

00361

15

2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MODELO DESCRIPTIVO Y PREDICTIVO DE LA
PRODUCCION PRIMARIA DE UN CUERPO DE
AGUA DE ALTA MONTAÑA TROPICAL.

T E S I S

Que para obtener el Título de
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

presenta

REBECA GONZALEZ VILLELA

México, D. F.

1990

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

INDICE

Resumen	1
Introducción	3
Antecedentes	13
Area De Estudio	18
Material y Método	23
Modelo Descriptivo	
Coeficiente de Correlación Lineal	27
Correlación Múltiple y r^2	29
Modelo Predictivo	
Regresión Múltiple	30
Análisis de Residuos	32
Resultados y Discusión	
Modelo Descriptivo	
Variables Meteorológicas	34
Variables Químicas del agua	36
Variables Meteorológicas relacionadas con las Variables Físicas y Químicas	40
Variables Meteorológicas y Físicoquímicas relacionadas con la Clorofila <u>a</u>	43
Modelo Predictivo	
Regresión Múltiple	54
Prueba de F y Regresión Standar	55
Descomposición Jerárquica y Análisis de Varianza	56
Intervalos de Confianza	58
Supuestos de la Regresión	59
Conclusiones	62
Bibliografía	65

RESUMEN

Debido a la complejidad e importancia de los procesos productivos en los sistemas dulceacuícolas y a la escasez de estudios estadísticos de producción en lagos en México, el presente trabajo desarrolla el análisis de la variación anual de la producción fitoplanctónica de el Lago El Sol, del Volcán Nevado de Toluca a través de la concentración de Clorofila a y su relación con parámetros meteorológicos y fisicoquímicos del medio acuático, mismos que fueron agrupados en bloques o compartimentos y a los que se les aplicaron los procedimientos estadísticos de correlación simple y múltiple, así como el análisis de regresión con sus variaciones: Método - Standar y Método de Descomposición Jerárquica.

Las correlaciones obtenidas entre las variables meterológicas, fisicoquímicas y biológicas dieron lugar a la mayor parte del modelo descriptivo de el Lago El Sol y fueron significativas a $P \leq 0.05$, de las cuales destacan, las variables meteorológicas como principales responsables de las características fisicoquímicas de la masa de agua. La temperatura del - agua fue el factor clave en la adecuación del medio acuático en estudio.

En el modelo de regresión elegido los nutrimentos fueron los factores determinantes de la dinámica de la Clorofila a en el Lago El Sol; en específico el amonio, puesto que explicó un 66.8% de la varianza total, así como el máximo valor en el coeficiente de regresión. El modelo obtenido fue calificado como altamente significativo ($r = 0.99$), que en sistemas muy variables y de interacción (abiótico-abiótico, abiótico-biótico, biótico-biótico) es muy aceptable.

Los análisis efectuados señalan que los estudios de producción fitoplanctónica en los sistemas acuáticos mediante modelos, son una herramienta útil para el conocimiento y comprensión de la información que contienen los datos de campo, así como para la posible planeación de los recursos limnéticos; sin embargo hay que tener en cuenta que éstos son simples y precisos en comparación con el comportamiento del ecosistema, por lo mismo el análisis de las variables en los modelos sólo pueden ser aplicables al lago en el tiempo y situación en el que se llevó a cabo el trabajo.

INTRODUCCION

El fitoplancton y su productividad son muy heterogéneos en los sistemas acuáticos, debido a las variaciones temporales de algunos factores físicos y químicos del medio, que pueden manifestarse como oscilaciones a diferentes frecuencias (anuales, estacionales, diurnas, etc.), que producen cambios cualitativos en la masa de agua, por lo que son complejos y conducen al aumento de la diversidad del cuerpo de agua (Powell, et, al., 1975).

La interacción entre las variaciones físicas y químicas del ambiente acuático y las respuestas fisiológicas del fitoplancton, es una consideración importante en el proceso de evaluación de la producción primaria de las diferentes capas de agua. Por lo mismo, un buen número de estudios sobre las variaciones cualitativas del agua, son apoyados en análisis cuantitativos estadísticos, que conducen a un mayor entendimiento de los procesos productivos en los sistemas lacustres (George, 1981).

Para la mejor comprensión del funcionamiento de los ecosistemas de agua dulce, en donde el fitoplancton y sus actividades metabólicas son consideradas como un factor fundamental, es importante contar con la información de los patrones -

de distribución del fitoplancton y con el conocimiento de las escalas de heterogeneidad temporal y espacial en éstos sistemas. Al respecto, se ha observado que la distribución vertical de la Clorofila en la columna de agua, puede ser explicada por la interacción entre los factores hidrológicos, el crecimiento y/o adaptación fisiológica del fitoplancton.

Los gradientes verticales en la composición física de los cuerpos de agua continentales, son a su vez influenciados por la migración y acumulación de las poblaciones del fitoplancton, ya que en los sitios donde los organismos encuentran alta concentración local de nutrimentos, las tasas transitorias de asimilación son mayores. Este proceso le permite al fitoplancton crecer mas rápidamente que en medios donde la concentración de nutrimentos es homogénea (George y Heaney, 1978; Theriault y Platt, 1981; Cullen, 1982).

La segregación abiótica vertical del espacio limnético, también contribuye a la heterogeneidad del medio acuático. Heaney (1976) observó en South Basin of Windermere (Inglaterra) que la estratificación térmica produjo la diferenciación física de las capas de agua provocando una distribución vertical - discontinua de los organismos fitoplanctónicos. Por otro lado, Radach (1982) observó en el mar del norte que la influencia de los factores dinámicos del agua (surgencias, advección, ve-

locidad del viento y corrientes), modificaron la posición de los productores en la columna de agua.

La heterogeneidad ambiental es un factor críticamente importante en la dinámica de las comunidades y en la regulación de las poblaciones (Powell, et. al., 1976), y - junto con la segregación vertical del espacio limnético contribuye a la distribución azarosa del fitoplancton y su productividad, provocando la concentración local de nutrientes donde la abundancia y producción del fitoplancton son mayores. Dicha estructura es una consecuencia inevitable del ambiente fluctuante, y puede llegar a definirse mediante una función lineal; por lo tanto la variabilidad y predictibilidad de la población pueden ser potencialmente atribuibles a su dinámica y a la del ambiente (Roughgarden, 1979).

A gran escala, se ha observado que existen mayores varianzas en la distribución de la clorofila a, que en la de algunas variables físicas y químicas en los lagos, como por ejemplo la velocidad de las corrientes, situación que muestra a los procesos productivos como uno de los factores que contribuye significativamente a la varianza observada en los datos de campo (Powell, et. al., 1975)

En el empleo de los análisis estadísticos en el estudio de la producción primaria (estimada a través de clorofila a), es importante tener un conocimiento previo del comportamiento de las variables acuáticas y de como deben ser traducidas en los modelos de ecosistemas. Radach (1982) menciona como requerimiento mínimo para la elaboración de un modelo dinámico de producción primaria, la incorporación de aquellos datos que proporcionan información sobre los sistemas acuáticos.

La justificación de la utilización de todas las fuentes de información que sean cuantificables en la naturaleza, es que se adquiere un criterio más amplio, que redunde en el menor costo y mayor beneficio en la toma de decisiones, así como en una mejor comprensión de los sistemas lacustres.

No obstante, es un problema el que muchos modelos físicos de lagos muestren un grado de complejidad relativamente alto por el tipo de relaciones existentes en los parámetros físicos, químicos y biológicos en éstos. Sin embargo, es necesario encontrar y explicar estas relaciones entre las variables - tanto meteorológicas como hidrológicas, puesto que la influencia antropogénica incontenible en los sistemas limnéticos, tales como la descarga de desechos orgánicos e inorgánicos

la contaminación térmica de las plantas industriales y nucleares, así como los cambios en las corrientes de los ríos (al alterar sus cursos), hacen que estos cuerpos de agua se deterioren, situaciones que fueron observadas por Imboden y Gatch (1980) en un estudio efectuado en 62 lagos de América y Europa.

Hay que tomar en cuenta también, que cualquier estudio ecológico es modificado por los errores metodológicos y de análisis. Sin embargo, la varianza que se obtiene a partir del muestreo es en muchos de los casos una función de la distribución espacial de los organismos, y esto se observa en mayor grado cuando se encuentran mas dispersos; esto es, cuando la varianza entre las muestras es más grande que el promedio, lo cual se debe a que los fitoplanctontes generalmente se distribuyen mediante concentraciones locales (manchones) y las estimaciones cuantitativas de la heterogeneidad son prácticamente desconocidas (Platt, et. al., 1970).

George (1981) y Radach (1982) señalan que en la planeación de estrategias para el muestreo es muy importante distinguir entre las fuentes de variación que son constantes en el tiempo (los efluentes, las descargas, etc.) y las fuentes de variación que son transitorias y ocurren localmente; pues encontraron que las concentraciones locales de fitoplancton

pueden llegar a ser un factor importante, puesto que muchas veces dificulta el análisis de las muestras, aspecto que puede ser resuelto mediante la definición y comprensión de los factores físicos y meteorológicos del sistema.

La heterogeneidad espacial y temporal del plancton - puede ser resuelta por medio de la cuidadosa cuantificación, así como por el análisis de varianza. El interés por el estudio de la heterogeneidad espacial ha dado como resultado el desarrollo de modelos de producción, sin embargo existe un problema con las ecuaciones donde se incluye al tiempo, puesto que estos no poseen estabilidad y el número de parámetros del modelo puede llegar a exceder el número de puntos muestreados (Horwood, 1978).

Sin embargo, el estudio de los procesos productivos en los lagos se presta para efectuar análisis estadísticos formales - que pueden ser extrapolables en cierta medida a otros sistemas acuáticos. En la actualidad existen pocos estudios acerca de los mecanismos de estratificación, excreción, producción y remineralización en lagos y las implicaciones ecológicas de las variaciones espaciales a pequeña y gran escala en tales procesos ha sido objeto de muchas controversias en ecología acuática.

Debido a la complejidad en los procesos de producción fito planctónica en los lagos, se justifica la utilización del análisis compartamental y de herramientas estadísticas en el estudio de la producción de los cuerpos de agua dulce, tales como el análisis de interrelación entre variables, que se realiza por medio de la combinación de modelos estadísticos de correlación simple y múltiple. Estos modelos identifican las asociaciones más relevantes entre las variables, de tal modo que pueden llegar a definirse los parámetros más importantes en los procesos productivos.

Esto conduce al análisis compartamental y descriptivo del sistema, al determinarse el tipo y grado de relación entre las variables (Jeffers, 1978). Consecuentemente, el análisis de regresión múltiple puede ser empleado para la elaboración de un modelo que permita predecir o simular la producción primaria a través de un subconjunto de variables elegidas bajo un criterio jerarquizante en la ecuación lineal óptima. Este análisis, en particular, es útil en la descripción del tipo de relación entre los parámetros seleccionados.

La importancia en el uso y solución de ecuaciones para el modelaje radica principalmente en la descripción concisa

que se obtiene del sistema en estudio, además de que mediante estos pueden efectuarse comparaciones y predicciones útiles para la planeación y manejo de recursos; otra de las ventajas es que permite el estudio de las variaciones de los parámetros y de sus posibles trayectorias cuando se cambia el valor de alguno de ellos durante el año, de esta forma, se obtiene mayor información sobre los factores en los periodos en los cuales las variaciones son más altas o cuando las mediciones son más significativas,

Para este tipo de estudios se requiere que el comportamiento del modelo vaya de acuerdo con el conocimiento experimental y teórico del ecólogo, puesto que la estimación cuantitativa de los parámetros es necesaria para adaptar el modelo a la situación particular de los lagos. El análisis detallado de los modelos ha sido una herramienta útil en la planeación, adquisición y comprensión de la información que contienen los datos de campo (Gentil, 1982).

En muchos casos, los modelos lineales son utilizados por su relativa simplicidad y por la teoría que se desarrolla a su alrededor para su tratamiento. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los modelos son simples y precisos en comparación con el comportamiento de los ecosistemas, ya que

su determinación se basa únicamente en la cantidad de variables exógenas y endógenas del proceso estudiado que se pueden medir, dejando muchas veces fuera factores importantes (Wroblewsky y O'Brien, 1976 y Beghelli 1982).

La identificación de las variables es importante en la elaboración de los modelos adecuados a la realidad, ya que estos pueden ser utilizados posteriormente para predecir la respuesta de algún parámetro en el sistema. Sin embargo, es importante hacer notar que no todos los procedimientos estadísticos disponibles son suficientemente adecuados para ser utilizados en un sistema real, algunos requieren de modificaciones o de suposiciones restrictivas al proceso inicial.

En este sentido dada la complejidad de los procesos de producción primaria en los sistemas dulceacuícolas y a la escasez de estudios estadísticos de producción en lagos en México, el presente trabajo se limita al análisis de la variación anual de la producción fitoplanctónica del lago El Sol, del Volcán Nevado de Toluca, a través de la concentración de Clo ro fi la a y su relación con los parámetros meteorológicos y fisicoquímicos del medio acuático, siguiendo los lineamien-

tos metodológicos generales del Análisis de Sistemas Complejos (Von Bertalanffy, 1969).

