los nutrientes, frecuentemente muestran en bioensayos de laboratorio estar limitados por el N más que por el P. Además esta relación es más variable con base en observaciones *in situ* con poblaciones naturales. Consecuentemente la diferencia entre sistemas de agua dulce y marina puede ser debida a las características hidrográficas y biológicas de los ambientes, más que a las diferencias biogeoquímicas entre lagos y océanos (Hecky y Kilman 1988).

Numerosas hipótesis han sido propuestas para explicar el éxito de cianofíceas en los ambientes acuáticos. La importancia de la relación N:P en la determinación de la formación de florecimientos ha sido discutida desde los trabajos de Pearsall (1932) y Hutchinson (1944). Smith (1983) encuentra que la formación de florecimientos de cianofíceas ocurre cuando la relación N:P en el epilimnion cae debajo de 29:1 y son raras cuando la relación N:P excede de este valor. Levine (1983) *in* Hecky Kilman (1988), concluye de sus bioensayos realizados

en los lagos de Canadá, que la relación óptima de N:P para muchas especies fitoplanctónicas estuvo entre 11:1 y 20:1. Debajo de 11:1 dominaron las especies de cianofíceas con heterocitos. Aunque los valores de la relación N:P presentada por distintos autores son diferentes, es evidente que la relación N:P baja está asociada con la formación de florecimientos de cianofíceas fijadoras de nitrógeno.

Es claro que la variación de la relación entre el nitrógeno y el fósforo desempeña una función de gran importancia en la dinámica biológica de los ambientes acuáticos. Para el lago Alchichica la relación N:P se calculó considerando el criterio de Balvay *et al.* (1985) utilizando las concentraciones de NO_3 y PO_4 para determinar el elemento limitante. Valores inferiores a 7 indican limitación por nitrógeno, mientras que valores superiores a 7 por fósforo. En el lago Alchichica durante el muestreo de marzo los valores de la relación estuvieron entre 14 y 36, señalando al fósforo como limitante. Durante abril y mayo cuando las concentraciones de fosfatos se incrementaron, se produce un desequilibrio en la relación N:P (1.3 a 4.3), que aparentemente favorece la proliferación de *N. spumigena* cianofícea capaz de fijar nitrógeno atmosférico, lo que como es el caso representa una ventaja competitiva cuando el nitrógeno es el elemento limitante. A partir del muestreo de junio la mayoría de los valores de la relación aumentaron considerablemente (13.2 a 66) indicando nuevamente al fósforo como el elemento limitante durante el resto de la época de estratificación muestreada (Fig. 23).

Smith (1983) y Paerl (1996) señalan que las cianofíceas capaces de fijar el nitrógeno tienen la habilidad de mantener altas tasas de crecimiento en ambientes deficientes de nitrógeno inorgánico, por lo que son competidores más eficientes que otros grupos fitoplanctónicos

←-----→ NUTRIMENTO LIMITANTE
 NITROGENO FOSFORO

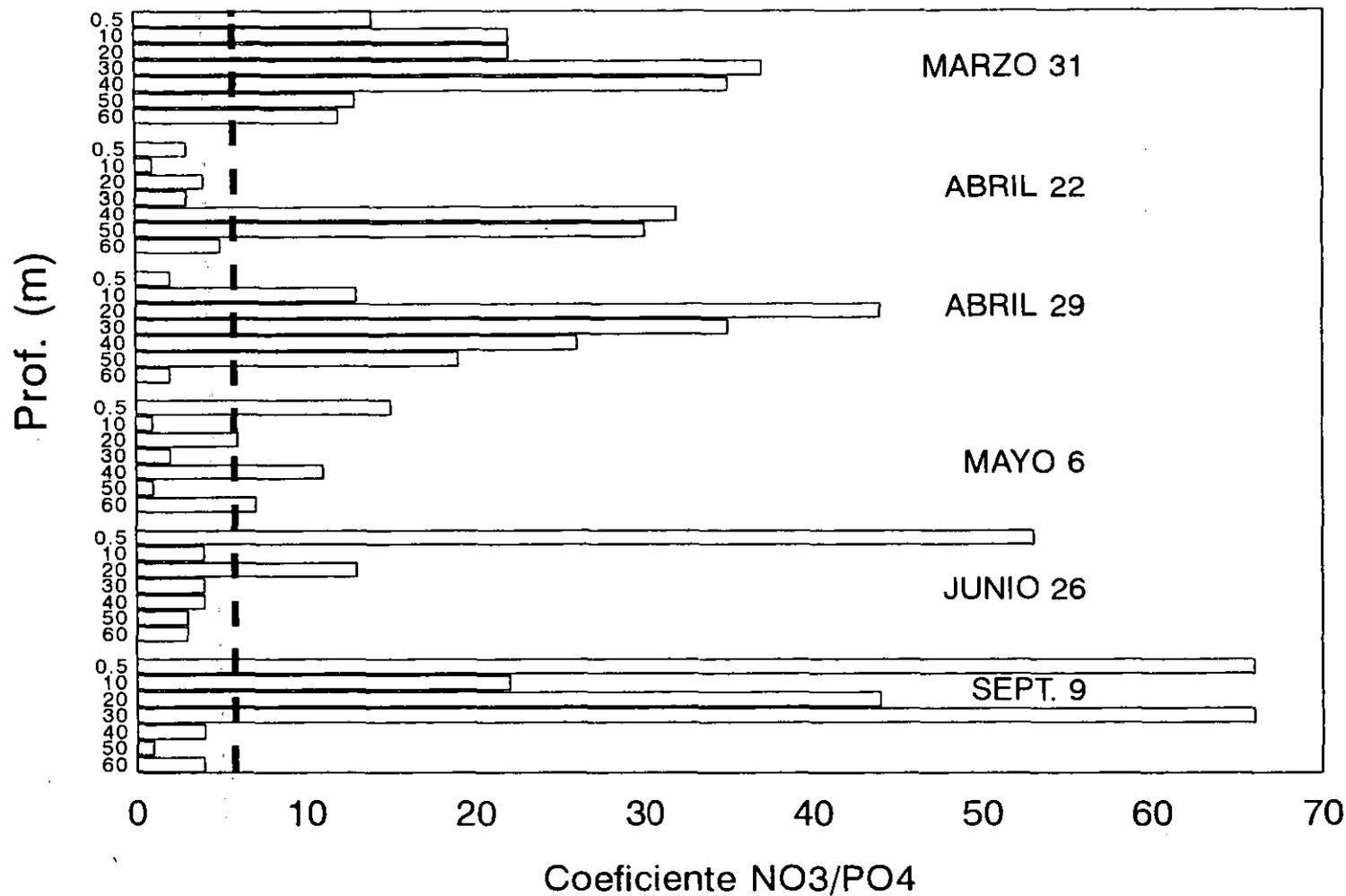


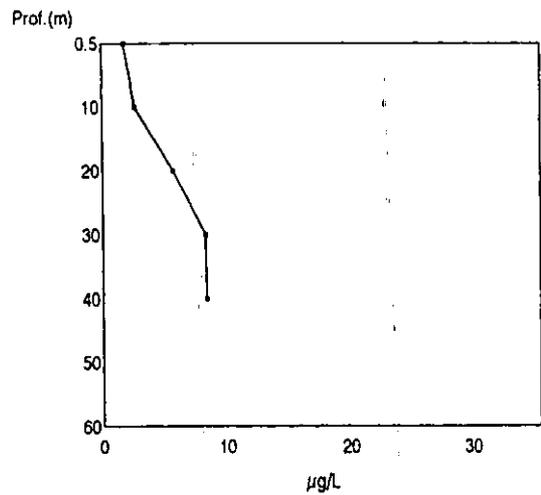
Figura 23. Valores de la relación NO₃/PO₄ por muestreo y profundidad. 1995. La línea punteada indica el elemento limitante.

6.2.12 Clorofila *a*

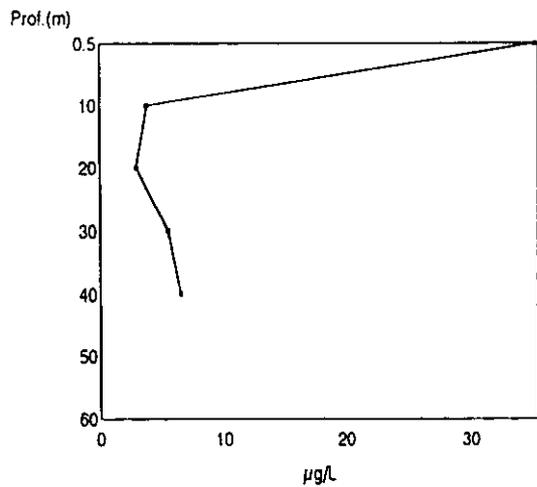
Las concentraciones de clorofila *a* en el lago Alchichica variaron entre 0 y 35 $\mu\text{g l}^{-1}$ (Fig.24). El valor máximo se asoció con la presencia del florecimiento de *N. spumigena*, mientras que los valores más bajos se encontraron en el hipolimnion durante la época de estratificación (junio-septiembre). Si se considera el promedio ponderado (es decir, el promedio considerando el grosor de cada estrato) de concentración en toda la columna de agua, los valores de clorofila *a* variaron entre 2 (junio) y 8 $\mu\text{g l}^{-1}$ (abril 22). Margalef (1983) indica que el valor de 5 $\mu\text{g l}^{-1}$ es el límite de separación entre las aguas oligotróficas y las eutróficas. El valor máximo en el lago Alchichica está por encima de este valor. Sin embargo, debe considerarse que durante cuatro (marzo, mayo, junio y septiembre) de los seis muestreos realizados la concentración promedio de clorofila *a* en Alchichica estuvo por debajo de los 5 $\mu\text{g l}^{-1}$. Por lo anterior, el lago puede considerarse como oligotrófico con cortos períodos de mesotrofia. A esta misma conclusión llegó Garzón (1990) al analizar sus valores de clorofila *a* en este mismo lago. La distribución vertical de la clorofila *a* mostró heterogeneidad durante el período estudiado, durante marzo los valores más altos se midieron entre 30 y 40 m de profundidad (8.3 y 8.4 $\mu\text{g l}^{-1}$ respectivamente). En abril 22, el pico de clorofila *a* se midió a los 0.5 m (35 $\mu\text{g l}^{-1}$) debido a que *N. spumigena* tiene la capacidad de producir vacuolas de gas para regular su flotación, mientras que en el resto de la columna de agua se presentaron concentraciones inferiores. A partir de abril 29, la clorofila *a* disminuyó en toda la columna de agua. Durante los meses de estratificación el valor más elevado se presentó al inicio del metalimnion (11.5 $\mu\text{g l}^{-1}$) a los 30 m de profundidad.

