



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**SIMULACION MATEMATICA DE LA PRODUCTIVIDAD
PRIMARIA EN TRES LAGUNAS COSTERAS DEL
ESTADO DE GUERRERO, MEXICO.**

T E S I S

Que para obtener el Título de
B I O L O G O
P r e s e n t a

JOSE LUIS GONZALEZ JAIME



México, D. F.

1985



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 GENERAL

| | PÁGINA |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| RESUMEN | 1 |
| I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 4 |
| II. ANTECEDENTES | 9 |
| III. METODOLOGÍA Y AREA DE ESTUDIO | 10 |
| IV. CONSIDERACIONES GENERALES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA. | 21 |
| A. EFECTOS RADIATIVOS. | 21 |
| B. EFECTOS TERMODINÁMICOS. | 25 |
| C. EFECTOS DINÁMICOS | 27 |
| D. EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA. | 29 |
| E. RESPIRACION. | 31 |
| V. CONSIDERACIONES GENERALES DE SIMULACIÓN MATEMÁTICA EN LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA. | 32 |
| VI. CONSIDERACIONES DE SVERDRUP. | 42 |
| VII. APLICACIÓN Y COMPARACIÓN EN LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE: | 48 |
| A. MODELO DE PRODUCTIVIDAD DE STEELE. | 48 |
| B. MODELO DE PRODUCTIVIDAD DE SMITH. | 51 |

PÁGINA

VIII. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

59

IX. BIBLIOGRAFÍA.

71

RESUMEN

Para el presente estudio se utilizaron los modelos matemáticos en productividad primaria de Steele (1976) y Smith (1980), así como las consideraciones de Sverdrup (1953).

Este trabajo se llevó a cabo de la información generada por Klimek (1978) de datos hidrobiológicos y dinámicos del Sistema Lagunar Costero (Nuxco-Coyuca-Chautengo) durante los años 1976 y 1977. Los modelos señalados anteriormente revelan algunas de las condiciones físicas y biológicas como pueden ser:

- La productividad (P) es directamente proporcional a la intensidad de radiación solar (I_0), cuando no existe limitación por nutrientes.
- La máxima productividad se obtiene a escasos centímetros de la superficie acuática, no importando que tan someras sean éstas lagunas.
- La profundidad crítica (D_{cr}) es proporcional al coeficiente de extinción (Z_m) y además se consideran las condiciones meteorológicas (insolación, nubosidad y vientos) fundamentales, para el desarrollo del fitoplancton.
- La productividad aumenta en relación a la intensidad de radiación conforme transcurre el tiempo.
- Se confirman las razones proporcionales entre:

C: clorofila "a" y N: clorofila "a"

C: clorofilas totales y N: clorofilas totales

C: carotenoides y N: carotenoides

- La productividad, por el modelo de Steele (1976) confirma el potencial productivo, en primer lugar la Laguna Coyuca, le sigue Chautengo y por último Laguna de Nuxco.
- La tasa de crecimiento específico, por el Modelo de -- Smith (1980), manifiesta una regularidad simétrica horizontal con respecto al tiempo. La tasa de crecimiento es mayor por Laguna Chautengo, le sigue Laguna de Nuxco y un menor desarrollo encontrado en Laguna Coyuca.
- Se comprueba la afinidad simétrica para valores observados y calculados de producción por la razón carbono: clorofila "a" (θ).
- Los datos calculados para θ mantienen cierta linealidad con respecto al tiempo ($25 \text{ mg C/m}^{-3}/\text{d}^{-1}$).
- Los valores observados y calculados en la tasa instantánea de producción y crecimiento para la capa de mezcla mostraron gran afinidad con variación en el tiempo.
- Para las diferentes épocas del año, la única laguna que presentó mayor productividad que respiración es Coyuca ($P > R$).
- Al obtener la respiración y la tasa fotosintética condicionados por la insolación, las tres lagunas muestran -- gran linealidad.

De acuerdo a los puntos anteriores, el mejor modelo para representar la productividad es el de Smith (1980). Steele (1976), señala gran afinidad para la simulación pero debido a la escasa profundidad de las lagunas no se obtuvo mayor información puntual de la profundidad, siendo determinante esto porque el modelo contempla la producción para la columna de agua. Para las consideraciones de Sverdrup (1953), la profundidad crítica es la parte medular en la simulación y su significado, para ambientes acuáticos costeros, no revela la misma información que para sistemas acuáticos estables, esto es, a medida que la profundidad crítica se abate la productividad aumenta existiendo un florecimiento en la primavera.