ANTECEDENTES

El desarrollo y aplicación de modelos, así como - los estudios ecológicos en general sobre producción fitoplanctónica, han tenido poco impulso en México no obstante la expansión que ha experimentado la demanda de agua para su uso urbano, agrícola e industrial, a pesar de su distribución restringida (el 60% de la superficie territorial presenta clima árido), por la introducción y desarrollo de técnicas de acuicultura y de su importancia en el - ecosistema como factor vital, el agua no es un recurso ilimitado y por lo tanto se requiere del uso racional y de los subrecursos asociados (Banderas, 1988).

Los modelos elaborados por Brilinsky y Mann (1973), se han realizado generalmente en países de climas templados, donde la dinámica de producción fitoplanctónica es analizada utilizando los factores meteorológicos y fisicoquímicos del medio y su descripción se basa en los análisis compartamental y estadístico con un enfoque sistémico. Esto hace necesaria la revisión adecuada de dichos modelos antes de aplicarlos a las regiones tropicales, puesto que existen diferencias notables en cuanto al comportamiento térmico, biogeoquímico, así como en los procesos sucesionales de las comunidades acuáticas relacionadas con la evolución trófica de los

cuerpos de agua de ambas regiones, condiciones que se encuentran estrechamente relacionados con la temperatura del agua, a su vez con el grado de insolación latitudinal o fotoperiodo (Banderas, 1988).

En México, son escasos los cuerpos de agua que han sido estudiados con apoyo estadístico para fines de modelaje, predicción y simulación. Dentro de este tipo se cuenta con el trabajo de De La Lanza (1981), modelo realizado en sistemas estuarinos con un enfoque geoquímico de los sedimentos, donde se define el comportamiento espacio-temporal de la materia orgánica de los sedimentos y su relación con indicadores de la condición diagenética de la fase sedimentaria de la Laguna Huizache-Caimanero, mediante el análisis de regresión.

González (1985) define la productividad de tres lagunas costeras de Guerrero, tomando como base a las variables fisicoquímicas y ambientales.

Arredondo, et. al., (1982 y 1984) y Ponce y Arredondo (1986) aplicaron diversos modelos descriptivos, así como el análisis multivariado en varios sistemas lacustres y embalses temporales, utilizando variables fisicoquímicas para su caracterización.

Otros aspectos de acuicultura son tratados también por Arredondo (1987), quién define la calidad de tres tipos de fertilizantes empleados en acuicultura aplicando los análisis estadísticos de varianza y discriminantes.

La aplicación de la estadística descriptiva combina da con el método de Análisis Exploratorio de datos, así como la aplicación de análisis de cúmulos, fue realizado por Banderas (1988) con datos biológicos para definir unidades de carácter morfométrico en poblaciones algales que no presentaron estructuras de valor taxonómico específico, con el objetivo de diferenciar morfoespecies con requerimientos ambientales particulares y esclarecer la existencia de unidades vegetacionales (asociaciones) para delimitar diferentes hábitats bentónicos.

Otro estudio con enfoque sitémico es el de Jurado (1989), quien aplicó técnicas estadísticas de correlación y regresión a las variables químicas en los sedimentos; materia orgánica, carbohidratos, ortofosfatos, ácido fúlvico, amonio, fierro, magnesio, manganeso, potasio, D.Q.O. y geo granulométricas: arena, arcilla, grava, limos y humedad, para el desarrollo de modelos predictivos de la materia or-

gánica en los sedimentos de la laguna Huizache-Caimanero así como la comparación de técnicas estadísticas empleadas.

La carencia de trabajos con un enfoque descriptivo y predictivo de los procesos de producción primaria en los lagos como el de El Sol, Edo, de México, motivó la estructuración del presente estudio tomando como base la información de campo obtenida por Banderas (1984) y González(1984) y que contempla los siguientes objetivos:

1) Agrupar en bloques o compartimentos los datos meteorológicos, fisicoquímicos y de producción primaria del lago El Sol, y buscar relaciones entre ellos a través del análisis de Correlación de Pearson, Correlación Múltiple y r^2 .

2) Estimar a partir de éstos análisis la posibilidad de obtener el modelo descriptivo del lago a través de las relaciones mas importantes entre las variables analizadas (Correlación lineal, Correlación múltiple, Regresión Simple y Múltiple).

3) Establecer mediante el análisis de regresión múltiple el tipo y grado de relación entre las variables y la producción primaria (a través de la concentración de Clorofila a), esclareciendo la forma y dependencia con respecto a

las variables meteorológicas (nubosidad, precipitación pluvial, temperatura mínima, media y máxima del aire) y físico químicas (temperatura del agua, conductividad, pH, bióxido de carbono, oxígeno, amonio, nitratos, nitritos, fosfatos, sulfatos) a través de los coeficientes de regresión, mismos que se utilizarán para complementar el modelo descriptivo del lago.

4) Obtener el modelo predictivo del lago al analizar las ecuaciones obtenidas mediante los métodos de regresión Standard y de Descomposición Jerárquica, eligiendo el modelo que describa óptimamente las variaciones de la producción primaria en el lago El Sol durante el periodo de estudio comprendido de mayo de 1982 a abril de 1983.

AREA DE ESTUDIO

El lago El Sol se ubica en el Volcán Nevado de Toluca al SO de la ciudad de Toluca. Este ha sido estudiado desde el siglo pasado, principalmente desde el punto de vista geológico. Este es un pequeño lago cráter de origen volcánico erosivo combinado cuya antigüedad se remonta hasta épocas posteriores a la última glaciación del Pleistoceno, cuando el volcán Nevado de Toluca experimentó su postre y más violenta erupción (Blommfield y Valastro, 1974). El volcán está emplazado en la Sierra Volcánica Transversal o Eje Volcánico y sus coordenadas geográficas son $19^{\circ} 45' W$ y $19^{\circ} 06' N$ (Fig. 1); se encuentra dividido en dos partes por la presencia de un domo basáltico central que taponaa la chimenea del cráter.

El lago se localiza junto al domo en su lado O-NO, su superficie se ubica a 4170 m de altitud, con una profundidad máxima de 15 m al inicio del periodo de estudio y de 13 m al final (mayo de 1982 - abril de 1983). La zona del cráter se localiza por arriba del límite boscoso en la zona claramente alpina o de páramo de altura. La vegetación alrededor del lago se encuentra dominada por líquenes, musgos, gramíneas y compuestas (Villalpando, 1968).

Area233,819 m²
 Volúmen1,589,721 m³
 Longitud máxima ...795.1 m SSE-NNE
 Ancho máximo482.4 m
 Ancho medio298.5 m
 Perímetro o margen
 lagunar3.68 Km

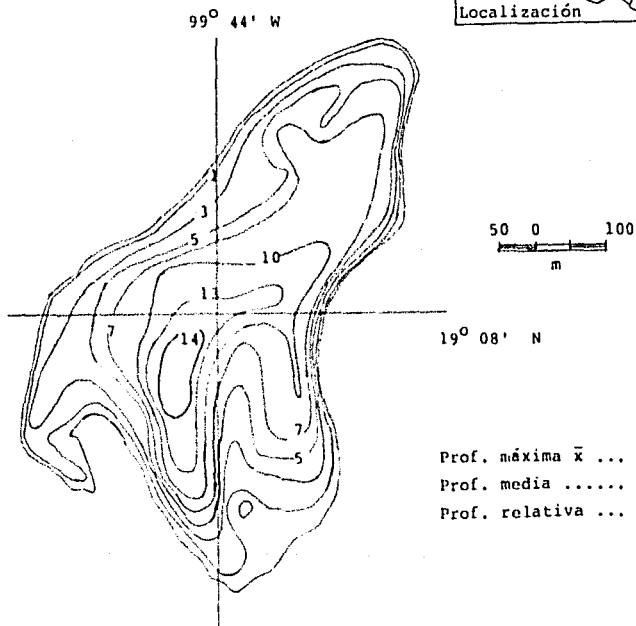


Fig. 1 Características morfométricas del lago El Sol.

El Sol desde el punto de vista geográfico ubicado por arriba del límite boscoso, se define como lago de alta montaña y como lago cráter según aspectos geomorfológicos. Aunque en los lagos cráter como lo es El Sol, el suministro de energía solar es menor por las mayores pérdidas de reflexión de radiación de onda larga al espacio exterior por la altitud a la que se encuentra, además de que los alrededores elevados (montañas) pueden excluir una cantidad considerable de radiación directa y que las bajas temperaturas hacen descender el metabolismo del fitoplancton, es de mucho mayor importancia el aporte de nutrientes, puesto que el área de drenaje usualmente esta limitada y la precipitación por lo tanto llega a ser muy importante (González, 1984; Fig. 2).

El clima del cráter es de tipo E(T)C Hwi; o sea, - durante el periodo de estudio la temperatura media del aire fue de 4° C, con cielo medio nublado, fuertes vientos e insolación alta en los días despejados debido al menor espesor de la atmósfera, lo que genera grandes diferencias de temperatura en el lapso de 24 horas (hasta de 20° C entre el día y la noche). La máxima y mínima temperatura del aire se presenta durante los meses de mayo y enero respectivamente.

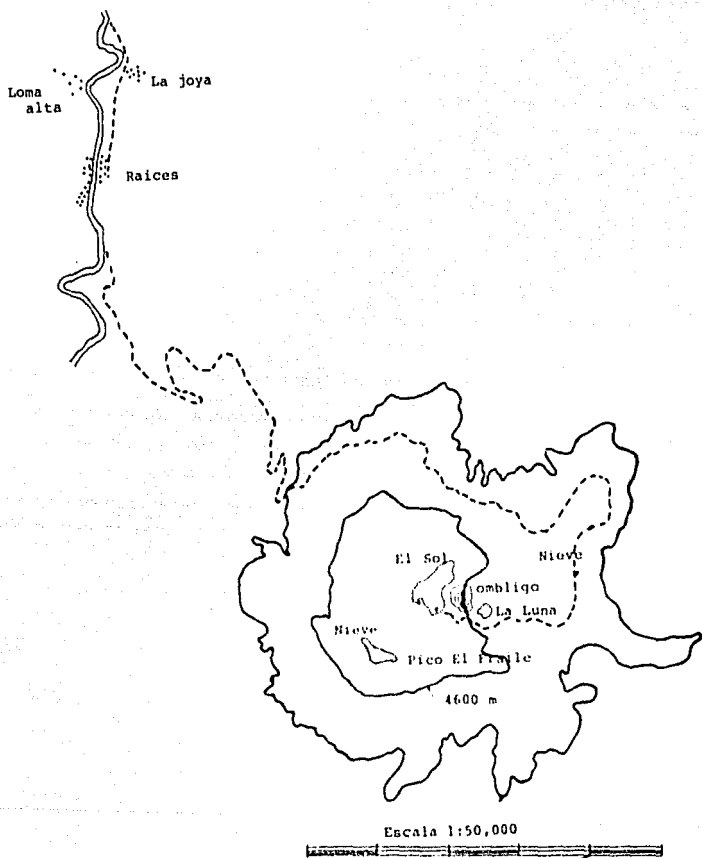


Fig. 2 Volcán Nevado de Toluca

La precipitación media anual es de 1,1000 mm de la cual no mas del 10% se registra en invierno (Banderas, 1984).

En Términos absolutos el lago puede considerarse somero, pero su profundidad relativa de 2.37% representa según Alcocer (1980) basado en Wetzel (1975) a un lago - profundo. Conclusión apoyada por Banderas (1988) quién hizo una comparación del balance de calor anual del lago con otros similares de lagos ubicados en zonas templadas.

Un aspecto termodinámico interesanate señalado por Banderas (1988) en base a los perfiles de temperatura del lago, es que debido al viento, la baja temperatura del aire y la alta insolación en el lago, se presentan durante el día masas recurrentes de agua con mayor temperatura cerca del fondo y no en la superficie como sería de esperarse. Durante la noche la masa de agua se desplaza hacia la superficie y junto con el viento mantienen un mezclado continuo del cuerpo de agua, por lo que teóricamente el lago es de circulación continua.

El porcentaje de atenuación de la radiación en el - perfil vertical coincide con la calculada por Reid y Wood (1976) para aguas anormalmente claras, en base a esto el 1%

de la radiación total incidente sobre la superficie del agua se alcanzaría a los 22.75 m si esa fuera la profundidad del lago, por lo tanto puede considerarse la existencia de la zona fótica de la superficie al fondo.

Acorde con la Figura 1, a los 14 m alcanza a llegar mas del 5% de la luz que ingresa a través de la superficie. Según este resultado, la disminución en la intensidad luminosa no representa un factor limitante para los productores primarios y por lo mismo en el lago se desarrolla una comunidad fitobentónica (Banderas, 1988).