Los valores de clorofila *a* medidos por Garzón (1990) en la columna de agua del lago Alchichica fueron de $6 \pm 6 \mu\text{g l}^{-1}$ (\pm d.e.). Este autor muestreó durante un florecimiento y menciona que midió concentraciones de clorofila *a* hasta de 37 $\mu\text{g l}^{-1}$ en ese período. Estos resultados concuerdan con los intervalos de clorofila *a* medidos en el presente estudio.

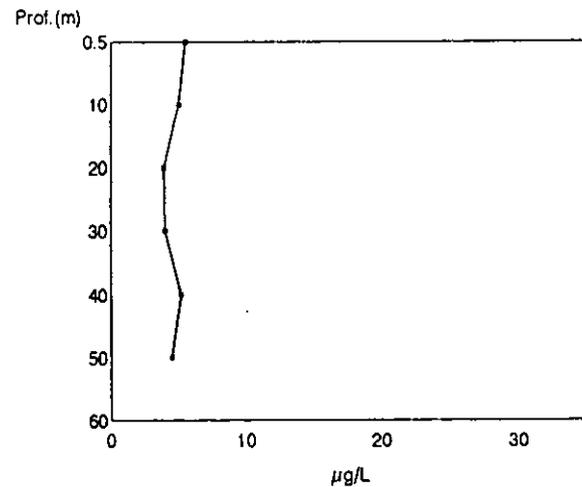
MARZO 31



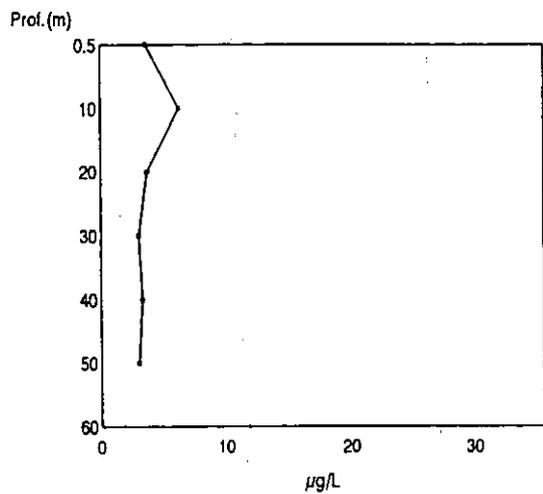
ABRIL 22



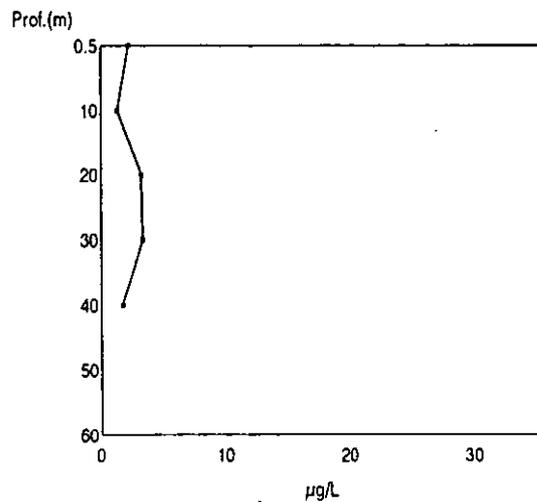
ABRIL 29



MAYO 6



JUNIO 26



SEPTIEMBRE 9

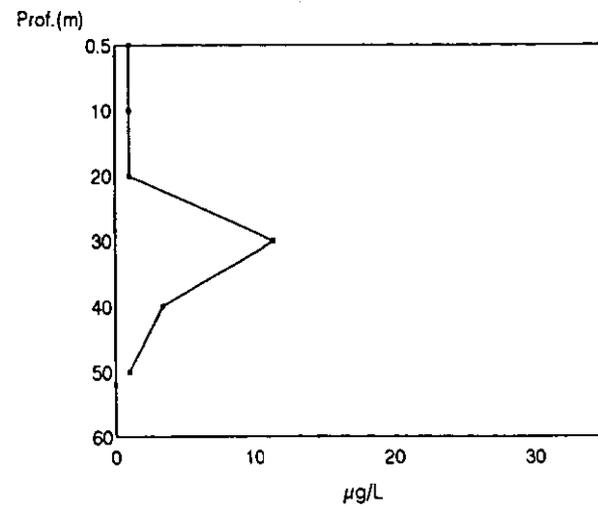


Figura 24. Perfiles de concentración de clorofila α . 1995

Las concentraciones de nutrimentos y de clorofila *a* indican que el lago Alchichica es oligotrófico. Los intervalos de los nutrimentos y de clorofila *a* se encuentran en la parte baja de los intervalos dados por Wetzel (1981) para las aguas interiores del mundo, sin embargo, cuando se desarrolla el florecimiento de *N. spumigena*, este tiende a ser mesotrófico y eutrófico en superficie ($35 \mu\text{g l}^{-1}$).

Al comparar los valores de clorofila *a* encontrados en el lago Alchichica con otros estudios, se tiene que en el lago Pirámide, Nevada, en donde se ha observado el florecimiento de *N. spumigena*, los valores de clorofila *a* medidos fueron generalmente bajos, con un promedio anual de $3.3 \mu\text{g l}^{-1}$ y con un pico de $19 \mu\text{g l}^{-1}$ cuando se presentó el florecimiento de *N. spumigena*. Las concentraciones de clorofila *a* disminuyeron durante el invierno, lo mismo que las poblaciones de fitoplancton (Galat *et al.* 1981, Horne y Galat 1985).

Galat *et al.* (1981) basándose en la morfometría y productividad del lago Pirámide y comparándolo con otros lagos atalasoalinos, sugieren que éste corresponde a un lago salino oligotrófico, con tendencia a ser mesotrófico. Posteriormente, Galat *et al.* (1990) hicieron un estudio a largo plazo durante los florecimientos de verano y otoño de *N. spumigena*, determinados con imágenes de satélite, registrando un intervalo de valores de clorofila *a* de 27 a $72 \mu\text{g l}^{-1}$, de julio a octubre, correspondientes al florecimiento, con una concentración promedio de $32 \pm 7 \mu\text{g l}^{-1}$ entre 1973 y 1986. Esto indicaría que las concentraciones de clorofila *a* fueron subvaluadas en el primer estudio y que el lago puede alcanzar temporalmente condiciones de eutrofia.

Huber (1986) registra en 1978-79 un florecimiento de *N. spumigena* en el estuario Peel-Harvey al Oeste de Australia, con valores de 23.4 mg de clorofila *a l}^{-1}. Huber y Hamel (1985), en esta misma localidad pero en 1981-82, encuentran concentraciones de 14.2 mg de clorofila *a l}^{-1} cuando el florecimiento estaba muy denso. Lukatelich y McComb (1986),**

indican que la intensidad de los florecimientos difieren de un año a otro, y ha sido característicamente más alto en el estuario de Harvey que en la ensenada de Peel, donde el florecimiento ha aumentado desde 1978. Las concentraciones fueron muy altas en superficie especialmente bajo condiciones de calma. En 1982 la concentración máxima en superficie fue de 10.1 mg de clorofila *a* l⁻¹.

En el lago Alexandrina al sur de Australia, las concentraciones de clorofila *a* fueron generalmente bajas y estables de mayo a julio, los valores de clorofila *a* empezaron a aumentar hasta alcanzar sus picos, en septiembre de 1976 con valores de 46.7 µg de clorofila *a* l⁻¹ y en noviembre de 1977 con valores de 71.9 µg de clorofila *a* l⁻¹. Los florecimientos de *N. spumigena* se presentaron al final de la primavera y principios del verano (Geddes 1984).

El lago Valencia situado en el Valle de Aragua al norte de Venezuela, presentó valores de clorofila *a* de 40 µg l⁻¹ en 1981. Las especies de cianofíceas con heterocitos fueron abundantes de junio a principios de diciembre (Levine y Lewis 1984).

Los valores de clorofila *a* medidos en el lago Alchichica (35 µg de clorofila *a* l⁻¹ en superficie durante el florecimiento), se encuentran dentro del intervalo señalado por los autores comentados anteriormente, principalmente cuando se desarrollan florecimientos de cianofíceas, en particular de *Nodularia spumígena*.

6.2.13 Análisis de correlación

En este caso sólo se consideraron las correlaciones mayores de 0.5. Al evaluar la relación entre las variables ambientales y las densidades de células fitoplanctónicas, se obtuvieron los siguientes resultados: *O. parva* presentó densidades que tuvieron una correlación negativa significativa ($p < 0.05$) con la conductividad ($r = -0.50$) y una correlación positiva significativa ($p < 0.05$) con la temperatura ($r = 0.58$), estos resultados indican la

relación de *O. parva* con las condiciones de menor conductividad y alta temperatura en el lago. *O. parva* llegó a ser muy abundante durante el muestreo del 26 de junio, correspondiente a la época cálida y lluviosa. Apoyando la relación con la temperatura, Caljon (1983) indica que esta especie prefiere agua de alta temperatura. El mismo autor señala que es una especie que prefiere condiciones mesohalinas, lo cual contrasta con las condiciones de Alchichica, que son hiposalinas. Kalff y Watson (1986) registran a *O. parva* en el lago Naivasha y en el lago Oloidien en Kenia, que son lagos de agua dulce, sin embargo la misma especie ha sido encontrada en ambientes salinos tropicales como los lagos Elmeinteita, Nakuru y Sonachi, Kenia (Kalff y Watson 1986). A partir de lo anterior se concluye que esta especie parece ser halotolerante y que su relación con la variación de la conductividad en Alchichica es accidental.

O. submarina presentó densidades que tuvieron una correlación positiva significativa ($p < 0.05$) con la temperatura ($r = 0.53$) y con el oxígeno disuelto ($r = 0.60$). La presencia de *O. submarina* durante el período de estudio, coincide con la época en que se presentan los valores más elevados de temperatura y de oxígeno disuelto correspondientes a los muestreos de abril, mayo y junio. Esta época es claramente de incremento de la temperatura ambiental en la zona del lago y adicionalmente fue cuando se presentó el florecimiento de *N. spumigena*, lo cual explica su relación con los valores más elevados de oxígeno disuelto.