Por las características físicoquímicas del agua, la alta transparencia, las bajas tasas de fotosíntesis y el bajo contenido de Clorofila a en el lago, así como la presencia de un sólo pico de crecimiento fitoplanctónico, colocan a El Sol dentro de los cuerpos de agua oligotróficos (Banderas, 1984 y González, 1984); características similares han sido registradas en los lagos volcánicos de alta montaña de Ecuador (Steinitz-Kannan, et. al., 1983), los Alpes Italianos (Mosello, 1984), y Estados Unidos de América (Tilzer, 1973).

En El Sol se determinaron en el periodo 1982-1983 grandes variaciones en el contenido de Clorofila a, en el sentido vertical y horizontal, tanto que en algunas ocasiones se obtuvieron coeficientes de variación del 200%

MATERIAL Y METODO

Obedeciendo a las características del lago como orientación, forma del perímetro lacustre y profundidad se establecieron siete estaciones de muestreo, cada estación contó con uno a tres subniveles de registro. La localización estratificada y parcialmente aleatorizada de las estaciones obedece a la intención de obtener muestras de una misma profundidad pero diferentes características de orientación, localización, situación fisicoquímica del agua con fines comparativos en lo referente a cantidad de producción por el fitoplancton tanto en el perfil vertical como en el horizontal (Fig. 3).

De esta manera, en cada nivel de profundidad del lago, se tuvieron una cantidad diferente de estaciones o estratos siendo mayor en la superficie (2.5 m) y menor - conforme aumenta la profundidad. La distribución se estableció considerando que el volumen del lago va disminuyendo con la profundidad a consecuencia de las características morfométricas de la cuenca (Banderas, 1988). La figura 3 muestra la cantidad y ubicación de las estaciones en relación a la profundidad mediante pequeñas barras horizontales en los diferentes cortes longitudinales donde se

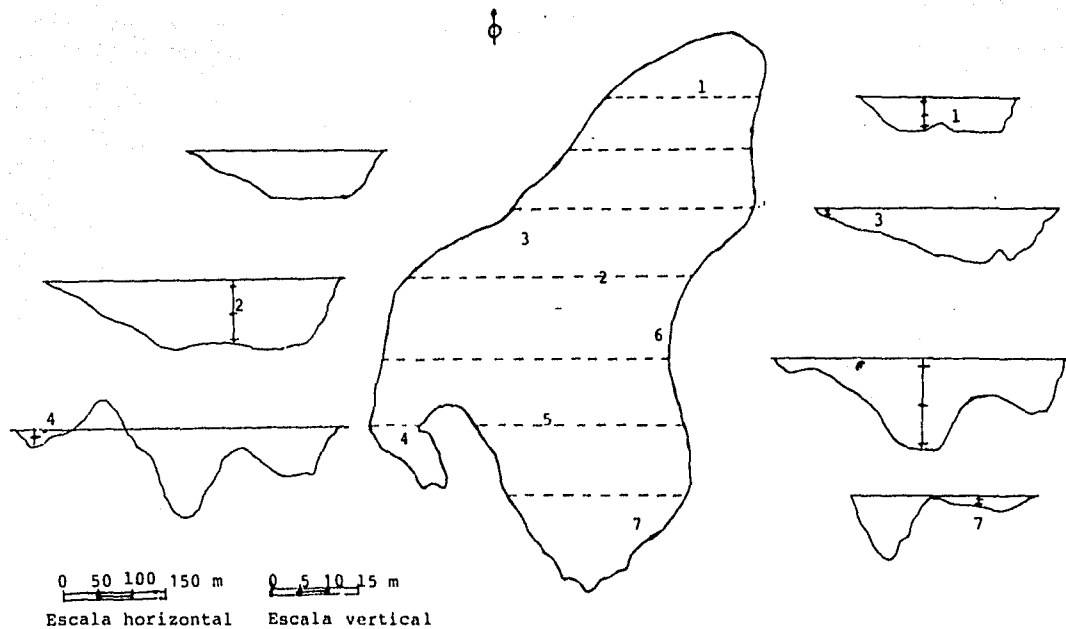


Fig. 3 Perfiles batimétricos del lago El Sol y localización de las estaciones.

muestra el perfil del lago a diferentes distancias.

El diseño antes descrito, pretende reducir el trabajo al mínimo, para obtener la máxima representatividad y evitar imágenes sesgadas de la producción por la falta de balance en el muestreo, diseño que debe sujetarse a posteriores comprobaciones en las que se debe de buscar el valor óptimo de la relación entre la cantidad de puntos muestrados de cada nivel de profundidad y el área susceptible de ser muestreada.

El periodo de estudio consistió en visitas mensuales durante un año (de mayo de 1982 a abril de 1983) con excepción de los meses de diciembre, enero y febrero debido a las condiciones meteorológicas adversas. Se calcularon los promedios mensuales de los datos meteorológicos, físico químicos y de producción primaria que se utilizaron para el análisis mediante los métodos de Correlación Simple y Múltiple, así como Análisis de Varianza y Regresión del paquete estadístico SPSS (Statistical Package For Social Sciences) contenido en la computadora Bourroghs B7800 del Servicio de Computo Académico de la UNAM (Apéndice A).

Los datos meteorológicos se obtuvieron de los registros

tros obtenidos por la estación Nevado de Toluca ubicada - por fuera del cráter del volcán a cargo de la Secretaría De Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Se calcu laron los promedios semanales previos e incluyendo los - días de muestreo de la precipitación pluvial (mm), tempe- ratura media, mínima y máxima del aire ($^{\circ}$ C, medidas con - un termómetro de máximas y mínimas), nubosidad (%) obtenida de las observaciones efectuadas durante el muestreo (Ta- bla 1).

A pesar de que la radiación es un factor primordial en la producción fitoplanctónica, no fue posible obtener medidas de radiación solar incidente durante el periodo de estudio.

Para la obtención de las muestras de agua y de produc- ción primaria se procedió a localizar el punto de muestreo - apeándose a los transectos descritos en las figura 1 y 3. Con una botella tipo Van Dorn de tres litros de capacidad se extrajo agua de la profundidad deseada. Esta muestra fue depositada en botellas de 1 litro midiéndose la temperatura y posteriormente colocándolas en hieleras. En éstas con-

Tabla 1. Registros Promedio Mensual de las Variables Meteorológicas, Fisicoquímicas

MES	NUB. (%)	PREC. (mm)	T.Min. (°C)	T.Med. (°C)	T.Max (°C)	COND (mm/3)	pH	CO ₂ (mg/l)	O ₂ (mg/l)	NH ₄	NO ₃	NO ₂ (ug-at/l)	PC ₄	y BIOLOGICAS		
														NO ₄	Cl _a (mg/m ³)	
mayo (82)	75	7.15	2.13	4.06	7.75	11.48	7.12	2.54	8.19	+	0.315	0.092	0.102	2.70	0.364	5:1
junio	75	3.37	1.83	4.25	11.58	19.26	7.41	1.67	7.47	0.102	0.440	0.040	0.300	4.26	0.840	2:1
julio	75	4.80	1.56	2.63	7.75	0	7.57	2.09	7.61	0.515	0.640	0.002	0.139	6.30	0.569	8:1
agost	12.5	7.50	0.79	3.14	9.07	23.93	7.29	1.20	7.78	0.558	1.218	:	0.075	4.99	2.432	24:1
sept	50	5.61	0.63	2.50	7.00	24.29	6.81	1.14	6.15	0.611	1.457	+	0.148	5.00	0.849	14:1
oct	0	1.88	-0.69	1.38	8.56	16.77	6.93	0.84	6.20	0.369	0.381	..	0.356	3.50	1.339	13:1
nov.	25	0	-0.81	2.56	8.00	20.00	6.35	0.98	6.77	0.405	0.569	+	+	+	0.971	1:+
dic.	50	1.57	-2.40	0.50	5.29	18.00	7.16	0.80	7.38	1.220	0.464	..	0.130	5.23	-	13:1
marzo (83)	0	0	-0.90	4.38	8.00	20.00	7.07	0.91	7.41	0.517	0.716	+	0.103	5.44	1.921	12:1
abril	0	0	0	7.59	12.87	20.00	6.41	0.75	6.63	+	0.460	0.042	0.240	5.54	1.204	2:1

+ NO DETECTABLE

diciones se trasladaron al laboratorio para el examen físico-químico del agua que consistió en la medición de la conductividad (μs), dureza (mg/l), bióxido de carbono (mg/l), - oxígeno (mg/l), amonio ($\mu\text{g-at/l}$), nitratos ($\mu\text{g-at/l}$), nitritos ($\mu\text{g-at/l}$), fosfatos ($\mu\text{g-at/l}$), sulfatos ($\mu\text{g-at/l}$) y pH (Banderas, 1984); concentración de Clorofila a (mg/m^3) según metodologías del American Public Health Association, - A.P.H.A. (1976), Strickland y Parsons (1968) y Wetzel y Likens (1979).

Los datos de producción primaria fueron obtenidos de una muestra de agua de cada uno de los niveles señalados en la figura 3, que fueron sometidas a filtración por vacío con el propósito de concentrar el fitoplancton en una membrana. Después se disolvieron los filtros en solventes orgánicos - (acetona alcalina al 90%) siguiendo la metodología de Wetzel y Likens (1979) para extraer los pigmentos clorofílicos.

La Clorofila a es el pigmento generalmente mas abundante y por el cual se lleva a cabo la transformación de energía radiante en energía química por los vegetales y es ampliamente utilizada para estimar la biomasa algal. Las concentraciones de clorofila fueron expresadas en mg/m^3 , según el méto-

do tricromático.

Para describir la dinámica productiva con respecto a las variables meteorológicas y fisicoquímicas, así como para disponer los datos debidamente para el estudio computacional, se agruparon los resultados en los siguientes - compartimentos:

- 1) Meteorológicos
- 2) Fisicoquímicos
- 3) Biológicos (producción primaria a través de la concentración de Clorofila a).

Los dos primeros compartimentos a su vez fueron divididos en subcompartimentos conteniendo los parámetros enlistados en la Tabla 2.

Para la identificación y comprobación de las posibles relaciones entre estos compartimentos se estimaron las siguientes pruebas estadísticas.

MODELO DESCRIPTIVO

COEFICIENTE DE CORRELACION DE PEARSON.

- 1) Con el propósito de determinar el grado de asociación

TABLA 2. AGRUPACION DE LAS VARIABLES EN COMPARTIMENTOS

METEOROLOGICAS	FISICOQUIMICAS	BIOLOGICAS
<p>COBERTURA NUBOSA</p> <p>PRECIPITACION PLUVIAL</p> <p>TEMPERATURA MINIMA DEL AIRE.</p> <p>TEMPERATURA MEDIA DEL AIRE.</p> <p>TEMPERATURA MAXIMA DEL AIRE.</p>	<p>TEMPERATURA DEL AGUA</p> <p>CONDUCTIVIDAD</p> <p>BIOXIDO DE CARBONO</p> <p>OXIGENO</p> <p>pH</p> <p>AMONIO</p> <p>NITRATOS</p> <p>NITRITOS</p> <p>FOSFATOS</p> <p>SULFATOS</p>	<p>CONCENTRACION DE CLOROFILA <u>A</u>.</p>

ción y tipo de relación (directa o indirecta) entre las variables meteorológicas, fisicoquímicas y biológicas, y; 2) para obtener información sobre los factores de importancia relevante en los procesos productivos. Estos puntos condujeron a la estimación y prueba de una parte del modelo descriptivo del lago.

El coeficiente de correlación es una medida del grado de estrechez de la relación lineal entre dos variables. Es necesario mencionar que r es un número sin unidades o dimensiones, ya que la escala de su numerador y la de su denominador son ambas el producto de las escalas en que miden X y Y ; r siempre cae entre -1 y $+1$. Los valores positivos de r indican una tendencia de aumento de X y Y conjuntamente (pendiente positiva) y cuando r es negativa, entonces grandes valores de X están asociados con pequeños valores de Y (pendiente negativa).

Si la concentración de puntos en una gráfica sigue una forma elíptica degenerada concentrándose los datos cerca del eje de la elipse, indica una alta correlación. En este análisis sólo fueron tomados en cuenta aquellos coeficientes (o relaciones) significativas ($P \leq 0.05$) entre las variables,

bajo la hipótesis nula de que $r = 0$ (Snedecor y Cochran, 1967).

ANALISIS DE CORRELACION MULTIPLE Y R^2 .

Se utilizaron para determinar la influencia de las variables independientes sobre la Clorofila a con respecto a la varianza explicada por el modelo de regresión, así como para obtener el porcentaje de la variación con la que contribuyeron las variables independientes a la determinación del modelo.

En el coeficiente de correlación múltiple, como en casos donde sólo se cuenta con una sola variable independiente, la variación total o suma de cuadrados en Y (Clorofila a), puede ser dividida en dos componentes independientes, uno que es explicado por la regresión y otro que es explicado por la variación residual, y se supone con la descomposición que: 1) la variación residual será minimizada cuando se efectúe la predicción al usar la ecuación de regresión, y: 2) que los valores de Y' y los residuales ($Y - Y'$) son mutuamente independientes.

La proporción de la varianza de Y explicada por la

suma de cuadrados del coeficiente de correlación múltiple y la bondad del ajuste en la ecuación de regresión, pueden ser evaluados al examinar la r^2 .

La similitud entre el coeficiente de correlación lineal simple y el de correlación múltiple, es que puede ser visto como que la r múltiple, es una simple r entre (Y) y (Y') , porque la Y' (predicha) puede ser tomada como que una sola variable independiente construye la ecuación de regresión.

MODELO PREDICTIVO

ANALISIS DE REGRESION MULTIPLE

Los procedimientos de regresión, por sí mismos, pueden ser categorizados como estadísticos descriptivos. Sin embargo los análisis de regresión son comunmente utilizados con datos con los que se desea efectuar una generalización sobre una población en estudio, o sea, estimar los parámetros poblacionales de la muestra a través del análisis de regresión. En este trabajo la regresión utilizada consistió:

1) el método de regresión standar, y; 2) el método de descomposición jerárquica. Estos análisis proporcionaron parte del modelo descriptivo del lago a través de los coeficientes de regresión, al ordenar jerárquicamente la importancia de las variables seleccionadas en la determinación de los procesos productivos, así como la obtención del modelo matemático o de predicción de la Clorofila a, mediante el plano de regresión poblacional siguiente:

$$Y_r = \alpha + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n + E_i$$

Donde: Y_r representa el valor promedio de la distribución de frecuencias para una X_1, X_2, \dots, X_n dadas;

B_1 mide el cambio promedio esperado en Y , cuando X_1 aumenta una unidad, permaneciendo, $B_1, B_2 \dots B_n$ constantes.

Este modelo supone que los valores para cada X_1 y $X_2 \dots X_n$, dadas variarán en torno del plano de regresión en una distribución normal con media cero y varianza σ^2 .

Y_r = Clorofila a; X_1, X_2, \dots, X_n = Variables meteorológicas y fisicoquímicas que prevalecieron durante el muestreo; B_1, B_2, B_n = Coeficientes de regresión parcial y E_i = Errores de medida.

Así mismo, el análisis de regresión es útil para efectuar pruebas de hipótesis acerca de los parámetros de la población cuando la relación entre las variables respectivas es lineal y significativa. Esta prueba permite la aplicación de procedimientos de inferencia estadística al determinar y estimar los límites de confianza en la prueba de hipótesis, ajustando la ecuación de regresión y probando a un coeficiente de regresión en específico.

Todas las pruebas de hipótesis utilizan los procedimientos de inferencia estadística para probar la hipótesis nula, donde se supone que el coeficiente de correlación múltiple es cero en la población y cualquier valor mayor - obtenido es debido a las fluctuaciones inherentes al muestreo o a los errores de medida. La prueba de hipótesis - empleada en el análisis de regresión es la prueba de F.

ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS.

Las pruebas de significación asociadas al análisis de varianza de la regresión son basadas en las siguientes suposiciones: 1) normalidad; 2) linealidad; 3) homoce-

elasticidad, y; 4) independencia, o sea: la muestra se distribuye al azar; los valores de la variable dependiente siguen una distribución normal, dada una combinación de variables independientes (X's); la regresión de la variable dependiente con respecto de X's es lineal; si la muestra es grande, representativa y aleatoria, se puede suponer una distribución normal de la muestra (como es el caso para las variables analizadas en El Sol), y homogeneidad en la varianza, puntos que pueden ser evaluados a través del exámen de los residuales.

El comportamiento de los residuos ayuda a evaluar si los supuestos de la regresión no han sido violados y para esto se debe de cumplir con: 1) los residuales deben de ser independientes unos de otros; 2) tener una media de - cero, y; 3) tener la misma varianza. Estas características son comprobables a través de la graficación de los residuos y a través del análisis del Estadístico de Durbin - Watson (Nie, et. al., 1975).

RESULTADOS Y DISCUSION

MODELO DESCRIPTIVO

VARIABLES METEOROLOGICAS

Las relaciones significativas mediante el coeficiente de correlación lineal entre las variables meteorológicas en el cráter se muestran en la Tabla 3 y figura 4. La temperatura media y máxima del aire mostraron un $r = 0.82$, lo cual no es extraño dado que las dos variables son medida del mismo fenómeno; la cantidad de calor sensible que se encuentra en la atmósfera por efecto de la insolación. La diferencia entre ellas es que la temperatura máxima del aire, - así como la mínima del aire, se miden con un termómetro de máximos y mínimos, mientras que la temperatura media se estima a partir del promedio entre éstas últimas (Court, 1974).

La temperatura mínima del aire y la precipitación - pluvial mostraron un $r = 0.70$. En El Sol parece ser que la temperatura mínima, que depende en primer término del grado de insolación en el cráter, el cual a su vez depende de la hora del día, la latitud y la altitud, también se ve afectada directamente por el calor latente de evaporación que es

TABLA 3. COEFICIENTES DE CORRELACION LINEAL ($P \leq 0.05$)
QUE DIERON LUGAR AL MODELO DESCRIPTIVO DEL LAGO

VARIABLES	RELACION	COEFICIENTE r
METEOROLOGICAS	TEMP. M. AIRE Y TEMP. MAX. DEL AIRE	0.82
	TEMP. MIN. DEL AIRE Y PRECIPITACION PLUVIAL	0.70
	TEMP. MIN. DEL AIRE Y TEMPERATURA DEL AGUA	0.83
	PRECIPITACION PLUVIAL Y TEMPERATURA DEL AGUA	0.72
METEOROLOGICAS Y QUIMICAS	NUBOSIDAD Y CONC. DE CO ₂	0.79
	TEMP. MIN. A. Y CONC. CO ₂	0.82
	PRECIPITACION P. Y CO ₂	0.67
	TEMP. MIN. A. Y CONC. NH ₄	-0.66
	TEMP. MED. A. Y CONC. NH ₄	-0.74
	TEMP. MAX. A. Y CONC. NH ₄	-0.76
QUIMICAS	CONC. DE CO ₂ Y OXIGENO	0.66
	CONC. DE CO ₂ Y CONDUCTIV.	-0.65
	CONC. DE O ₂ Y NITRITOS	0.62
	pH Y OXIGENO	0.63
METEOROLOGICAS QUIMICAS Y PRODUCCION	TEMP. MIN. A. Y CLOROFILA	0.71
	CONC. NH ₄ Y CLOROFILA <u>A</u>	0.82

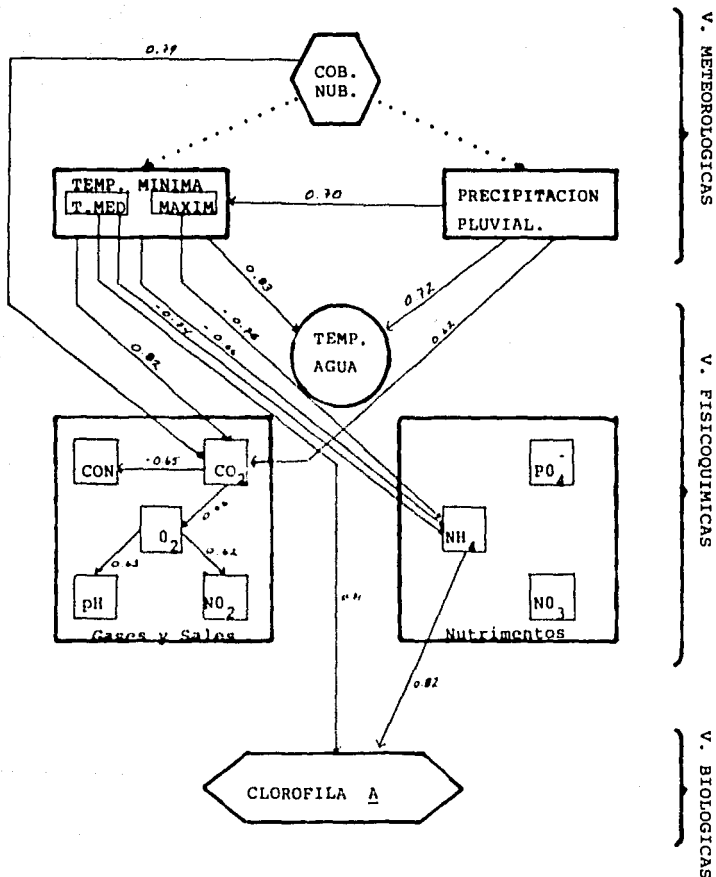


Fig. 4 Modelo descriptivo del Lago El Sol utilizando el análisis de correlación lineal (.... Teórico).

liberado por las nubes para que se produzca la precipitación. Esto explica, al menos en parte, el signo positivo de la relación, a mayor precipitación mayor calor latente liberado y mayor temperatura. Otra parte de la explicación para esta "r", es que al aumentar la precipitación, previamente ha tenido que aumentar la nubosidad, la cual ejerce un efecto de invernadero evitando la pérdida de longitud de onda larga hacia el espacio.

La energía que ingresó como radiación es así conservada en la atmósfera, lo que produce un aumento de temperatura al aumentar el calor sensible en el aire (Court, 1974). Banderas (1984, 1988), señala que en el lago El Sol para este mismo periodo de estudio, la regulación térmica de la masa de agua es una consecuencia de la variación climática del medio y que las variaciones de temperatura del ambiente son a su vez producto del suministro de energía radiante.

Es importante señalar que la temperatura máxima del aire siguió un comportamiento similar al de la temperatura mínima del aire (Banderas, 1984) sin embargo, no mostraron correlaciones significativas con las variables meteorológicas y físicas del agua, sólo la temperatura mínima del aire se correlacionó positivamente con la precipitación pluvial

y con la temperatura del agua ($r = 0.70$ y $r = 0.83$, respectivamente), comportamiento que se debió a la mayor capacidad calorífica del agua, característica que le permite amortiguar las variaciones de temperatura del cráter al ser capaz de almacenar una considerable cantidad de calor, por lo mismo sólo las temperaturas más bajas son las que logran ejercer su influencia en la zona, y en el agua.

VARIABLES QUÍMICAS DEL AGUA.

Las diferentes formas de bióxido de carbono en las aguas naturales están recíprocamente relacionadas con las reacciones ácido-básicas en el medio acuático. La relación inversa entre el bióxido de carbono y la conductividad ($r = -0.65$) encontrada en el lago, es debida a que cuando la cantidad de sales de carbonato de calcio se incrementa, la conductividad del agua del lago disminuye por la tendencia a la formación de CO_3^{--} , de menor solubilidad, que posee por lo tanto una constante de disociación menor y con ello la disminución de iones libres en el agua.

La reacción entre el CO_2 y el H_2O da como resultado ácido

carbónico; si éste reacciona con rocas carbonatadas disuélve al calcio y forma $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (bicarbonato de calcio), solución que sólo permanece estable con una cierta cantidad de CO_2 libre, en equilibrio con las reacciones químicas por las cuales los compuestos son formados. El bióxido de carbono es mantenido en dos estados, bicarbonato y carbonato, como radicales HCO_3^- y $\text{CO}_3^{=}$ (Reid y Wood, 1976).

Las características fisicoquímicas que imprime el bióxido de carbono en los sistemas acuáticos es muy importante dado que es amortiguador de las variaciones de pH del agua al reaccionar fácilmente con ácidos y sales o bases, regula los procesos biológicos en las comunidades acuáticas su concentración en el medio puede influenciar el desarrollo o inhibición de poblaciones, puede modificar los procesos de descomposición e inhibir o incrementar las tasas metabólicas de los productores primarios (Darley, 1987), aspectos que pudieron ser observados principalmente para los procesos de producción en El Sol, como a continuación se señala.

La correlación positiva entre el CO_2 y el O_2 ($r = 0.66$) señala que a mayor concentración de bióxido de carbono mayor contenido de oxígeno, hecho que se explica por la

alta solubilidad del CO_2 en el agua situación que propicia la existencia de altas concentraciones de bióxido de carbono en El Sol (Banderas, 1984), lo que favorece positivamente la actividad fotosintética de los productores primarios, puesto que el CO_2 es el sustrato de reacción inicial para la fotosíntesis o fijación de energía, que conduce a la producción de oxígeno (Reynolds, 1984), por lo tanto el suministro, distribución y mantenimiento de O_2 disuelto en el agua observa una relación directa con la tasa fotosintética (Banderas, 1984; González, 1984).

No obstante que las reacciones estequiométricas en la fotosíntesis entre el O_2 y el CO_2 señalan una relación inversa entre estos (el oxígeno disuelto aumenta a costa de la reducción del CO_2), las bajas temperaturas del agua del lago incrementan la solubilidad del CO_2 en éste y propician el aporte constante de bióxido de carbono al lago (temperatura mínima del agua y CO_2 , $r = 0.82$) dando como resultado un permanente y alto suministro de CO_2 en el agua de el lago El Sol.