M. minutum presentó densidades que tuvieron una correlación negativa significativa ($p < 0.05$) con la salinidad ($r = -0.52$). Los valores más altos de abundancia de esta especie, se presentaron en junio y septiembre entre 10 y 20 metros de profundidad, cuando los valores de salinidad fueron bajos en relación con los otros muestreos y profundidades, durante el período de estudio. Comas (1996) indica que *M. minutum* es abundante en ambientes de baja salinidad y frecuentemente ha sido registrada en cuerpos de agua tropicales, Kalff y Watson

(1986) encontraron a esta especie en los lagos tropicales de agua dulce Naivasha y Oloidien. La información anterior difiere de lo observado en Alchichica, donde las condiciones del agua no corresponden a las del agua dulce. Probablemente esta especie no se encuentra en condiciones óptimas en Alchichica y una ligera disminución de la concentración de sales le resulta benéfica.

N. spumigena presentó densidades que tuvieron una correlación negativa significativa ($p = 0.05$) con la conductividad ($r = -0.62$) y una correlación positiva significativa ($p = 0.05$) con el fósforo total ($r = 0.61$), indicando que *N. spumigena* se relaciona con valores menores de conductividad y concentraciones elevadas de fósforo. En el lago Alchichica los valores más bajos de K_{25} se presentaron en el muestreo del 29 de abril, correspondiente a elevadas densidades de *N. spumigena*. Por otro lado, las concentraciones más elevadas de fósforo total se midieron durante los muestreos del 22 y del 29 de abril, época en la que se observa el florecimiento de *N. spumigena*. Estos resultados coinciden con los encontrados en el lago Piramide, Nevada, con valores moderados de conductividad (8 200-8 650) y concentraciones relativamente altas de fósforo (0.05-0.15 mg l⁻¹) que también coinciden con la presencia del florecimiento de *N. spumigena* (Galat *et al.* 1981, 1990).

VII. CONCLUSIONES

La comunidad fitoplanctónica del lago Alchichica durante el período de estudio, estuvo dominada principalmente por diatomeas (45%), cianofíceas (35%) y clorofíceas (15%). El mayor número de especies correspondió a las diatomeas (9), le siguieron en orden de importancia las cianofíceas (7) y las clorofíceas (3).

Las especies dominantes fueron *Cyclotella quillensis*, *Chaetoceros elmorei*, *Oocystis parva*, *O. submarina*, *Synechocystis aquatilis*, *Chroococcus dispersus* y *Nodularia spumigena*. Las especies temporales fueron *Cymbella mexicana*, *Monoraphidium minutum* y *Merismopedia tenuissima*. Las especies raras fueron *Anomoeoneis* sp., *Gomphonema olivaceum*, *Diploneis pseudovalis*, *Cocconeis placentula* var. *euglypta*, *Epithemia argus*, *Surirella striatula*, *Gomphosphaeria* cf. *lacustris*, *Pseudanabaena* sp., *Oscillatoria* sp. y *Cryptomonas ovata*.

La densidad de algas en general fue baja, excepto en la época del florecimiento de *Nodularia spumigena* (159 592 cél ml⁻¹).

El modelo de variación temporal observado en el lago cráter Alchichica se caracterizó por la presencia de clorofíceas-diatomeas-cianofíceas con heterocitos durante la fase final de circulación y la fase de transición circulación-estratificación y clorofíceas-diatomeas-cianofíceas sin heterocitos durante la fase de estratificación.

El florecimiento de *Nodularia spumigena* del lago cráter Alchichica se restringe a la parte final de período de circulación y período inicial de la estratificación térmica de la columna de agua (abril - mayo).

El valor más bajo de transparencia (2.45 m) se asoció con la presencia del florecimiento de *N. spumigena* ya que el lago Alchichica se caracterizó por tener alta transparencia la mayor parte del período de estudio (6.7 m).

Los factores que favorecieron el desarrollo del florecimiento de *Nodularia spumigena* en el lago cráter Alchichica durante el período de estudio fueron el incremento de la temperatura (19.0 - 19.8°C), elevado pH (9.4) y la conductividad (13 350-13 860 $\mu\text{S cm}^{-1}$) factores que han sido mencionados en otros estudios, como asociados a la formación de florecimientos de esta especie.

El florecimiento de *Nodularia spumigena* observado durante el período de estudio fue promovido por la presencia de fósforo al iniciarse el período de estratificación. Este fósforo en exceso con respecto al nitrógeno creó una ventaja competitiva para las cianofíceas que como *Nodularia spumigena* tienen la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico. Al agotarse el fósforo en la superficie del lago, *Nodularia spumigena* es substituida por clorofíceas y diatomeas y posteriormente otras especies de cianofíceas.

La relación NO_3/PO_4 indica que el nutrimento limitante durante la mayor parte del período de estudio correspondió al fósforo y durante el desarrollo del florecimiento de *Nodularia spumigena* el nutrimento limitante fue el nitrógeno.

El valor máximo de clorofila *a* (35 $\mu\text{g l}^{-1}$) se asoció con la presencia del florecimiento de *Nodularia spumigena*, los valores más bajos se encontraron en el hipolimnion durante la época de estratificación del lago.

Durante el presente estudio se pudo observar que el florecimiento de *Nodularia spumigena* se desarrolló en la superficie del lago cuando la velocidad del viento es baja, la superficie del lago está en calma y presenta una flotabilidad positiva, condiciones que se han observado en otros estudios realizados al respecto.

LITERATURA CITADA

- Alcocer, J., 1995. Análisis holístico de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos litorales de seis lagos-cráter con un gradiente de salinidad. Tesis de Doctorado en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 106 pp.
- Alcocer, J. y E. Escobar, 1988. Limnology of Alchichica lake (México). *Memorias del IV Internacional Symposium on athalassic (Inland) Saline Lakes*. Banyoles. s/p.
- Alcocer, J. y E. Escobar, 1990. The drying up of the Mexican Plateau axalapascos. *Salinet* 4: 34-36.
- Alcocer, J. y E. Escobar, 1992. La producción primaria en aguas athalassohalinas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 43:101-108.
- Alcocer, J. y A. Lugo, 1995. The urban lakes of Mexico City (Lago Viejo de Chapultepec). *Lakeline*. 14,15 y 31.
- Alcocer, J., E. Kato, E. Robles, y G. Vilaclara, 1988. Estudio preliminar del efecto del dragado sobre el estado trófico del lago viejo de Chapultepec. *Contam. Ambient.* 4:43-56.
- Alcocer, J., A. Lugo, S. Estrada, M. Ubeda y E. Escobar, 1993 a. Littoral chironomids of a Mexican Plateau athalassohaline lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25: 444-447.
- Alcocer, J., A. Lugo, S. Estrada, M. Ubeda y E. Escobar, 1993 b. La macrofauna bentónica de los axalapascos. *Actas Congreso Español de Limnología* 6: 409-415.
- Alcocer, J., A. Lugo, M. R. Sánchez, M. Chávez y E. Escobar, 1998. Threats to the saline lakes of the Oriental basin, México, by human activities. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26:1383-1386.
- Alcocer, J. y W. D. Williams, 1993. *Lagos salinos mexicanos*. In Biodiversidad marina y Costera de México. S.I. Salazar-Vallejo y N.E. González (eds.). Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, 849-865.
- Alvarez, J., 1950. Contribución al conocimiento de los peces de la región de los Llanos, Estado de Puebla. México. *Anales. Esc. Nac. Ciencias Biol.* 6: 81-107.
- Anagnostidis, K. y J. Komárek, 1985. Modern approach to the classification system of cyanophytes. I. Introduction. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 71.1/2 *Algol. Stud.* 38-39: 291-302.
- Anagnostidis, K. y J. Komárek, 1988. Modern approach To the classification system of cyanophytes. 3. Oscillatoriales. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 80.1-4. *Algol. Stud.* 50-53: 327-472.
- Anderson, D.M. 1997. Bloom dynamics of toxic *Alexandrium* species in the northeastern U.S. *Limnol. Oceanogr.* 42(5):1009-1022.

- APHA, AWWA y WPFC, 1985. *Standard methods for the examination of water and waste water*. 16.ed. American Public Health Association (ed.). Washington. 1269 pp.
- Arredondo-Figueroa, J.L., L.E. Borrego-Enríquez, R.M. Castillo-Domínguez y M.A. Valladolid-Laredo, 1983. Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biótica* 8 (1): 37-47.
- Arredondo-Figueroa, J.L., O. Vera y A.O. Ortiz, 1984. Análisis de componente principal y cluster de datos limnológicos en el lago de Alchichica, Puebla. *Biótica* 9(1):23-39.
- Balvay, G., G. Barroin, P. Blanc, J. Feuillade, M. Feuillade, A. Orand y J. Pellatier, 1985. *Caractérisation et essais de restauration d'un écosystème dégradé: le lac de Navitua*. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris. 165 pp.
- Barber, H.G. y E.Y. Haworth, 1981. *A guide to the morphology of the diatom frustule*. Freshwater Biological Association. Scientific Publication. 44:112 pp
- Battarbee, R.W., C.M. Keister y J.P. Bradbury, 1984. *The frustular morphology and taxonomic relationships of Cyclotella quillensis Bailey*. 173-184. In: D.G. Mann, 1984 (Ed.). *Proceedings of the seventh International Diatom Symposium*. Philadelphia, August 22-27. Koenigstein, Germany. 541 pp.
- Benson, C.E. y S.R. Rushforth, 1975. *The algal flora of Huntington canyon Utah, U.S.A.*. J. Cramer. Band 18. Bibliotheca Phycologica. Germany. 177 pp.
- Bernardi, R. y Giussani G, 1990. Are Blue-green algae a suitable food for zooplankton? An overview. *Hydrobiologia* 200/201:29-41.
- Blackburn, I.S., M.A. McCausland, C.J.S. Bolch, S.J. Newman y G. J. Jones, 1996. Effect of salinity on growth and toxin production in cultures of the bloom-forming cyanobacterium *Nodularia spumigena* from Australian waters. *Phycologia* 35(6):511-522
- Blinn, D.W, 1984. Growth responses to variations in temperature and specific conductance by *Chaetoceros muelleri* (Bacillariophyceae). *Br. Phycol. J.* 19: 31-35.
- Boney, A.D, 1975. *Phytoplankton*. The Institute of Biology's. Studies in Biology. No. 52. Edward Arnold Publishers. London. 116.
- Bourrelly, P., 1970. *Les algues d'eau douce: Les algues bleues et rouges. Les Eugleniens, Peridiniens et Cryptomonadienes*. Tome III. Ed. Boubée et Cie. Paris. 512 pp.
- Bourrelly, P., 1972. *Les algues d'eau douce: Les algues vertes*. Tome I. Ed. Boubée et Cie. Paris. 572 pp.
- Bourrelly, P., 1981. *Les algues d'eau douce: Les algues jeunes et brunes. Chrysophycées, Phéophycées, Xanthophycées et Diatomées*. Société Nouvelle des Éditions Boubée. Paris. 517 pp.