La producción de O_2 por medio de la fotosíntesis de los productores primarios, propició la variación en las con

centraciones de CO_2 en la columna de agua, situación que re-percutió en las variaciones de pH del agua, como lo señala la correlación encontrada entre el O_2 y el pH ($r = 0.63$): O sea, a mayor actividad fotosintética mayor producción de O_2 y por lo tanto menor concentración de CO_2 en el agua, como el bióxido de carbono es el responsable de las amortiguaciones de pH en el agua, su disminución genera el incremento en el pH del agua del lago.

Heaney (1976) Schindler (1976) y Yan (1983) también observaron variaciones considerables en el contenido de oxígeno y pH en aguas superficiales, debidas a la actividad fotosintética de las poblaciones algales. George (1981) encontró que los gradientes de conductancia indicaban variación en las concentraciones de las poblaciones de fitoplancton en el lago South Basin of Windermere, y éstas eran capaces de producir un incremento de pH.

Por lo mismo, asociaron la alta densidad algal de la zona superficial con la conductancia, pH del agua del lago y concentración de O_2 ; situación coincidente con las relaciones encontradas para el lago El Sol (Tabla 3, Fig. 4).

El oxígeno disuelto también mostró una correlación -

con los nitritos ($r = 0.66$); es difícil explicar dicha asociación en este cuerpo de agua, debido al escaso contenido de este nutriente así como también al bajo número de estimaciones hechas en este trabajo. Es posible que se justifique tal relación a través de los procesos de remineralización de la materia orgánica y/o aquellos de desnitrificación.

VARIABLES METEOROLOGICAS RELACIONADAS CON LAS VARIABLES FISICAS Y QUIMICAS DEL AGUA.

Según los coeficientes de correlación calculados, - las variables meteorológicas como la nubosidad, la temperatura mínima del aire y la precipitación pluvial, fueron - los factores que mayor influencia ejercieron en la dinámica fisicoquímica del cuerpo de agua, puesto que la temperatura mínima ambiental y la temperatura del agua mostraron un $r = 0.83$ y la precipitación pluvial con la temperatura del agua un $r = 0.72$.

Brilinsky y Mann (1973), Reid y Wood (1976), Schindler (1978), y Banderas (1988), observaron que las modificaciones en el régimen térmico del agua de los lagos es uno de los fenóme-

nos mas importantes en términos ecológicos, puesto que las relaciones entre la insolación, la temperatura del ambiente y la precipitación pluvial, dan como resultado la variación estacional de la temperatura del agua en los lagos, - provocando cambios marcados en las relaciones térmicas de los cuerpos de agua, así como en su estructura dinámica (mezcla, circulación y estratificación de las capas de agua), así como en el contenido químico del agua, puesto que la - precipitación pluvial puede abatir la concentración de sales y nutrientes por dilusión, o por el contrario debido a los arrastres el incremento en su concentración (Thomasson, 1956).

Estos factores dinámicos, ejercen una influencia marcada en la producción fitoplanctónica al vincularse una parte de su energía con los sistemas de circulación de la masa de agua, a través de los cuales la distribución y la disponibilidad de nutrientes se ve directamente afectada; esta distribución de nutrientes en los lagos juega un papel primordial en el control de la producción así como en la biomasa del fitoplancton (Moll y Stoemer, 1982).

La correlación de la nubosidad y la precipitación

pluvial con la concentración de bióxido de carbono disuelto en el agua del lago ($r = 0.79$ y $r = 0.67$ respectivamente; Tabla 3, Fig. 4) pueden ser explicadas a través de :

- 1) la relación entre la nubosidad y la precipitación pluvial, ●;
- 2) al efecto solubilizante de la lluvia sobre los gases disueltos en la atmósfera. El agua de lluvia (con el CO_2 como H_2CO_3) que cae se percola a través de rocas carbonatadas, como por ejemplo la arcilla (CaCO_3), que se disuelve como bicarbonato de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, y la solución de éste último compuesto permanece únicamente en presencia de cierta cantidad de bióxido de carbono libre en equilibrio (Reid y Wood, 1976).

Las correlaciones negativas registradas entre la temperatura mínima, media y máxima del aire con la concentración de amonio en El Sol ($r = -0.66$, $r = -0.74$ y $r = -0.76$ respectivamente) pueden ser relacionadas indirectamente a través del descenso de la temperatura del agua del lago como consecuencia del decremento en la temperatura del aire.

La atenuación de la actividad metabólica de los organismos planctónicos, sobre todo aquellos relacionados con la mine

realización de la materia orgánica, puesto que la temperatura del aire ejerce su influencia en el régimen térmico de la masa de agua en El Sol.

VARIABLES METEOROLÓGICAS Y FISIQUÍMICAS RELACIONADAS CON LA CLOROFILA A.

El análisis de las variables meteorológicas y fisicoquímicas para el entendimiento y comprensión de los procesos productivos es complejo, pues según algunos autores (Platt, et. al., 1970; Platt y Deman, 1975) la heterogeneidad fisicoquímica de la masa de agua es en mucho consecuencia de la variación climática del medio, factor que modifica la abundancia y distribución de los productores primarios. Así mismo, Görham et. al. (1974), señala que la producción en los lagos varía significativamente con la variación en las condiciones ambientales prevalecientes, situación que también es observada para el lago El Sol como se señala a continuación.

Según los resultados obtenidos en el modelo descriptivo del lago, las variables meteorológicas y físicas señalaron a la temperatura media del aire y a la precipitación pluvial

como las variables más importantes que afectan a las siguientes características:

- 1) El régimen climático.
- 2) La regulación térmica de la masa de agua.
- 3) La variación en la composición fisicoquímica del cuerpo de agua, y;
- 4) La dinámica productiva del lago El Sol.

Esto último, al mostrar relaciones significativas a través de los coeficientes de correlación lineal entre la temperatura media del aire y la concentración de Clorofila \underline{a} ($r = 0.71$) y de regresión; temperatura media del aire y la concentración de Clorofila \underline{a} ($\beta = 0.8$), así como la precipitación pluvial con la Clorofila \underline{a} ($\beta = 0.48$). Estas dos últimas relaciones junto con la temperatura del agua y la concentración de Clorofila \underline{a} ($\beta = 0.15$) complementaron el modelo descriptivo del lago mediante el análisis de regresión, coeficientes que los señalan como factores importantes en la dinámica biótica.

Esto se debe a la dependencia de los procesos metabólicos de los organismos respecto a la temperatura (Q_{10}), en espe-

cífico de los productores primarios (Reynolds, 1984). Darley, 1987) señala a la temperatura como el tercer factor en importancia en los procesos de producción en cultivos de fitoplancton. Estos organismos exhiben una relación habitual entre la temperatura y la actividad biológica al elevar la tasa de crecimiento cuando aumenta la temperatura hasta un valor óptimo, después del cual disminuye drásticamente hasta cero. Este autor menciona que las algas son capaces de adaptarse dentro de ciertos límites a las temperaturas subóptimas, pero los mecanismos no se conocen aún.

En el lago Titicaca (Vincent et. al., 1985) observaron la influencia de la temperatura en las variaciones físicoquímicas y productivas del fitoplancton y señalan que las tasas metabólicas de los productores primarios se ven influenciados por las variaciones de temperatura del agua, situación que puede conducir a modificaciones en el contenido de gases y sales nutritivas en la masa de agua.

El decremento en la temperatura de los lagos origina el abajamiento de las tasas de producción como consecuencia de la dependencia térmica del metabolismo de los organismos. Es

te aspecto también propicia el lento reciclamiento de los nutrimentos y muchas veces la acumulación de sales nutritivas en el cuerpo de agua, principalmente en el periodo frío. Estos nutrimentos generalmente son utilizados por el fitoplancton en la próxima estación cuando el movimiento convectivo de la atmósfera propicia el ascenso de la temperatura del agua y la mezcla del cuerpo de agua con todos sus constituyentes (Barko, et. al., 1977 y Round, 1981).

Margalef (1983), señala que la temperatura del agua de los lagos es un factor limitante y regulador de los sistemas acuáticos. Produce cambios marcados en las características fisicoquímicas en la masa de agua, originando variaciones en las actividades de los organismos.

Por lo tanto, constituye un factor clave en la adecuación ambiental de los cuerpos de agua. Straten y Herodek (1982), señalan respecto al efecto que ejerce la temperatura en los procesos de producción en los lagos, que debido a la falta de información sobre la variación de los nutrimentos asociada a la variabilidad estocástica en los procesos productivos, hacen difícil la evaluación en la relación crecimiento algal contra temperatura.

Esto podría explicar su menor valor de β (coeficiente de regresión) en el modelo, comparado contra el valor de β para el NH_4 , por ejemplo. A pesar de esta limitante, los estudios realizados en torno a la dependencia de las comunidades con respecto a la temperatura, indican que las altas tasas de crecimiento con el incremento de la temperatura implican un rápido recambio de biomasa algal (Talling, 1974; Goldamn y Carpenter, 1974; Allmon, 1980).

Con respecto a la precipitación, al igual que en otros cuerpos de agua de alta montaña tropicales y templados, es asociada con el aporte (escurrimientos) y mezcla de nutrientes, situación que repercute benéficamente en los procesos productivos del fitoplancton (Tilzer, 1973; Brilinsky y Mann, 1973; Vincent et. al., 1985) dicha situación es observada también en El Sol, puesto que se obtuvo una $\beta = 0.48$ en el modelo de regresión (Tabla 4, Fig. 5).

Según Görham (1961), la relación Área de la Superficie de Drenado/Área Superficial del lago afecta directamente el aporte total de sólidos al agua, siendo por lo tanto más transparentes aquellos lagos que se encuentran dentro de áreas de drenado más limitadas, como es el caso de los lagos de alta mon

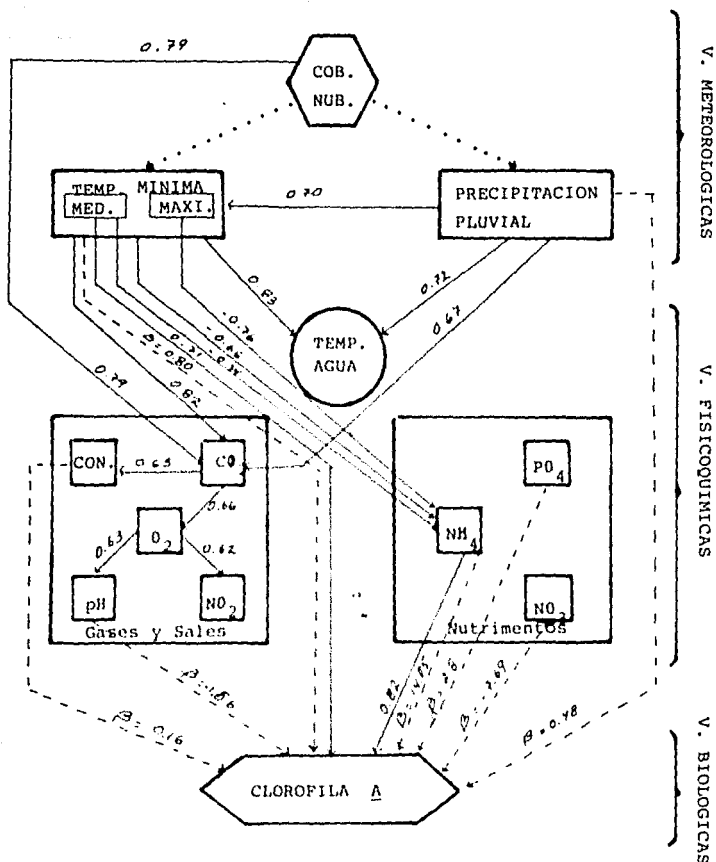


Fig. 5 Modelo descriptivo de la producción fitoplanctónica del Lago El Sol, mediante los análisis de correlación y regresión múltiple. (.... teórica).

taña (Thomasson, 1956), pues el único aporte de sólidos di sueltos y en suspensión que tienen provienen directamente de la lluvia que cae sobre la superficie del lago, y la de las escorrentías que se producen en las laderas interiores del cráter.

Shindler (1978), describió la dependencia existente entre la cantidad de nutrimentos aportados por la lluvia y escorrentías al agua y los procesos de productividad primaria de un lago mediante la relación $(A_d - A_l)/V$, siendo A_d y A_l las áreas de superficie de drenado y superficial del lago respectivamente, y V el volumen del lago; la que supone que para los lagos aislados con escasez de aportes circundantes de nu trimentos, las aguas de los drenes reflejarán estrechamente la composición química de la lluvia y por lo tanto el área de drenado estará determinando directamente la cantidad de nutri mentos que ingresan al lago.

La pobreza de nutrimentos en las zonas situadas a gran des alturas son extremas debida a las características geológicas y al tipo de vegetación terrestre en los alrededores (Scott y Billings, 1964; Larson, et. al., 1987), y como el mezclado del lago es completo, su carga de nutrimentos específica puede

calcularse si se conoce su cantidad en el agua de lluvia y en los drenes, lo cual resulta ser un aspecto muy útil cuando se trata de modelar a los ecosistemas con fines de manejo de recursos (Likens y Borman, 1974)

Las variables químicas que mostraron relaciones con la concentración de Clorofila a, a través del coeficiente de regresión fueron: la conductividad y el pH del agua ($\beta = 0.16$ y $\beta = -1.6$, respectivamente). Autores como Yan (1983) y Steinitz-Kannan et. al. (1983), registraron asociaciones del pH con la producción y biomasa fitoplanctónica. También George y Heaney (1978) observaron en East Waite Water (Inglaterra) que los gradientes de conductancia indicaban variaciones en las concentraciones algales, mismas que producían un incremento en el pH del agua por el consumo de CO_2 mediante la actividad fotosintética, originando la elevación del pH en la zona superficial principalmente.

En El Sol los resultados muestran la posibilidad de que las variaciones en el pH y en la conductancia sean indicadoras de la variación fotosintética y de biomasa fitoplanctónica en el lago.

Los nutrientes que señalaron relaciones significati

vas con la Clorofila a en El Sol fueron: el amonio ($r = 0.82$ y $\beta = 14.0$), los nitratos ($\beta = -7.69$) y los fosfatos ($\beta = 2.83$). Los altos coeficientes de correlación y regresión con la Clorofila a señalan a los compuestos nitrogenados y más específicamente al amonio, como los factores que más influyeron en la dinámica de la Clorofila a del lago, más que al fósforo y las variables meteorológicas (Tabla 4).

La dependencia de los procesos productivos con respecto a la variación del amonio ha sido observada en el lago Titicaca por Børk-Ramberg (1985) y Vincent et al. (1985), quienes mencionan la relación entre la concentración de amonio en el lago y la productividad primaria, en donde éste nutriente es aparentemente el sustrato de reacción inicial, por lo mismo se constituye en limitante de la producción, más que la concentración de fosfatos.

Así mismo Darley (1987), señala que las algas requieren de una proporción de nitrógeno:fósforo (N:P) de - por lo menos 16:1, por lo que reducciones en esta proporción pueden causarle al sistema una limitación de nitróge

TABLA 4. COEFICIENTES DE REGRESION SIGNIFICATIVOS EN EL MODELO DESCRIPTIVO Y PREDICTIVO DEL LAGO.

VARIABLE	B
AMONIO	14.05
NITRATOS	-7.69
CONDUCTIVIDAD	0.16
FOSFATOS	2.83
PRECIPITACION PLUVIAL	0.48
TEMPERATURA MEDIA DEL AIRE	0.80
pH	-1.56
TEMPERATURA DEL AGUA	0.16

TABLA 5. ANALISIS DE CORRELACION MULTIPLE DEL MODELO PREDICTIVO ELEGIDO PARA EL LAGO EL SOL.

r MULTIPLE	0.99998
r CUADRADA	0.99996
r CUADRADA AJUSTADA	0.99966
ERROR STANDAR	0.05965

no. En El Sol, estas relaciones no siempre se conservaron durante el periodo de estudio, puesto que se registraron proporciones desde 24:1 en agosto, mes de mayor precipitación y producción fitoplanctónica (Tabla 1), hasta niveles no detectables de fosfatos en noviembre. La relación promedio anual de N:P muestran al nitrógeno como factor limitante de la producción durante todos los meses - muestreados excepto en agosto y noviembre.

Diversos estudios en Norteamérica y Europa han demostrado al fósforo como el principal nutriente limitante de la producción fitoplanctónica. Sin embargo, se ha observado en otros trabajos que el nitrógeno es el limitante del crecimiento algal. En el lago Titicaca la adición de nitrógeno estimuló el crecimiento algal en mucho mayor medida que otros nutrimentos como fósforo y sílice (Vincent et. al. 1985).

No obstante que los datos no son concluyentes, los lagos y ríos en áreas volcánicas tienden a niveles de fósforo relativamente altos con respecto al nitrógeno y por eso el fósforo pasa a constituir el segundo nutriente limitante de la producción algal (Vincent, et. al., op., cit.). La prepon

derancia en la limitación de nitrógeno en los lagos tropicales contrasta marcadamente con la limitación de fósforo usualmente encontrada en las regiones templadas del Norte (Wurtsbaugh, et. al. 1985). Vincent et. al. (1982) determinaron en diversos lagos antárticos, que el nitrógeno fue el principal factor limitante de la producción algal.

Los nutrimentos en los lagos tienen implicaciones ecológicas muy importantes, puesto que las concentraciones de éstos en el agua están sujetas a variaciones espacio-temporales de tal modo que el crecimiento de las poblaciones está relacionado con su suministro y reciclamiento (Moll y Stoemer, 1982).

Aunque existen modelos físicos de lagos que expresan varios grados de complejidad, el análisis de las relaciones entre los factores meteorológicos, fisicoquímicos y biológicos es un problema. Sin embargo, existe la necesidad de establecer dichas relaciones debido al crecimiento inadvertido de factores de influencia antropogénica en el régimen de los lagos (Imboden y Gächter, 1980).

Por lo mismo la utilización de análisis estadísticos en la

elaboración de modelos es importante para conocer, resumir y manejar la información que contienen los datos de campo, muchas veces la descripción de un sólo proceso en el sistema puede conducir a la comprensión de complejas interacciones en este y resumirlas en un modelo. Pero generalmente el tipo de modelo obtenido en un análisis sistémico depende del tipo de datos disponibles, y la información que se obtiene no es lo suficiente como para llegar a afirmaciones concluyentes, como lo es para éste trabajo, donde las cuantificaciones de radiación, materia orgánica suspendida, producción bentónica, población detritivora y consumidores no fueron analizados, razón por la cual no aparecen en el modelo obtenido las relaciones correspondientes.

Otro aspecto que es importante señalar es que aunque el modelo obtenido señala cierta direccionalidad en los procesos, debe de tenerse en cuenta que existen los mecanismos de retroalimentación que implican los fenómenos de mortalidad, pastoreo, sedimentación, etc., los cuales no son incluidos.

MODELO PREDICTIVO

REGRESION MULTIPLE.

El análisis de regresión múltiple aplicado a los datos climáticos, fisicoquímicos y biológicos en El Sol, señaló a través del análisis de varianza (Prueba de F) - que el amonio, nitratos y fosfatos, así como la temperatura del medio (aire y agua) fueron factores que definieron la producción primaria del lago (expresada en mg/m^3 de Clorofila a) a través de la ecuación:

$$Cl_a = 3.47 + 14.05(NH_4) - 7.69(NO_3) + 0.16(COND) + 2.83(PO_4) + 0.48(P.P.) + 0.8(T.M.A) - 1.56(pH) + 0.16(T_{ag}) \dots \text{(Ec.1)}$$

El índice de correlación múltiple para esta ecuación (Tabla 5) señaló una alta correlación entre las variables elegidas con respecto a la producción de Clorofila a (r múltiple = 0.99). Así mismo, el valor de r^2 para esta ecuación indica que el conjunto de parámetros elegidos explican el 99% de la variación de la Clorofila y el error standard obtenido es muy pequeño (0.059).

PRUEBA DE F.

La Prueba de F aplicada a las variables explicativas de la ecuación obtenida, (Tabla 6; Ec. 1) muestra un valor de 3298.39 ** ($P = 0.01$), lo que permite rechazar la hipótesis nula de que no hay relación entre la variable de respuesta con las explicativas. Esto es, se -- acepta la hipótesis alternativa en el sentido de que la distribución de los puntos representados en el espacio n dimensional de la regresión es lineal. Sin embargo, - esta prueba no indica el grado en el que cada parámetro explicativo modifica la variación en la variable de respuesta.

para saber cuales de los parámetros en el modelo no influyen significativamente en la variable de respuesta, se aplicaron los métodos de regresión standar, y el método de descomposición jerárquica.

a) REGRESION STANDAR.- El método de regresión - standar señaló a los fosfatos y a la temperatura del agua como variables de relevancia secundaria (Tabla 7), porque los valores de F aplicados a cada uno de los coeficientes de regresión en específico, fueron menores de 239 ($P = 0.05$).

TABLA 6. ANALISIS DE VARIANZA DE LA REGRESION (ECUACION 1).				
ANALISIS DE V.	G.L.	SUMA DE CUAD.	CUAD. M.	F.
REGRESION	8	98.892	11.7365	3298.39**
RESIDUALES	1	0.00356	0.00356	

TABLA 7. PRUEBA DE F PARA CADA UNO DE LOS COEFICIENTES DE REGRESION (METODO STANDAR).				
VARIABLE	B	BETA	ERROR STD.	F
AMONIO	14.05	1.57	0.183	5864.86 *
NITRATOS	-7.69	-0.88	0.107	5169.84 *
CONDUCTIV.	0.16	0.34	0.004	1421.93 *
FOSFATOS	2.83	0.08	0.509	31.26
PREC. PLUV.	0.48	0.44	0.014	1146.91 *
TEM. MED. A.	0.80	0.48	0.030	702.46 *
pH	-1.56	-0.19	0.089	306.32 *
TEMP. AGUA	0.16	0.134	0.022	49.53
CONSTANTE	3.47			

Por tal motivo, dichas variables no contribuyen significativamente a la predicción de la Clorofila a.

b) DESCOMPOSICION JERARQUICA.- En el método de - Descomposición Jerárquica, la Prueba de F aplicada a cada uno de los coeficientes de regresión (Tabla 8), señaló sólo a la temperatura del agua como variable que no influyó significativamente en la predicción de la Clorofila a.

Según lo anterior, los fosfatos y la temperatura del agua no afectan de manera importante al contenido de Clorofila en El Sol, lo cual concuerda con los resultados de la correlación lineal entre variables ya analizadas y discutidas, aunque su participación en el modelo es necesaria para obtener el comportamiento lineal idóneo.

ANALISIS DE VARIANZA.

El análisis de varianza de la ecuación de regresión (Ec. 1), señaló al amonio como la variable más determinante de los procesos productivos en el lago El Sol, puesto que explicó un 66.8% de la varianza total (Tabla 9). Ade

TABLA 8. PRUEBA DE F PARA CADA UNO DE LOS COEFICIENTES DE REGRESION (DESCOMPOSICION JERARQUICA).

VARIABLES	CAMBIO r^2	r^2	F
AMONIO	0.668	0.6680	16700.75 *
NITRATOS	0.1418	0.8098	3547.25 *
CONDUCTIV.	0.065	0.8748	1633.25 *
FOSFATOS	0.041	0.9158	1030.25 *
PRECIP. P.	0.028	0.9438	700.25 *
TEMP. M. A.	0.043	0.9868	1068.00 *
pH	0.010	0.9968	270.25 *
TEMP. AGUA	0.002	0.9988	47,00

TABLA 9. ANALISIS DE VARIANZA DE LA REGRESION (EC.1)

VARIABLES	PROF. DE LA VAR.	B	r MULT.
AMONIO	66.8	14.05	0.817
NITRATO	14.1	-7.69	0.899
CONDUCT.	6.5	0.16	0.935
FOSFATOS	4.1	2.83	0.957
pH	1.0	-1.56	0.999
PREC. PLUV.	2.8	0.48	0.972
TEMP. M. A.	4.2	0.80	0.993
TEMP. DEL AGUA	0.18	0.16	0.999

más, el amonio presentó el valor mas alto en la tasa de va
riación (coeficiente de regresión = 14.05 unidades de Clo-
rofila a por unidad de amonio), lo que demuestra una mayor
dependencia de los procesos productivos con respecto a es-
te nutrimento. De la misma manera el coeficiente de co-
rrelación múltiple (r^2) de 0.668, indica que el amonio ex-
plica el 66.8% de la variación en la Clorofila a (Tabla 9).

Según el análisis de varianza, el nitrato mostró
ser el segundo factor en importancia en la ecuación, pues
to que contribuyó con el 14.1% de la variación total.
Su coeficiente de regresión con la Clorofila a de -7.69
(relación inversa), r múltiple = 0.8999 (junto con el am
onio), señalan la importancia del nitrato en los procesos
de producción.

La conductancia y el pH explicaron el 6.5 y 1.0%
de la variación de la Clorofila a, así como coeficientes
de regresión de 0.16 y -1.56 respectivamente. La conduc-
tancia puede ser asociada con la producción y densidad -
fitoplanctónica en el lago, situación coincidente con el
Lago Lohi en Inglaterra; mientras que el pH puede ser re
lacionado también con la producción de los organismos fi

toplanctónicos ya que las tasas de fotosíntesis pueden modificar el pH en los lagos (Schindler, 1978; Yan, 1983). Estos aspectos muestran la importancia de los factores químicos en los procesos productivos en El Sol.

Según el análisis de regresión, las variables climáticas precipitación y temperatura del aire fueron los factores que en tercer término contribuyeron a el contenido de Clorofila a en el lago, ya que mostraron una variación del 2.8% para la precipitación pluvial y 4.2% para la temperatura media del aire (Tabla 9), así como bajos coeficientes de regresión (0.48 y 0.80, respectivamente).