- Boyer, C.S., 1914. A new diatom. *Proc. Acad. Nat. Sci. Phila.* 66:219-221.
- Bradbury, J.P., 1970. Diatoms from the pleistocene sediments of lake Texcoco, Mexico. *Revue de Geographie physique et de geologie dynamique* 12 (2):161-168.
- Bradbury, J.P., 1971. Paleolimnology of lake texcoco, México. Evidence from diatoms. *Limnol. Oceanogr.* 16(2): 180-200.
- Brandon, R.A., Maruska, E. J. y Rumph, W.T. 1981. A new species of neotenic *Ambystoma* (Amphibia, Caudata) endemic to laguna Alchichica, Puebla, México. *Bull. Southern California Acad. Sci.* 80:112-125.
- Brock, T.D., 1973. Lower pH limit for the existence of blue-green. Evolutionary and ecological implications. *Science*. New York 179. 480-482.
- Campbell, R., 1987. *Ecología microbiana*. Editorial Limusa. México. 268 pp.
- Caljon, A.G., 1983. *Brackish-water phytoplankton of the Flemish Lowland*. Dr. W. Junk Publishers. Kluwer Academic Publishers Group. The Hague, Boston, Lancaster. 272 pp.
- Cantoral, U.E., 1997. *Diatomeas (Bacillariophyceae) de ambientes lóticos en la cuenca baja de la Huasteca Potosina*. Tesis de Doctorado en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 200 pp.
- C.F.E., 1960. *Análisis químicos del agua de El Carmen, Alchichica, Quechulac, La Preciosa y Atexcac en Puebla*. Comisión Federal de Electricidad. Junio 1960 a noviembre de 1962. Reporte inédito.
- Chang, Y.B.W, 1982. Primary productivity and nutrients in the sediment retention basin of Lake Monroe. *Hydrobiologia* 87:193-200.
- Christoffersen, K., 1996. Ecological implications of cyanobacterial toxins in aquatic food webs. *Phycologia* 35:42-50.
- Cole, G. A., 1994. *Textbook of limnology*. Waveland Press, Inc. Illinois. USA. 412 pp.
- Comas, A., 1996. *Las Chlorococcales dulceacuícolas de Cuba*. Bibliotheca Phicologica. Band 99. J. Cramer. Berlin. Stuttgart. 192 pp. .
- Cuna, P. E., 1997. *Estudio comparado de las metodologías para el análisis de las diatomitas aplicadas a una fracción del paleolago Tlaxcala (mina El Lucero, Tlax.)*. Tesis profesional para obtener el título de Biólogo. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala. UNAM. México.66 pp.
- De Buén, F., 1945. Investigaciones sobre ictiología Mexicana. *Anales Inst. Biol. Univ. Nal. Autón. México* 16(2):475-532.

- Desikachary, T.V., 1959. *Cyanophyta*. I.C.A.R. New Dehli. 688 pp.
- Díaz, P.E. y M.C. Guerra, 1979. *Estudio limnológico de los axalapascos del estado de Puebla: resultados preliminares*. Lab. De Cordados. Depto. de Zoología. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. I.P.N. Reporte Inédito.
- Escobar, E. y Alcocer, J., 1983. Limnological characterization of Alchichica lake, México. *Memorias del XXII SIL International Congress. Lyon, Francia. pag.93.*
- Estevez, F. A., 1988. *Fundamentos de Limnología*. Interciencia/FINEP, Río de Janeiro. 575 pp.
- Fay, P., 1983. *The blue-Greens (Cyanophyta-Cyanobacteria)*. The Institute of Biologiy's Studies in Biology No. 160. The Camelot Press Ltd, Southampton. 88 pp.
- Felix, E.A. y S.R. Rushforth., 1979. The algal flora of the Great Salt Lake, Utah, U.S.A. *Nova Hewigia* 21:163-195.
- Fogg, G.E., W.D.P. Stewart, P. Fay y A.E. Walsby, 1973. *The blue-green algae*. Academic Press. London and New York. 459 pp.
- Fuentes, A.L., 1972. *Regiones naturales del estado de Puebla*. Univ. Nal. Autón. México. México, 143 pp.
- Galat, L.D., E.L. Lider, S. Vigg y S.R. Robertson, 1981. Limnology of a large, deep, North American terminal lake, Pyramid Lake, Nevada, U.S.A. *Hydrobiologia* 82:281-317.
- Galat, L.D., J. P. Verdin y L. L. Sims, 1990. Large-scale patterns of *Nodularia spumigena* blooms in Pyramid Lake, Nevada, determined from Landsat imagery:1972-1986. *Hydrobiologia* 197:147-164.
- Ganf, G.G. y R.L. Oliver, 1982. Vertical separation of light and available nutrients as a factor causing replacement of green algae by blue-green algae in the plankton of a stratified lake. *Journal of Ecology* (70): 829-844.
- García, E., 1988. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. E. García (ed.), México, 217 pp.
- García de León, A., 1988. *Generalidades del análisis de cúmulos y del análisis de componentes principales*. Divulgación Geográfica, Instituto de Geografía, UNAM. México. 29 pp.
- Garzón, M.A., 1990. *Caracterización saprotrófica de los lagos cráter de la región de los Llanos, Pue.* Tesis de Licenciatura (Biología), ENEP-Iztacala, UNAM, México, 102 pp.
- Gasca, A., 1981. *Algunas notas de la génesis de los lagos cráter de la Cuenca de Oriental, Puebla-Tlaxcala, Veracruz*. Inst. Nal. Antropol. Hist. Departamento de Prehistoria. México, 55 pp. (Colección Científica Prehistoria No. 98).

- Geddes, M.C., 1984. Limnology of Lake Alexandrina, River Murray, South Australia, and the effects of nutrients and light on the phytoplankton. *Aust. J. Mar. Freshw. Res.* 35: 399-415.
- Geitler, L., 1932. *Cyanophyceae*. In Rabenhort's Kryptogamen-Flora von Deutschland, Osterreich und der Schweiz. Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H. Leipzig. 14, 1196 pp.
- Germain, H., 1981. *Flore des diatomées. Diatomophycées*. Société Nouvelle des éditions Boubée, Paris. 443 pp.
- González, G.J. y E. Novelo, 1986. *Algas*. In: *Manual de Herbario. (Comp.). Manual de Herbario. Administración y Manejo de Colecciones, Técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos*. Lot, A. y F. Chiang (Comps.). Consejo Nacional de la Flora México, A.C., México. p.p. 47-54.
- Hach, Company, 1993. *Drel/2000 advanced water quality laboratory*. Procedures Manual. U S A. Hach Co. 166 pp.
- Hallegraeff, G.M., 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia* 32(2):79-99.
- Hamel, K.S. y A.L. Huber, 1985. Relationship of cellular phosphorus in the cyanobacterium *Nodularia* to phosphorus availability in the Peel-Harvey Estuarine System. *Hydrobiologia* 124:57-63
- Hammer, U.T., 1964. The succession of "bloom" species of blue-green algae and some causal factors. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 15: 829-836.
- Hammer, U.T., J.S. Sheard y J. Kranabetter, 1990. Distribution and abundance of littoral benthic fauna in Canadian prairie saline lakes. *Hydrobiologia* 197:173-192.
- Hannan, H. H., I.R. Ruchs y D.C. Whitenberg, 1979. Spatial and temporal patterns of temperature, alkalinity, dissolved oxygen and conductivity in an oligo-mesotrophic, deep-storage reservoir in central Texas. *Hydrobiologia* 66 (3):209-221.
- Hecky, R.E. y P.Kilham, 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* 33 (4 parte 2): 796-822.
- Hecky, R.E. y H.J. Kling, 1981. The phytoplankton and protozooplankton of the euphotic zone of Lake Tanganyika: Species composition, biomass, chlorophyll content, and spatio-temporal distribution. *Limnol. Oceanogr.* 26: 548-564.
- Horne, A.J., Sandusky, J.C. y C.J.W. Carmiggelt, 1979. Nitrogen fixation in Clear Lake, California. Repetitive synoptic sampling of the spring *Aphanizomenon* blooms. *Limnol. Oceanogr.* 24: 316-328.

- Horne, A.J. y D.L. Galat, 1985. Nitrogen fixation in an oligotrophic, saline deser lake: Pyramid lake, Nevada. *Limnol. Oceanogr.* 30(6):1229-1239.
- Huber, A.L., 1984. *Nodularia* (Cyanobacteriaceae) Akinetes in the sediments of the Peel-Harvey Estuary, Western Australia: Potential inoculum source for *Nodularia* blooms. *Applied and Environmental Microbiology* 47:234-238.
- Huber, A.L., 1986. Nitrogen fixation by *Nodularia spumigena* Mertens (Cyanobacteriaceae). 1:Field studies and the contribution of blooms to the nitrogen budget of the Peel-Harvey Estuary, Western Australia. *Hydrobiologia* 131:193-203.
- Huber, A.L. y K.S. Hamel, 1985. Phosphatasa activities in relation to phosphorus nutrition in *Nodularia spumigena* (Cyanobacteriaceae). *Hydrobiologia* 123:145-152.
- Huber-Pestalozzi, G., 1941. *Das phytoplankton des Süßwassers. L. Teil. 1. Hälfte: Chrysophycees. Farblare Flagellates. Heterokontes.* E. Schweizer bast'sche Verlagsbuchhandlug. Stuttgart. 365 pp.
- Huber-Pestalozzi, G., 1950. *Das phytoplankton des Süßwassers. 3. Teil: Cryptophyceen, Chloromonadineen, Peridineen.* In A. Thienemann, ie Binnengewässer. 16 (3):1-310.
- Hustedt, F., 1930 a. *Die Süßwasser-flora Mitteleuropas. Helft 10: Bacillariophyta (Diatomeae).* Verlag von Gustav Fischer, Jena. 466 pp.
- Hustedt, F., 1930 b. *Rabenhorst's kryptogamen-flora.* Band VII. Die Kieselalgen 1 teil. Otto Koeltz Science Publishers (1977). Koenigstein, 920 pp.
- Hustedt, F., 1930 c. *Die kieselalgen. Band VII. 1 teil: Einleitung and Centricae.* Reprint 1977. Otto Koeltz Science Publishers W. Germany. 920 pp.
- Hustedt, F., 1959. *Rabenhorst's Kryptogamen-flora. Band VII. Die Kieselalgen 2 teil: Pennatae.* Reprint 1977. Otto Koeltz Science Publishers Koenigstein. W. Germany. 845 pp.
- Hustedt, F., 1961-1966. *Rabenhorst's Kryptogamen-flora. Band VII. Die Kieselalgen 3 teil: Gattung Navicula.* Reprint 1977. Otto Koeltz Science Publishers, Koenigstein. 816 pp.
- Hutchinson, G.E., 1944. Limnological studies in connecticut. VII. A critical examination of the supposed relationship between phytoplankton periodicity and chemical changes in lake waters. *Ecology* 25(1):3-26.
- Hutchinson, G.E., 1957. *A treatise on limnology. Vol. I. Geography, physics, and chemistry.* John Wiley and Sons, Inc., New York. 1015 pp.
- Hutchinson, G.E., 1967. *A treatise on limnology. Vol. 2. Introduction to lake biology and the limnoplankton.* John Wiley y Sons, Inc., New York and London. 1115 pp.

- Jeffrey, S. y G. Humphrey, 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*, and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physical. Pflanzen. (BPP)*. 167: 191-194.
- Jones, R.C., 1991. Spatial and temporal patterns in a cyanobacterial phytoplankton bloom in the tidal freshwater Potomac River, USA. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24:1698-1702.
- Jorgensen, S.E., 1989. Changes of redox potential in aquatic ecosystems. En: Mitsch, W. J. y S. E. Jorgensen (eds.). *Ecological engineering. An Intr. to ecotechnology*. Wiley Chichester. 341-355.
- Juárez, B.D., 1998. *Estudio de las diatomitas de la sección inferior de la mina "El Lucero", Tlaxcala*. Tesis profesional para obtener el título de Biólogo. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala. UNAM. México. 74 pp.
- Kalff, J. y Watson, S., 1986. Phytoplankton and its dynamics in two tropical lakes: a tropical and temperate zone comparison. *Hydrobiologia* 138:161-176.
- Kauppi, L.H., S.T. Knuutila, K.O. Sandman, K. Eskonen, S. Luokkanen y A. Liehu, 1990. Role of landuse in the occurrence of blue-green algal blooms. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24: 671-676.
- Komárek, J. y K. Anagnostidis, 1986. Modern approach to the classification system of cyanophytes. 2. Chroococcales. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 73. 2. *Algol. Stud.* 43:157-226.
- Komárek, J. y K. Anagnostidis, 1989. Modern approach To the classification system of cyanophytes. 4. Nostocales. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 82. 3. *Algol. Stud.* 56: 247-345.
- Komárek, J. y B. Fott, 1983. *Chlorophyceae. (Grüalgen). Ordnung: Chlorococcales. 7/1. 16. Das phytoplankton des sübwassers, Systematik und biologie*. Die Binnengewässer. Huber-Pestalozzi, G. (Ed.). Stuttgart. E. Schweizerbart'sche Stuttgart Verlagsbuchhandlung. 1044 pp.
- Komárek, J., M. Hübel, H. Hübel y J. Šmarda, 1993. The *Nodularia* studies 2. Taxonomy. V *Algological Studies* 68:1-25.
- Komárková-Legnerová, J., 1969. The systematics and ontogenesis of the genera *Ankistrodesmus* Corda and *Monoraphidium* Gen. Nov. *Studies in Phycology (Praha)* 75-122.
- Krammer, K. y H. Lange-Bertalot, 1986. 2/1 *Bacillariophyceae* 1. Teil: *Naviculaceae*. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds). *Sübwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany. 876 pp.
- Krammer, K. y H. Lange-Bertalot, 1988. 2/2. *Bacillariophyceae*. 2. Teil: *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds). *Sübwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Germany. 596 pp.

- Krammer, K. y H. Lange-Bertalot, 1991 a. 2/3. *Bacillariophyceae*. 3. teil, *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds). *Sübwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. 576 pp.
- Krammer, K. y H. Lange-Bertalot, 1991 b. 2/4. *Bacillariophyceae*. 4. Teil: *Achnanthaceae*. Kritische ergänzungen zu *Navicula (Lineolatae)* und *Gomphonema*. In: Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds). *Sübwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart. 437 pp.
- Kühnemann, O., 1966. Floraciones acuáticas y nivales ocasionadas por algas. *An. Soc. Sci. Arg.* Ser. 2. Ciencia aplicada, 180(1): 3-47.
- Levine, S.N. y W.M. Lewis, Jr., 1984. Diel variation of nitrogen fixation in Lake Valencia, Venezuela. *Limnol. Oceanogr.* 29(4): 887-893.
- Lewis, W.M. Jr., 1973. The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. *Limnol. Oceanogr.* 18:200-217.
- Lewis, W.M. Jr., 1978 a. A. Compositional, phytogeographical and elementary structural analysis of the phytoplankton in a tropical lake: Lake Lanao, Philippines. *J. Ecol.* 66:213-226.
- Lewis, W.M. Jr., 1978 b. Dynamics and succession of the phytoplankton in a tropical lake: Lake Lanao, Philippines. *J. Ecol.* 66: 849-880.
- Lewis, W.M. Jr., 1983. Temperature, heat, and mixing in Lake Valencia, Venezuela. *Limnol. Oceanogr.* 28 (2): 273-286.
- Lewis, W.M. Jr., 1986. Phytoplankton succession in Lake Valencia, Venezuela. *Hydrobiologia* 138:189-203.
- Lowe, R.L., 1974. *Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatoms*. EPA Report # EPA-670/4-7-4005, Cincinnati OH, 333 pp.
- Lugo, A., 1993. *Estudio de las comunidades litorales de protozoarios en seis lagos cráter del estado de Puebla, mediante el método de colonización de sustratos artificiales*. Tesis de Maestría (Biología de sistemas y recursos acuáticos), Facultad de Ciencias, División de Estudios de Posgrado, UNAM, 76 pp.
- Lugo, A., J. Alcocer, M.R. Sánchez y E. Escobar, 1993. Trophic status of tropical lakes indicated by littoral protozoan assemblages. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25:441-443
- Lugo, A., J. Alcocer, M.R. Sánchez, E. Escobar y M. Macek, 1998. Temporal and spatial variation of bacterioplankton abundance in a tropical, warm-monomictic, saline lake Alchichica, Puebla, México. *Societas Internationalis Limnologiae. XXVII Congress. Book of abstracts*. Dublin, Irlanda. 315 pp.
- Lugo, A., M.E. González, M.R. Sánchez y J. Alcocer, 1999. Distribution of *leptodiatomus*

- novamexicanus* (Copepoda: Calanoida) in a Mexican hyposaline lake. *Rev. Biol. Trop.* 47: 141-148.
- Lukatelich, R.J. y A.J. McComb, 1986. Nutrient levels and the development of diatom and blue-green algal blooms in a shallow Australian estuary. *Journal of plankton research.* 8(4):597-618.
- Maidana, N. I., 1985. *Contribución al estudio taxonómico de las diatomeas (Bacillariophyceae) de la provincia de Misiones, República Argentina.* Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Argentina. 276 pp.
- Maidana, N.I. y O.E. Romero, 1995. Diatoms from the hypersaline "la Amarga" lake (la Pampa, Argentina). *Cryptogamye. Algol.* 16(3):173-188.
- Macek, M., G. Vilaclara y A. Lugo, 1994. Changes in protozoan assemblages structure and activity in a stratified tropical lake. *Mar. Microb. Food Webs* 8:235-249.
- Margalef, R., 1983. *Limnología.* Ed. Omega, Barcelona, 1010 pp.
- Marshall, W. D. 1987. *Biología de las Algas. Enfoque fisiológico.* LIMUSA México. 236 pp.
- Melack, J. M., 1979. Temporal variability of Phytoplankton in tropical lakes. *Oecologia (Berl.)* 44:1-7.
- Melack, J.M. y P. Kilham, 1974. Photosynthetic rates of phytoplankton in East African alkaline, saline lakes. *Limnol. Oceanogr.* 19:743-755.
- Melack, J.M., P. Kilham y T.R. Fisher., 1982. Responses of phytoplankton to experimental fertilization with ammonium and phosphate in an African soda lake. *Oecologia* 52: 321-326.
- Merino, V., J. García, M. Hernández-Mariné y M. Fernández, 1994. Morphology and ultrastructure of *Gomphoneis rhombica* (Fricke) comb. nov. *Diatom Research.* 9(2):335-347.
- Metcalf, S.E., 1988. Modern diatom assemblages in central México: The role of water chemistry and other environmental factors as indicated by TWINSPAN and DECORANA. *Freshwater Biology (19)*:217-233
- Nehring, S., 1993. Mortality of dregs associated with a mass development of *Nodularia spumigena* (Cyanophyceae) in a brackish lake at German North Sea coast. *Journal of Plankton Research* 15(7):867-872.
- Neilan, B. A., 1996. Detection and identification of cyanobacteria associated with toxic blooms: DNA amplification protocols. *Phycologia* 35:147-155.
- Njuguna. G.S., 1988. Nutrient-phytoplankton relationship in a tropical meromictic soda lake. *Hydrobiologia* 158:15-28.