Debe de tomarse en cuenta que los valores en estos coeficientes (de correlación simple, múltiple, r^2 , y de regresión) variarán de acuerdo a la dinámica fisicoquímica y biológica del lago en un espacio-tiempo determinado, así que los resultados del modelo y predicción de la producción obtenidos no pueden ser extrapolados a cualquier situación o momento dado, pero si pueden utilizarse en la formulación de hipótesis y para ayudar a comprender mejor la dinámica climática, fisicoquímica y de producción (en este caso Clorofila a).

INTERVALOS DE CONFIANZA.

Los intervalos de confianza de la función de regresión elegida (Ec. 1) señaló al amonio, a los nitratos y a los fosfatos como las variables que presentaron los intervalos más amplios (Tabla 10), aspecto que indica - que para pequeños cambios en éstos componentes, repercuten enormemente en la variación y heterogeneidad del contenido de Clorofila a en el medio acuático.

Las pequeñas variaciones en la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo, principalmente) en los lagos de alta montaña, producidos por aportes externos e internos (Schindler, 1978), hacen de estos lagos (generalmente oligotróficos) ecosistemas muy sensibles, donde los aportes por pequeños que sean pueden generar grandes cambios en la estructura ecológica del sistema. Thomasson (1956) y Reynolds (1984), han sugerido que los cuerpos de agua de alta montaña, sensibles a los cambios de nutrimentos, sean conservados como "santuarios" o sistemas naturales que puedan conservarse fuera del alcance de la influencia humana, ya que la información que generan es muy

importante para la ecología acuática.

COMPROBACION DE LOS SUPUESTOS DE LA REGRESION

LINEALIDAD.

Esta se comprobó mediante la graficación de los valores experimentales y los teóricos de cada una de las ecuaciones obtenidas, así como por el valor en el coeficiente de correlación múltiple (Tablas 11, 12 y 13; Figs. 6a, b y c). La Figura 6a, muestra los resultados de la primera ecuación; se observa que los valores teóricos y experimentales siguen un claro comportamiento lineal, con un alto coeficiente de correlación múltiple ($r = 0.99$)[±]

Por el contrario, las figuras 5b y c muestran el comportamiento de los valores teóricos y experimentales de las ecuaciones obtenidas por los métodos Standar y de Descomposición Jerárquica. En estos, las diferencias entre los valores observados y los predichos son muy grandes, perdiéndose el comportamiento lineal; por lo tanto, la -

TABLA 10. INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS COEFICIENTES.

VARIABLES	INTERVALOS
AMONIO	14.05 \pm 0.36
NITRATOS	-7.69 \pm 0.22
CONDUCTIVIDAD	0.16 \pm 0.008
POSFATOS	2.83 \pm 1.01
PRECIPITACION PLUVIAL	0.48 \pm 2.94
TEMP. MEDIA DEL AGUA	0.80 \pm 0.06
pH	-1.56 \pm 0.18
TEMPERATURA DEL AGUA	0.16 \pm 0.04

TABLA 11. ANALISIS DE RESIDUOS DE LA ECUACION 1

MES	VALOR OBS. Cl _a	VALOR PREDICHO	RESIDUALES (X 10 ⁻²)
1	0.000	0.007	0.734
2	0.840	0.861	-0.021
3	0.569	0.576	-0.702
4	2.432	2.443	-0.011
5	0.849	0.836	0.013
6	1.339	1.306	0.033
7	0.971	1.008	-0.037
8	1.111	1.111	0.000
9	1.927	1.913	0.014
10	1.204	1.195	0.882

TABLA 12. ANALISIS DE RESIDUOS DE LA REGRESION POR EL METODO STANDAR.			
MES	VALOR OBS. Cl_a	VALOR PREDICHO Cl_a	RESIDUALES
1	0.000	-1.983	1.983
2	0.840	-2.039	2.879
3	0.569	-1.912	2.481
4	2.432	0.399	2.033
5	0.849	-1.312	2.161
6	1.339	0.489	0.850
7	0.971	0.020	0.951
8	1.111	0.790	10.321
9	1.927	0.794	1.133
10	1.204	0.763	0.441

TABLA 13. ANALISIS DE RESIDUOS DE LA REGRESION POR EL METODO DESCOMPOSICION JERARQUICA.			
MES	VALOR OBS. Cl_a	VALOR PREDICHO Cl_a	RESIDUALES
1	0.000	1.668	-1.668
2	0.840	1.157	-0.317
3	0.569	2.242	-1.673
4	0.432	0.639	0.207
5	0.849	9.538	-6.689
6	1.339	9.350	-6.013
7	0.971	0.043	0.928
8	1.111	1.111	0.000
9	1.927	1.113	0.814
10	1.204	0.188	1.015

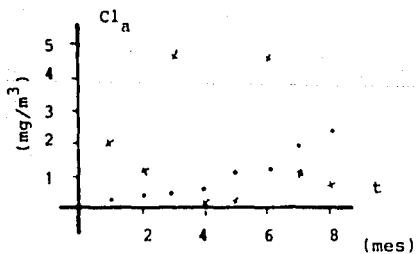
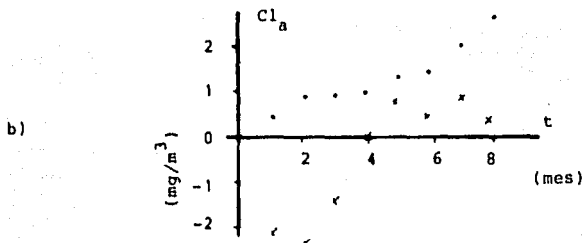
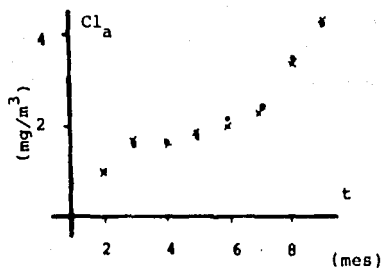


Fig. 6 a) Valores predichos y observados de Cl_a (Ec. 1);
 b) valores teóricos y experimentales (M. Standar);
 c) valores teóricos y observados (M. D. Jerárquica).

primera ecuación es la que cumple con el supuesto de linealidad. Esto implica, en consecuencia, que las variables fosfato y temperatura del agua repercuten secundariamente en la variación de la Clorofila a y sólo son importantes para definir el comportamiento del sistema.

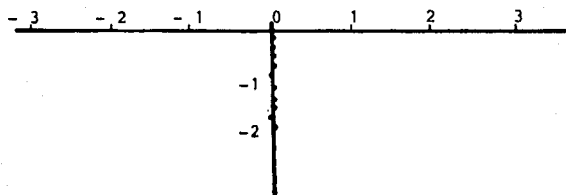
NORMALIDAD.

El tamaño de la muestra de las variables climáticas, fisicoquímicas y biológicas (Clorofila a) es grande (siendo éstas el promedio de 74, 200 y 144 muestreos respectivamente, que incluyen registros diarios en la variación climática anual, así como variaciones en el perfil vertical y horizontal de los factores fisicoquímicos y biológicos, lo que lleva a suponer una distribución normal de la muestra.

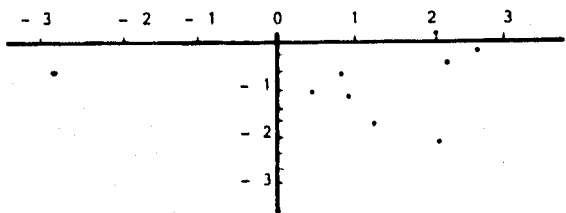
INDEPENDENCIA Y HOMOCEDASTICIDAD.

Estos dos supuestos se evaluaron mediante el análisis de los residuos; con la graficación de los residuos y el resultado del Estadístico de Durvin Watson, también se

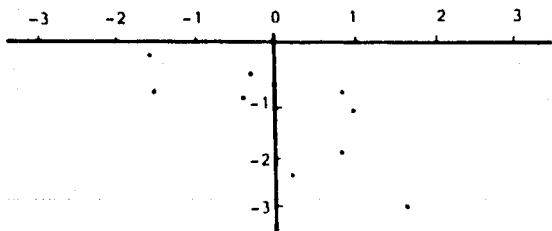
evaluó la bondad del ajuste en la ecuación, o sea, la fi
delidad en la misma en cuanto a su poder de predicción.
Así, los residuos en la figura 7a, que pertenecen a la -
ecuación 1, es la única que muestra una distribución nor
mal y azarosa en torno al cero (Estadístico de Durbin -
Watson = 2.73), además de que los residuos son muy peque
ños, lo que demuestra un comportamiento esperado y con -
ello la bondad en el ajuste de la regresión, así como fi
delidad en cuanto a su poder de predicción.



a)



b)



c)

Fig. 7 a) Residuos estandarizados de la Ec. 1; b) residuos estandarizados (M. Standar); c) Residuos estandarizados (M. Descomposición Jerárquica).

CONCLUSIONES

La agrupación de las variables en: climáticas (nubosidad, precipitación pluvial, temperatura mínima, media y máxima del aire), fisicoquímicas (temperatura del agua, conductividad, bióxido de carbono, oxígeno, pH, amonio, -nitratos, nitritos, fosfatos, sulfatos) y biológicas (concentración de Clorofila a) señalaron correlaciones entre e intracompartimentos, dando lugar a los modelos descriptivo y predictivo del lago El Sol con excepción de los -sulfatos debido a que estos no son utilizados por el fitoplancton como fuente de alimento.

El análisis descriptivo señala que la heterogeneidad fisicoquímica y productiva de la masa de agua en el -lago El Sol son consecuencia de la variación climática: -la nubosidad, la temperatura del aire y la precipitación pluvial influyen en el régimen térmico del agua del lago, así como en la concentración de bióxido de carbono disuelto, actividad metabólica de los microorganismos y concentración de amonio; así mismo la temperatura del agua determinó la concentración de Clorofila a ($r = 0,71$) influyendo en la adecuación del medio acuático.

El modelo descriptivo señala al bióxido de carbono como el factor fisicoquímico que influye en la concentración de oxígeno en la masa de agua al regular las tasas metabólicas de los productores primarios, y con ello el desarrollo de poblaciones fitoplanctónicas que a su vez influyen en las variaciones de pH del agua.

De los modelos de simulación en el lago El Sol el que mejor describió el comportamiento de la variación de la Clorofila a fue: $Cl_{a} = 3.47 + 14.05(NH_4) - 7.69(NO_3) + 0.16(-COND) + 2.83(PO_4) + 0.48(P.P.) + 0.8(T.M.A.) - 1.56(pH) + 0.16(T_{ag})$

A pesar de que el modelo descriptivo señala relaciones ambientales justificables ecológicamente, el modelo de regresión acondiciona matemáticamente, al amonio como el factor determinante de el contenido de Clorofila a, pues to que explicó el 66.8% de la varianza total; y al nitrato con el 14% de la variación, por lo mismo el modelo elegido mostró a los compuestos nitrogenados como el factor primordial en la determinación de los procesos de producción y en segundo término a la temperatura del medio acuático con 4.1% de la variación en la precipitación pluvial

y 0.18% en la temperatura del agua.

Los fosfatos y la temperatura del agua fueron señalados por los métodos de Regresión Standar y Descomposición Jerárquica como factores secundarios en la determinación del modelo.

Los modelos de simulación para el estudio de la producción fitoplanctónica en los lagos son una herramienta útil para el conocimiento y comprensión de la información que contienen los datos de campo, así como para la planeación de los recursos limnéticos; sin embargo, hay que tener en cuenta que éstos son simples y precisos en comparación con el comportamiento del ecosistema, ya que su determinación se basa únicamente en la estimación - cuantitativa que pueda hacerse de algunos parámetros durante el muestreo, por lo mismo el comportamiento de las variables en el modelo sólo pueden ser aplicables al lago en el tiempo y situación en el que se llevó a cabo el trabajo, o que los procedimientos estadísticos sean sometidos a modificaciones o suposiciones restrictivas al proceso inicial, para adecuarlos a las situaciones reinantes en el sistema.

BIBLIOGRAFIA

- ALCOCER, D.J. 1980. Aportaciones limnológicas al estudio del Lago El Sol y Lago La Luna, Nevado de Toluca, Estado de México, Tesis de Licenciatura. UAM-I.
- ALLMON, S.R. 1980. The theoretical basin for estimating phytoplankton production and specific growth - rate from chlorophyll, light and temperature data. Ecol. Mod. 11:15-38.
- ARREDONDO, F.J., A. HERNANDEZ, R.M., OCHOA Y P.J. PONCE. 1982. Aplicaciones de técnicas de análisis multivariado en el estudio de embalses temporales. Comunicaciones Técnicas. IIMASS, UNAM. Serie: - Naranja 100. 60 p.
- ARREDONDO, F.J. 1987. Policultivo experimental de ciprínidos asiáticos en México. Tesis Doctoral, UNAM. 93 p.
- BANDERAS, T.A. 1984. Estudio anual de la limnología y del fitobentos del Lago El Sol, Nevado de Toluca. Tesis de Licenciatura. UNAM. 69 p.
- BANDERAS, T.A. 1988. Análisis de la estructura algal bentónica del Lago El Sol. Tesis de Maestría. UNAM. 97 p.
- BARKO, J.W., P.G. MURPHY., R.C. WETZEL. 1977. An investigation of primary production and ecosystem metabolism in a Lake Michigan dune pond. Arch. Hidrobiol. 81(2): 155-187.