- Nordin, R.N. y J.R. Stein, 1980. Taxonomic revision of *Nodularia* (Cyanophyceae/Cyanobacteria). *Canadian Journal of Botany* 58 (11):1211-1224.
- Novelo, M. E., 1998. *Floras ficológicas del Valle de Tehuacán*, Puebla. Tesis de Doctorado en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 599 pp.
- Nünberg, G. A., 1987. A comparison of internal phosphorus loads in lakes with anoxic hypolimnia: Laboratory incubation versus in situ hypolimnetic phosphorus accumulation. *Limnol. Oceanogr.* 32(5):1160-1164.
- Nünberg, G. A., 1995. Quantifying anoxia in lakes. *Limnol. Oceanogr.* 40: 1100-1111.
- Olli, K., 1996. Mass occurrences of cyanobacteria in Estonian waters. *Phycologia* 35:156-159.
- Ordóñez, E., 1906. Los Xalapazcos del estado de Puebla. Parengones del Instituto geológico de México. 1(8):348-405.
- Ortega, M., 1984. *Catálogo de algas continentales recientes de México*. UNAM. México. 566 pp.
- Paerl, H.W., 1988. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnol. Oceanogr.* 33(4 parte 2): 823-847.
- Paerl, H.W., 1996. A comparison of cyanobacterial bloom dynamics in freshwater, estuarine and marine environments. *Phycologia* 35(6):25-35.
- Parra, O.O., M. González, V. Dellarosa, P. Rivera y N. Orellana, 1982 a. *Manual taxonómico del Fitoplancton de aguas continentales, con especial referencia al fitoplancton de Chile. I. Cyanophyceae*. Universidad de Concepción Chile. 70 pp.
- Parra, O.O., M. González, V. Dellarosa, P. Rivera y N. Orellana, 1982 b. *Manual taxonómico del Fitoplancton de aguas continentales, con especial referencia al fitoplancton de Chile. III. Cryptophyceae-Dinophyceae-Euglenophyceae*. Universidad de Concepción Chile. 99 pp.
- Parra, O.O., M. González y V. Dellarosa. 1983. *Manual taxonómico del fitoplancton de aguas continentales con especial referencia al fitoplancton de Chile. V. Chlorophyceae. Parte I: Volvocales, Tetrasporales, Chlorococcales y Ulothricales*. Universidad de Concepción, Chile. 151 pp.
- Parra, O.O., E. Ugarte, S. Mora, M. Liberman, A. Aron y L. Lalabanoff, 1980. Remarks on a bloom of *Microcystis aeruginosa* Kützing. *Nova Hedwigia* 33: 971-1004.
- Pascher, A., 1915. *Die Süßwasse – Flora. Deutschlands, Österreichs und der Schweiz. Heft 5: Chlorophyceae II. Tetrasporales, Protococcales, Einzellige Gattungen Unsicherer Stellung*. Jena Verlag Von Gustav Fischer. 124-130.
- Patrick, R., 1943. *The diatoms of Linsley Pond, Connecticut*. Proc. Acad. Natural Sci. Philadelphia 95:

53-110.

- Patrick, R., 1977. Ecology of freshwater diatoms and diatom communities. *In: The biology of diatoms*, D. Werner (Ed.). *Bot. Monogr.*, 13, cap. 10:284-332.
- Patrick, R. y C.W. Reimer, 1966. *The diatoms of the United States. Volume I*. Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia. NAS, Philadelphia, 688 pp.
- Patrick, R. y C.W. Reimer, 1975. *The diatoms of the United States. Volume II*. Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia. NAS, Philadelphia, 213pp.
- Pearsall, W.H., 1932. Phytoplankton in English lakes. 2. The composition of the phytoplankton in relation to dissolved substances. *J. Ecol.* 20:241-262.
- Pentecost, A., 1984. Observations on a bloom of the neuston alga, *Nautococcus pyriformis*, from southern England with explanation of the floatation mechanism. *Br. Phycol. J.* 19:227-232.
- Pérez, M.C., S. Bonilla, L. de León, J. Smarda y J. Komárek, 1999. A Bloom of *Noctularia baltica-spumigena* group (Cyanobacteria) in a shallow coastal lagoon of Uruguay, South America. *Algological Studies* 93:91-101.
- Philipose, M.T., 1967. *Chlorococcales*. Indian Council of Agricultural Research. Nueva Delhi. 365 pp.
- Piña, E., 1984. *Variación estacional del fitoplancton en tres axalapazcos de la Cuenca de Oriental, Puebla*. Tesis de Biología, ENCB, IPN, México. 41 pp.
- Pizzolon, L., 1996. Importancia de las cianobacterias como factor de toxicidad en las aguas continentales. *Interciencia* 21(6):239-245.
- Pollinger, U., 1986. Phytoplankton periodicity in a subtropical lake (Lake Kinneret, Israel). *Hydrobiologia* 138:127-138.
- Prescott, G.W., 1962. *Algae of the Western Great Lakes Area*. Revised edition. Dubuque, Iowa. Wm. C. Brown Co. Pub. 977 pp
- Ramírez-García, P. y R.A. Novelo, 1984. La vegetación acuática vascular de seis lagos-cráter del estado de Puebla, México. *Bol. Soc. Bot. México* 46: 75-88.
- Ramírez-García, P. y F. Vázquez-Gutierrez, 1989. Contribuciones al estudio limnobotánico de la zona litoral de seis lagos cráter del Edo. de Puebla. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nat. Autón. México*. 16 (1): 1-16.
- Rawson, D.S. y J.E. Moore, 1944. The saline lakes of Saskatchewan. *Can. J. Res.* 22:141-201.
- Reháková, H., 1969. *Die variabilität der Arten der Gattung Oocystis*. A. Braun. In: *Studies in Phycology*. Fott, B. (Ed.). Stuttgart. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 145-196.

- Reyes, C.M., 1979. *Geología de la Cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala*. Colección Científica Prehistoria 71. Inst. Nal. Antrop. Hist. de México, México. 62 pp.
- Reynolds, C.S., 1984. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press. Cambridge. London. 384 pp.
- Reynolds, C. S. y A.E. Walsby, 1975. Water-blooms. *Biol. Rev.* 50: 437-481.
- Richerson, P.J., P.J. Neale, W. Wurtsbaugh, R.T. Alfaro y W. Vincent, 1986. Patterns of temporal variation in Lake Titicaca. A high altitude tropical lake. I. Background, physical and chemical processes, and primary production. *Hydrobiologia* 138: 205-220.
- Rodríguez, R. A., 1998. *Microanálisis de laminaciones en el depósito diatomífero de la mina de Santa Bárbara, Paleolago Tlaxcala, Tlax.* Tesis de licenciatura en Biología. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. México. 58 pp.
- Ross, R., E.J. Cox, N.I. Karayeva, D.G. Mann, T.B.B. Paddock, R. Simonsen y P.A. Sims, 1979. An amended terminology for the siliceous components of the diatom cell. *Nova Hedwigia, Beih.* 64:513- 533.
- Round, E. F., 1981. *The ecology of algae*. Cambridge University Press. Cambridge. 653 pp
- Russel-Hunter, W.D., 1970. *Productividad acuática. Introducción a algunos aspectos básicos de la oceanografía biológica y de la limnología*. Editorial ACRIBIA Zaragoza, España. 273 pp.
- Rushforth, R.S. y J.R. Johansen, 1986. The inland *Chaetoceros* (Bacillariophyceae) species of North America. *J. Phycol.* 22:441-448.
- Schindler W.D., 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science* 195:260-262.
- Sellner, K.G., 1997. Physiology, ecology, and toxic properties of marine cyanobacteria blooms. *Limnol. Oceanogr.* 42(5):1089-1104.
- Sellner, K.G., M.M. Olson, y K. Kononen, 1994. Copepod grazing in a summer cyanobacteria bloom in the Gulf of Finland. *Hydrobiologia* 292/293:249-254.
- Sellner, K.G., M.M. Olson y K. Olli, 1996. Copepod interactions with toxic and non-toxic cyanobacteria from the Gulf of Finland. *Phycology* 35: 177-182.
- Serruya, C. y T. Berman, 1975. Phosphorus, nitrogen and the growth of algae in the lake Kinneret. *J. Phycol.* 11:155-162.
- Shapiro, J., 1990. Current beliefs regarding dominance by blue-greens: The case for the importance of CO₂ and pH. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 24:38-54.

- Simonsen, R., 1979. The Diatom System: Ideas of Phylogeny. *Bacillaria* 2: 9-71.
- Skovgaard, J.H. y Østergaard A.F, 1990. Impact of nitrate and blue-green algae abundance on phosphorus cycling between sediment and water in two shallow, eutrophic lakes. *Verh. Internat Verein. Limnol.* Part (1) 24:224-230.
- Simeón, R., 1988. *Diccionario de la lengua náhuatl o mexicana*. 7a. ed. Editorial siglo XXI, México, 783 pp.
- Šmarda, J. y D. Šmajš, 1996. Morphological types of gas vesicles. *Algological Studies* 83:485-499.
- Smayda, T.J., 1990. The influence of lime and biological activity on sediment pH, redox and phosphorous dynamics. *Hydrobiologia* 192:191-203.
- Smayda T.J., 1997. What is a bloom? A. commentary. Bloom dynamics: Physiology, behavior, trophic effects. *Limnol. Oceanogr.* 42(5):1132-1136.
- Smith, G.M., 1933. *The freshwater algae of the United States*. McGraw-Hill Book Co., Inc. New York and London. 716 pp.
- Smith, V.H., 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* 221:669-671.
- Steel, R.G.D. y J.H. Torrie, 1989. *Bioestadística: principios y procedimientos*. Mc Graw-Hill, México. 662 pp.
- Sze, P., 1980. Seasonal succession of phytoplankton in Onondaga lake, New York (U.S.A.). *Phycologia* 19 (1): 54-59.
- Sze, P. y J. M., Kingsbury, 1972. Distribution of phytoplankton in a polluted saline lake, Onondaga Lake, New York. *J. Phycol.* 8: 25-37.
- Talling, J.F., 1986. The seasonality of phytoplankton in African lakes. *Hydrobiologia* 138:139-160.
- Tamayo, J.L., 1962. *Geografía general de México*. Geografía física 2ª Ed. Inst. Mexicano de Investigaciones Económicas, México, tomo I: 562 pp.
- Tamayo, J.L., 1980. *Geografía moderna de México*. 9ª Ed. Editorial Trillas. México. 400 pp.
- Tavera, R. y J. Komárek, 1996. Cyanoprokariotes in the volcanic lake of Alchichica, Puebla State, México. *Algological Studies* 83:511-538.
- Taylor, E., 1943. A new ambistomid salamander adapted to brackish water. *Copeia* 3: 151-156.
- Taylor, F.J.R., 1980. *Basic biological features of phytoplankton cells*. in: Studies in Ecology. The phycological Ecology of Phytoplankton. Ed. I. Morris. Blackwell Scientific Publications 7: 3-

- Terao, K., S. Mayama y H. Kobayasi, 1993. Observations on *Cymbella mexicana* (Ehrenb.) Cleve var. *mexicana* (Bacillariophyceae) with special reference to the band structure. *Hydrobiologia* 269/270: 75-80.
- Theriot, E. y E.F. Stoermer, 1982. Observations on North American populations of *Stephanodiscus* (Bacillariophyceae) species attributed to Friedrich Hustedt. *Trans. Am. Microsc. Soc.* 101(4):368-374.
- Tiffany, L.H. y M.E. Britton, 1952. *The algae of Illinois*. 1971 facsimile of the 1952 ed. by Hafner Publishing Co. New York.
- Toetz, W. D., 1981. Effects of pH, phosphate and ammonia on the rate of uptake of nitrate and ammonia by freshwater phytoplankton. *Hydrobiologia* 76:23-26.
- Vilaclara, G., M. Chávez, A. Lugo, H. González y M. Gaytán, 1993. Comparative Description of Crater-Lakes Basic Chemistry in Puebla State, Mexico. *Verh. Internat. Verein Limnol.* 25: 435-440.
- Vincent, W.F., W. Wurtsbaugh, C.L. Vincent y P.J. Richerson, 1984. Seasonal dynamics of nutrient limitation in a tropical high-altitude lake (Lake Titicaca, Peru-Bolivia): Application of physiological bioassays. *Limnol. Oceanogr.* 29:540-552.
- Vincent, W.F., C.L. Vincent, M.T. Downes y P.J. Richerson, 1985. Nitrate cycling in lake Titicaca (Peru-Bolivia): the effects of high-altitude and tropicality. *Freshwater Biology* 15:31-42.
- Vinyard, W.C., 1979. *Diatoms of North America*. Mad River Press, Inc. California. 119 pp.
- Walsby, A. E., 1977. The gas vacuoles of the blue-green algae. *Sci. Am.* 237(2):90-97.
- Wetzel, R.G., 1981. *Limnologia*. Omega. Barcelona. 679 pp.
- Wetzel, R.G. y G.R. Likens, 1979. *Limnological Analyses*. Saunders. Filadelfia. 357 pp.
- Williams, W.D., 1964. A contribution to lake typology in Victoria, Australia. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 15:158-163.
- Williams, W.D., 1981. Inland salt lakes: An Introduction. *Hydrobiologia* 81:1-14.
- Williams, W.D., A.J. Boulton y R.G. Taaffe, 1990. Salinity as a determinant of salt lake fauna: a question of scale. *Hydrobiologia* 197:257-266.
- Yacubson, S., 1969. Algas de ambientes acuáticos continentales, nuevas para Venezuela. (Cyanophyta, Chlorophyta). *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*. 3: 7-87.

APÉNDICE 1. DESCRIPCIÓN DE ESPECIES RARAS

Anomoeoneis sp.

Valvas elíptico lanceoladas, con ápices capitados. Área axial estrecha, área central lisa asimétrica, en un lado de la valva, transversalmente se forma un stauro completo, mientras que en el lado contrario no llega a formarse debido a la presencia de estrías cortas. Rafe recta con terminaciones distales y proximales rectas. Células de 40-68 μm de largo y de 12-21 μm de ancho. Estrías radiales finamente punteadas, irregulares 15-20/10 μm (Fig. 2 a).

OBSERVACIONES. Los ejemplares observados coinciden con las características de *A. sphaerophora* sin embargo es necesario revisar más ejemplares para confirmar y determinar la especie. Este género se ha encontrado en ambientes lénticos y lóticos formando parte de la comunidad del fitoplancton y fitobentos. En aguas oligotróficas y eutróficas, duras y salinas (Caljon 1983, Novelo 1998). En el área de estudio sólo se encontró en el mes de junio.

Gomphonema olivaceum (Hornemann) Brébisson 1838

= *Echinella olivacea* (Hornemann) Lyngbie 1819; *Ulva olivacea* Hornemann 1820; *Gomphonema leiblenii* Agardh 1830; *Gomphonema vulgare* (Kützing 1844) Rabenhorst 1864; non Brébisson 1838; *Gomphocymbella vulgaris* (Kützing 1844) O. Müller 1905; *Gomphoneis olivacea* (Hornemann) Dawson ex Ross et Sims. 1978.

Células heteropolares. Vista conectiva cuneiforme, vista valvar elíptica lanceolada, parte apical ampliamente redondeada, parte basal angosta y ligeramente redondeada de 45-53 μm de largo y de 10-14 μm de ancho. Área axial recta, área central redondeada sin estigma. Rafe recta con terminaciones distales y proximales rectas. Estrías radiales en el centro y casi paralelas en los extremos 12-16/10 μm . Con el MEB se observa que la vista externa está compuesta por una doble hilera de estrías arregladas en puntos paralelos, en el

centro se observan 3 estrías aisladas irregulares en longitud. Área axial y central lisa (Fig. 1 d, e y f).

OBSERVACIONES. Dawson 1974 in Merino *et al.*(1994) indica que las especies que presentan estrías formadas por una doble hilera de puntos con o sin líneas longitudinales visibles en la valva, deben ser transferidas al género *Gomphoneis*. En contraste, Krammer y Lange-Bertalot (1986) consideran que las especies con estrías con una doble hilera de puntos sin líneas longitudinales deben permanecer en el género *Gomphonema*. En este trabajo se consideró este último criterio por lo que a la especie estudiada se le asignó el nombre de *Gomphonema olivaceum*.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. *Gomphonema olivaceum* es cosmopolita pero no es abundante en los trópicos. Se ha registrado en México central, Tlaxcala y en el Valle de Tehuacán. En otros países en Estados Unidos, Argentina, Polonia, Europa Central y la India (Novelo 1998). Es pláncónica y epilítica en ríos, arroyos, charcos, presas, lagos y lagunas. Se ha encontrado en ambientes oligotróficos y eutróficos, desde baja conductividad hasta ambientes salobres (Caljon 1983, Novelo 1998). En el área de estudio sólo se encontró en septiembre.

***Diploneis pseudovalis* Hustedt 1930**

Valva elíptica con terminaciones redondeadas de 10-24 μm de largo y de 7-11 μm de ancho. Área central amplia redondeada con el nódulo central bien evidente, área axial que se adelgaza hacia los polos. Canal longitudinal angosto, más amplio en el centro y delgado en el ápice. Estrías centrales 10-18/10 μm (Fig. 2 b).

OBSERVACIONES. Cantoral (1995) menciona que este género se puede distinguir por la hilera silíceo más o menos ancha en el eje apical que se bifurca por las ramas de la rafe y se

fusionan junto con el nódulo central formando una estructura en forma de H. Benson y Rushforth (1975) indican que *D. pseudovalis* es una especie que se distingue por la doble hilera de alvéolos que se disponen entre las costillas. En los ejemplares observados en este estudio no se pudieron definir con precisión estas características ya que fueron muy escasos y no se realizó la técnica de eliminación de materia orgánica. Las características de los ejemplares observados coincide en general con la descripción indicada por autores como Krammer y Lange-Bertalot (1991) y Novelo (1998).

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. *D. pseudovalis* se ha registrado en México central, Texcoco, Tehuacán, Puebla y en otros países como Estados Unidos, Europa central y Sudáfrica (Novelo 1998). Es una especie planctónica y bentónica que se desarrolla en ríos arroyos, canales, estanques y lagos. Se ha encontrado en ambientes de salinidad variable. Es una especie euritérmica y alcalífila (Novelo 1998). Benson y Rushforth (1975) la han encontrado en ensenadas y riachuelos del cañon Huntington Utah, U.S.A. pero nunca fue abundante. En el área de estudio sólo se observó en marzo.

***Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehrenberg) Grunow 1884**

= *Cocconeis euglypta* Ehrenberg 1854

Valvas elípticas, ampliamente redondeadas de 14-17 μ m de largo y de 8-11 μ m de ancho. Pseudorafe lineal estrecho, con el MEB las estrías son alargadas y forman hileras longitudinales, paralelas en el centro de la valva, llegando a curvarse radialmente hacia los polos 25-28/10 μ m (Fig. 1 a, b y c).

OBSERVACIONES. En las muestras estudiadas únicamente se encontraron valvas sin rafe, con estrías gruesas y alargadas.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. *Cooconeis placentula* var. *euglypta* se ha encontrado en Michoacán, México central Oaxaca, Tehuacán, Puebla y San Luis Potosí. En otros países se ha encontrado en Argentina, Estados Unidos, Europa central, Polonia, Holanda y África (Cantoral 1995 y Novelo 1998). Es una especie cosmopolita, común en ensenadas oligohalinas y mesohalinas, plantónica y principalmente bentónica, alcalífila, eutrófica y mesosapróbica (Caljon 1983, Cantoral 1995).

***Epithemia argus* (Ehrenberg) Kützing 1844**

= *Eunotia ocellata* Ehrenberg, *Eunotia argus* Ehrenberg, *Epithemia longicornis* (Ehrenberg) W. Smith, *Epithemia intermedia* Hilse, *Epithemia peisonis* Pantocsek.

Células solitarias de 25-55 μm de largo y 12-14 μm de ancho. En vista conectiva son rectangulares, en vista valvar son asimétricas, el margen dorsal es convexo y el ventral es cóncavo, extremos redondeados. Canal de la rafe marginal bien diferenciada, adentrado en la parte central de la valva formando una V invertida. Costillas con hileras de areolas, de 3-4 en cada costilla. Estrías con areolas de 9-11/10 μm (Fig. 1 g).

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Se ha encontrado en Hidalgo, México central y San Luis Potosí (Cantoral 1995). En otros países se ha registrado en Estados Unidos y Europa central (Cantoral 1995). Habita en aguas con pH entre 4.7-9.0. Tolera pequeñas concentraciones de sal. Especie característica de aguas limpias aunque también se le ha encontrado en aguas β -mesosaprobias (lowe 1974). En el área de estudio se encontró en abril y junio con densidades muy bajas.

***Surirella striatula* Turpin 1828**

Valvas ampliamente elíptica-ovales, heteropolares de 110-160 μm de largo y de 50-70 μm de ancho. En vista valvar se hace aparente el canal rafidiano en todo el contorno valvar. Superficie valvar ornamentada con costillas y estrías. Costillas bien diferenciadas de 4-7/100 μm . Estrías 10-12/10 μm . Área axial linear estrecha (Fig. 2 c).

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. *Surirella striatula* es común en ensenadas mesohalinas y poco frecuentes en ambientes oligohalinos. Principalmente bentónica pero también se le ha encontrado en el plancton de ambientes acuáticos eutróficos y mesosapróbicos (Caljon 1983). Maidana y Romero (1995) la registran para el lago hipersalino La Amarga, la Pampa, Argentina.