- BEGHELLI, S., R. GUIDORZI Y F. TERRAGNI. 1982. Identification of phosphorus dynamics in Kootenay Lake, Canada. Ecol. Mod. 17:11-32.
- BERMAN, T., Y J. POLLINGHER. 1974. Annual and seasonal variations of phytoplankton, chlorophyll, and photosynthesis in Lake Kinneret. Limnol. Oceanogr. 19(1):31-54.
- BJORK-RAMBERG, S. 1985. Uptake of phosphate and inorganic nitrogen by a sediment-algal system in a subarctic lake. Freshwat. Biol. 37:
- BLOOMFIELD, K. Y S. BALASTRO. 1974. Late pleistocene eruptive history of Nevado de Toluca Volcano, Central México. Geol. Soc. Am. Bull. 85:901-903.
- BUDIKO, M.I. 1974. Climate and life. Academic Press. New York
- COURT, A. 1974. The climate of the conterminous United States. In: Brgson, R.A. y F.K. Hare (Eds). World Survey of climatology. Vol. 11: Climates of North America. Elsevier Scientific Publ. Co.
- CULLEN, J.J. 1982. The deep chlorophyll maximum comparing vertical profiles of chlorophyll a. Can. Fish. Aquat. Sci. 39:791-803.
- DE LA LANZA, E. G. 1981. Importancia de la materia orgánica en los sedimentos de la laguna Huizache-Caimanero, Sin. México. Tesis Doctoral. (Oceanogr. Biol. Pesquera). C.C.H., UNAM. México. 93 p.
- DARLEY, M.W. 1987. Biología de las algas Enfoque fisiológico. Edit. Limusa. México. 518 p.

- GEORGE, D.G. 1981. The spatial distribution of nutrients in the South Basin of Windermere. Freshwat. Biol. 11:405-424.
- GEORGE, D.G. Y HEANEY, S.I. 1978. Factors influencing the spatial distribution of phytoplankton in a small productive lake. J. Ecol. 66:133-155.
- GENTIL, S. 1982. Identifiability study of an aquatic, Ecosystem Model. Int. J. Systems. SCI., Vol. 13(8):881-859.
- GOLDMAN, J.C. Y C.J. CARPENTER. 1974. A kinetic approach to the effect of temperature on algal growth. Limnol. Oceanogr. 19(5):756-766.
- GONZALEZ, J.J.L. 1985. Simulación matemática de la productividad primaria en tres lagunas costeras del Estado de Guerrero, México. Tesis de Licenciatura. UNAM. 75 p.
- GONZALEZ V.R. 1984. Estudio de la productividad primaria del Lago El Sol, Nevado de Toluca, Edo. de México. Tesis de Licenciatura. UNAM. 53 p.
- GORHAM, E. 1961. Factors influencing supply of mayors ions to inland waters, with special reference to the atmosphere. Geol. Soc. of Am. Bull. 72:795-840.
- GORHAM, E., J.W.G. LUND, J.E. SANGER, Y W.E. Jr. DEAN. 1974. Some relationships between algal standing crop, water chemistry and sediment chemistry in the english lake. Limnol. Oceanogr. 19(4):601-617.

- HEANEY, S.I. 1976. Temporal and spatial distribution of the dinoflagellate Ceratium hirundinella, Muller, within a small productive lake. Freshwat. Biol. 6:531-542.
- HORWOOD, J.W. 1978. Observations on spatial heterogeneity of surface chlorophyll in one and two dimensions. J. Mar. Biol. Ass. 58:487-502.
- IMBODEN, D.F. Y R. GACHTER. 1980. The impact of physical processes on the trophic state of a lake. Swiss Federal Institute for Water Resources and Water Pollution Centro. EAWAG, 8600 Dübendorf, Switzerland. 93 - 110.
- JEFFERS, J.N.R. 1978. An introduction systems analysis with ecological applications. Edward Arnold. London. 198 p.
- JONES, R.I., V. IIMAUIRTA. 1988. Phytoflagellates and their ecology in Finnishbrown-water lakes. Hydrobiol. 161:255-270.
- JURADO, M.J. 1989. Manejo estadístico de algunas variables químicas y granulométricas de la fase sedimentaria del sistema Huizache-Caimanero, Sin, México. Tesis de Lic. UNAM. 45 p.
- LARSON, D.W., C.N. DAHM Y R.S. GEIGER. 1987. Vertical partitioning of the phytoplankton assemblage in ultraoligotrophic crater lake. Oregon. USA. 18:429-456,

- LIERE, L.V. J. PETERS, A. NONTIJN Y L. MUR. 1982. Release of sediment phosphorus and the influence of algal growth on this process. Hydrobio. Bull. 16(2-3): 191-200.
- LIKENS, G.E. Y F. HERBERT-BORMANN. 1974. Linkages between terrestrial and aquatic ecosystems. BioScience, 24(3):447-456.
- MARGALEF, R. 1980. Ecologia. Ed. Omega Barcelona. 1035 p.
- MARGALEF, R. 1983. Limnología. Ed. Omega. Barcelona. 1010 p.
- MOSELLO, R. 1984. Hydrochemistry of High Altitud Alpine Lakes. Schweiz Z. Hydrol. 46(1):87-99.
- MOLL, R.A. Y E.F. STOEMER. 1982. A hypothesis relating trophic status chlorophyll maxima of lakes. Arch. Hydrobiol. 94(4):425-440.
- NIE, N.H., C.H. HULL, J.G. JENKINS, K. STEINBRENNER Y D.H. BENT. 1975. SPSS; Statistical package for the social science. 2nd. Ed. McGraw-Hill, New York, 675 p.
- PLATT, T., L.M. DICKIE Y R.W. TRITES. 1970. Spatial heterogeneity of phytoplankton in a near-shore environment. J. Fish. Res. Bd. Can. 27:1453-1473.
- PLATT, R., K.L. DENMAN. 1975. Spectral analysis in ecology. Ann. Rev. Ecol. Syst. 6:189-210.

- PONCE, P.J. Y F.J.L. ARREDONDO. 1986. Aporte al conocimiento limnológico de un embalse temporal tropical, por medio de la aplicación de modelos multivariados. Ann. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM. 13(2): 47-66.
- POWELL, T.M., P.J. RICKERSON, T.M. DILLON, B.T. AGEE, D.A. GODDEN, Y B.J. DOZIER. 1975. Spatial scales of - current speed and phytoplankton biomass fluctuations in Lake Tahoe. Science. 189: 1088-1090.
- RADACH, G. 1982. Dynamic interacciones between the lower - trophic levels of the marine food web in relation to the physical environment during the Fladen - Ground Experiment Neth. J. Sea Res. 16:231-264.
- REID, G.K. Y R.D. WOOD. 1976. Ecology of inland water and estuaries. 12a. Ed. D. Van Nostand Company. New - York. 485 p.
- REYNOLDS, C.S. 1984. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press. London. 384 p.
- RICKERSON, P.J., P.J. NEALE, W. WURTSBAUGH, R. ALFARO, W. VINCENT. 1985. Patterns of temporal variation in lake Titicaca a high altitude tropical lake, I. Background, physical and chemical process, and - primary production. Hydrobiol.
- ROUGHGARDEN, J. 1979. Theory of population genetics and - evolutionary ecology; An introduction. McMillan Publishing. C.D. Inc. New York. 394 p.

ROUND, F.E. 1981. The ecology of algae. Cambridge Univ. Press.
London. 653 p.

SCHINDLER, D.W. 1978. Factors regulating phytoplankton -
production and standing crop in the world's -
freshwater. Limnol. Oceanogr. 23(3):478-486.

SCOTT, D. Y W.D. BILLINGS. 1964. Effects of environmental
factors on standing and productivity of an alpine
tundra. Ecol. Monogr. 34:243-270.

SNEDECOR, G W. Y COCHRAN, W.G. 1967, Métodos estadísticos.
Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V. México.
703 p.

STEINITZ-KANNAN, M., P.A. COLINVAUX Y R. KANNAN. 1983. -
Limnological studies in Ecuador:1; survey of -
chemical and physical properties of ecuadorian
lakes. Arch. Hydrobiol./Suppl. 65. (1):61-105.

STRATEN, G.V. Y HERODEK, S. 1982. Estimation of algal growth
parameters from vertical primary production -
profiles. Ecol. Mod. 15:287-311.

STRICKLAND, J.D.H. Y T.R. PARSONS. 1968. A practical handbook
of seawater analysis. J. Fish. Res. Bd. Can. -
Ottawa. 172 p.

TALLING, J.F. 1974. Comparative problems of phytoplankton
and photosynthetic productivity in a tropical and
a temperate lake. In: Goldman, C.R. (Ed.) -
Primary productivity in aquatic environments. Univ.

- of california. Press. USA. 3a. Ed. 399-424.
- THERRIAULT, J.C., Y T. PLATT. 1981. Environmental control of phytoplankton patchiness. Can. - J. Fish. Aquat. Sci. 38:638-641.
- THOMASSON, K. 1956. Reglections on arctic and alpine lakes. Oikos. 7(1)117-143.
- TILZER, M. N. 1973. Diurnal periodicity in the phytoplankton assemblage of high-mountain lake. Limnol. - Oceanogr. 18(1):15-30.
- VILLALPANDO, O. 1968. Algunos aspectos ecológicos del Volcán Nevado de Toluca. Tesis de Lic. UNAM.
- VINCENT, W.F. Y C.L. VINCENT. 1982. Factors controlling phytoplankton production in lake Vanda (77° S). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 39:1602-1609.
- VINCENT, W.F., C.L. VINCENT, M.T. DOWNES Y P.J. RICHEYSON. 1985. Nitrate cycling in Lake Titicaca (Perú-Bolivia): The effects of High-altitud and tropicality. Freshwat. Biol. 15 (1).
- Von BERTALANFFY, L. 1989. Teoría general de los sistemas. Fondo de Cultura Económica. México. 311 p.
- WETZEL, R.G. Y G.E. LIKENS. 1979. Limnological analysis. W.B. Saunders Company. Philadelphia. 353 p.

WROBLEWSKY, J.S., Y J.J. O'BRIEN. 1976. A spatial model of phytoplankton patchiness. Ecology. 31:161-175.

WURTSBAUGH, W.A., W.F. VINCENT, R. ALFARO TAPIA, C.L. _
VINCENT Y P.J. RICHERSON. 1985. Nutrient limitation of algal growth and nitrogen fixation in a tropical alpine lake, Lake Titicaca (Perú-Bolivia). Freshwat. Biol. 15(2)

YAN, N.D. 1983. Effects of changes in pH on transparency - and thermal regimes of Lohi Lake, near sudbury. Ontario. Can. Fish. Aquat. Sci. 40 (5):621-626.

APENDICE A

1	NUMERED	YES
2	FILE NAME	REG/PPA
3	RUN NAME	REGRESION MULTIPLE
4	COMMENT	REGRESION DATOS PROD. PRIM. ANUAL,
5		LAGO EL SOL, NEV. DE TOLUCA.
6	VARIABLE LIST	V1 TO V17
7	VAR LABELS	V1 = COBERTURA NUBOSA,
8		V2 = PRECIPITACION PLUVIAL,
9		V3 = TEMP. MEDIA DEL AIRE,
10		V4 = TEMP. MAX. DEL AIRE,
11		V5 = TEMP. MIN. DEL AIRE,
12		V6 = CLOROFILA A,
13		V7 = TEMPERATURA DEL AGUA,
14		VV8 = CONDUCTIVIDAD,
15		V9 = pH,
16		V10 = BIOXIDO DE CARBONO,
17		V11 = OXIGENO,
18		V12 = AMONIO,
19		V13 = NITRITOS,
20		V14 = NITRATOS,
21		V15 = FOSFATOS,
22		V16 = SULFATOS,
23		V17 = DUREZA,
24	INPUT MEDIUM	DISK
25	INPUT FORMAT	FIXED (5X,F4.2,1X,F4.2,1X,F4.2,1X,F5.2,
26		1X,F5.2,3)X,F5.3,12X/6X,F5.2,1X,F5.2,
27		1X,F4.2,1X,F5.3,1X,F5.3,1X,F5.3,1X,F5.3,
28		1X,F5.3,1X,F5.3,1X,F5.3,1X,F5.3).
29	N OF CASES	UNKNOW
30	LIST CASES	CASES = 12/VARIABLES = V1 TO V17
31	MISSING VALUES	V6 (1111)
32	REGRESSION	VARIABLES = V1 TO V17/
33		REGRESSION = V6 WITH V1 TO V5, V7 TO
34		V17 RESID = 0/
35	STATISTICS	ALL
36	READ INPUT DATA	
37	FINISH	