***Gomphosphaeria* cf. *lacustris* Chodat 1898**

Colonias esféricas o irregulares de 20-30 μm . Células esféricas arregladas en grupos de 4-8-16 células, de 2-4 μm de diámetro. Células rodeadas de una matriz gelatinosa incolora. Contenido celular homogéneo verde azul pálido (Fig. 2 d).

OBSERVACIONES. Las células de las colonias observadas presentaron un arreglo radial, situándose en la periferia de la colonia, los pedículos mucilaginosos que unen a las células no fueron evidentes.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Algunas veces es abundante en el fitoplancton. Prescott (1962) la encontró en ambientes de aguas duras en Michigan, Wis. Parra (1982) la registra para lagos y lagunas de Chile. *Gomphosphaeria lacustris* no se ha encontrado en otros ambientes acuáticos mexicanos por lo que es un nuevo registro para México.

***Pseudanabaena* sp.**

Tricomatos solitarios, sin vaina, formados por células cilíndricas con uno de sus extremos ligeramente agudo. Contenido celular homogéneo. Células de 3-4 μm de largo y de 2-3 μm de ancho (Fig. 2 e).

OBSERVACIONES. No se observaron suficientes tricomas por lo que no se pudo determinar la especie.

***Oscillatoria* sp.**

Filamentos solitarios rectos sin vaina visible al microscopio. Célula apical redondeada de 1.5-2.5 de largo y de 5-7 μm de ancho. Contenido celular granuloso, con ligeras constricciones en los septos (Fig. 2 f).

OBSERVACIONES. No se observaron suficientes filamentos por lo que no se pudo determinar la especie.

***Cryptomonas ovata* Ehrenberg 1838**

Células de contorno reniforme o elíptico, más ancha en la parte anterior que posterior que es punteada, de 12-15 μm de largo y de 3.6-5.5 μm de ancho. La depresión apical ancha y poco profunda. Célula con dos flagelos ligeramente desiguales en la parte terminal anterior que pueden alcanzar el largo celular, 1 o 2 plastos de color café y de posición parietal (Fig. 2 g).

OBSERVACIONES. Las células observadas son más pequeñas que las indicadas por Prescott (1962), Parra, *et al.* (1982) y Caljon (1983). Las otras características concuerdan con las descritas por estos autores para *Cryptomonas ovata*, por lo que se utilizó este nombre para designar a la especie encontrada en este trabajo.

ECOLOGÍA Y DISTRIBUCIÓN. Lugo (1993) registra a esta especie para los lagos cráter Quechulac, Atexcac y Aljojuca en el Estado de Puebla. Prescott (1962) la encuentra en lagos y estanques de Michigan, Wis. Caljon (1983) indica que es común en ensenadas oligohalinas y mesohalinas, planctónica.

FIGURA. 1

Cocconeis placentula var. *euglypta* (Ehrenberg) Grunow 1884

- a. Micrografía con MEB. Vista valvar con rafe. (Apéndice 1, pág. 125)
- b y c). Micrografía con MEB. Vista valvar mostrando el detalle de las estrías.

Gomphonema olivaceum (Hornemann) Brébisson 1838

- d. Micrografía con MEB. Vista valvar. (Apéndice 1, pág. 123).
- e. Micrografía con MEB. Vista conectiva.
- f. Micrografía con MEB. Vista valvar mostrando el detalle de las estrías.

Epithemia argus (Ehrenberg) Kützing 1844

- g. Micrografía de luz con contraste de fases. Vista valvar mostrando el detalle del rafe. 787X. (Apéndice 1, pág. 126).

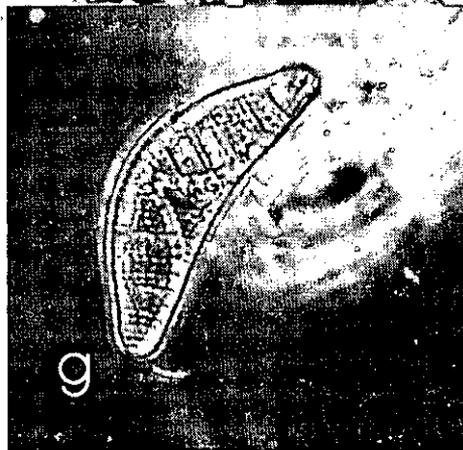
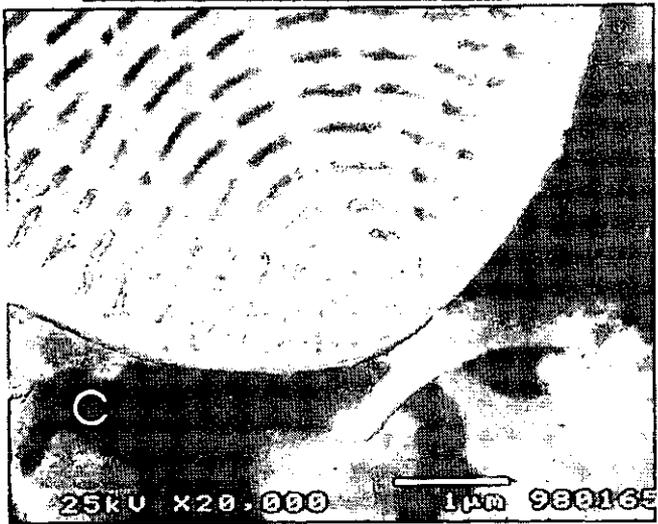
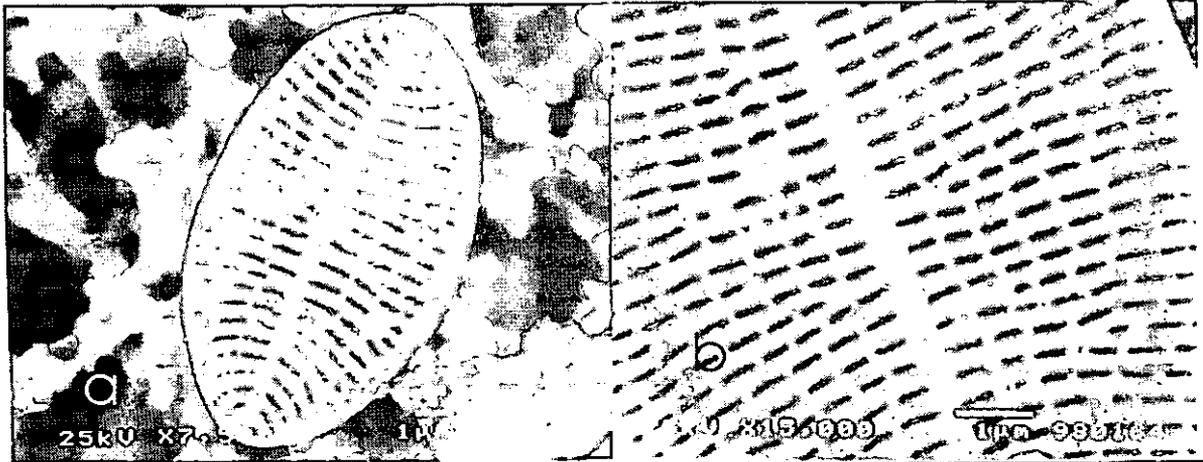


FIGURA 2.

Anomoeoneis sp.

- a. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Vista valvar. (Apéndice 1, pág. 123).

Diploneis pseudovalis Hustedt 1930

- b. Micrografía de luz con contraste de fases . Vista valvar mostrando el detalle de la célula. 800X, (Apéndice 1, pág. 124).

Surirella striatula Turpin 1828

- c. Micrografía de luz con contraste de fases . Vista valvar mostrando el detalle de la célula. 640X, (Apéndice 1, pág. 127).

Gomphosphaeria cf. *lacustris* Chodat 1898

- d. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Colonias mostrando el arreglo de sus células. (Apéndice 1, pág. 127).

Pseudanabaena sp.

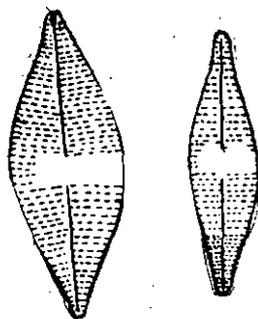
- e. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Tricomas mostrando la forma y contenido celular. (Apéndice 1, pág. 128).

Oscillatoria sp.

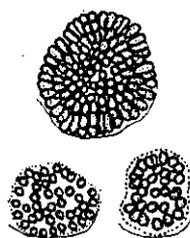
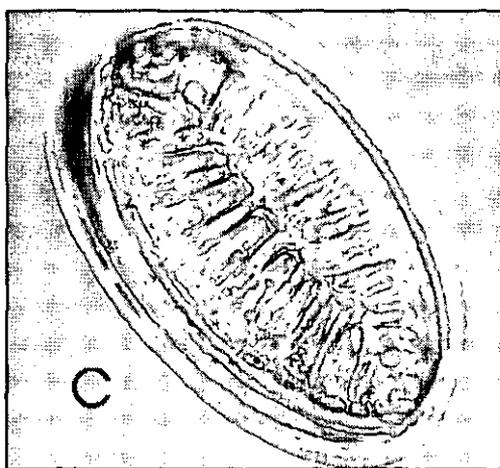
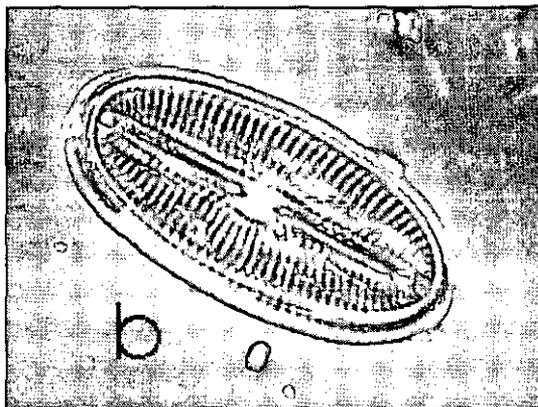
- f. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Tricomas mostrando la forma y contenido celular. (Apéndice 1, pág. 128).

Cryptomonas ovata Ehrenberg 1838

- g. Dibujo a escala (la línea a la derecha representa 10 μm). Células mostrando contenido y disposición de los flagelos. (Apéndice 1, pág. 128).



a



d



e



f



g