Cabe destacar que los dos modelos de simulación y las consideraciones del problema no han sido abordados para sistemas costeros, siendo únicamente analizados para ecosistemas marinos.

Por lo tanto la presente contribución ayudará a discernir entre un modelo y otro en la aplicación de datos físicos y biológicos esenciales para el entendimiento funcional de ambientes acuáticos costeros.

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

La importancia que tiene conocer el potencial productivo de las lagunas costeras en México, en todos sus niveles tróficos, es cada día mayor y se hace más necesario - utilizar métodos de evaluación matemática para un óptimo - manejo de estos recursos. De esto podrá hacerse una mejor optimización en su aplicación y explotación sobre la ecología costera, Lankford (1977).

Con procedimientos y políticas de desarrollo adecuadas a la región, los beneficios se sumarán para resolver - los requerimientos y necesidades de los pobladores. Por - lo tanto, la resultante esperada será la de un mayor nivel nutricional y de vida que se tendrán que contemplar dentro de un contexto de integración total.

Para lograr estos objetivos, se requiere que se lleven a cabo trabajos de investigación multidisciplinarios - que aporten nuevas ideas para coadyuvar al interés de la ciencia sobre problemas ecológicos regionales, Alvarez-Borrego y Nájera (1979).

Es bien sabido que cuando no se han llevado a cabo estudios preliminares en una localidad dada, tanto de productividad primaria como secundaria y apoyados de manera simultánea por trabajos físicos, químico-biológicos y geológicos, se han dado las llamadas catástrofes ecológicas, originadas por pasar por alto el conocimiento inicial y en sus diversas manifestaciones, cómo y de qué forma es que lo en-

cierra aquel ambiente acuático.

Describir estos estudios con infraestructura matemática, ofrece un campo abierto para la metodología y la simulación matemática. Es entonces cuando el deseo va más -- allá del umbral del conocimiento cualitativo y se requiere un esfuerzo extra sobre el ejercicio de los datos de campo, es decir, la integración de la información ecológica interpretada de manera cuantitativa.

La construcción de los modelos, implica el estudio -- comparativo de los fenómenos naturales, que es una de las tareas imprescindibles de la labor científica. Las características de estos modelos descriptivos, es propiamente -- la elaboración de un modelo de la naturaleza que tiene como papel central, el conocimiento y control de alguna parte del universo (Ritter, 1979).

Cualquier modelo encierra una pregunta que se le hace a la naturaleza, la cual dependerá de qué tan buena o mala sea ésta, de acuerdo al grado de precisión de tal pregunta. Es por esto que cuando los datos son escasos o no representan la verdadera información del fenómeno, de acuerdo al método utilizado, el modelo que se está formulando estará muy lejos del problema real. La formulación de tal pregunta, la cual siempre resulta abstracta, implica ya el planteamiento del modelo; Rosenblueth (1981). (Figuras 1 y 2)

La validez del modelo está determinada por la fidelidad de la simulación, esto quiere decir, de que tan bien

responde a la mímica real del sistema (Dale, 1970); a la vez depende del criterio de precisión con el cual ciertas características son comparadas (Goodall, 1972). Con todo, la validez del modelo nunca es absoluta, si bien limitada.

El empleo del lenguaje matemático aplicado a la ecología, como en toda ciencia natural, ha venido cobrando gran fuerza con el poder del uso de las computadoras y la habilidad del científico para manipular las variables, escogiendo de esta forma las más ideales para su uso en la simulación, Enggvist y Syoberg (1980).

Las figuras 1 y 2 , forman parte del elaborado proceso en la aplicación de los modelos descriptivo y teórico.

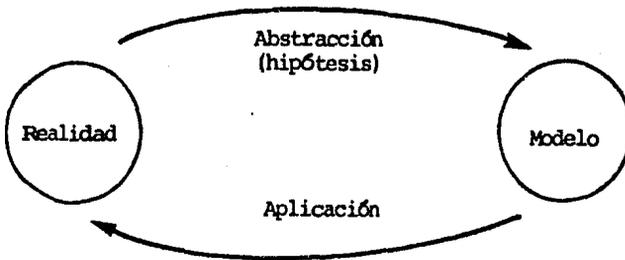


Figura 1 . Pasos en la simulación de Rosenblueth (1981):

MODELO DESCRIPTIVO

MODELO TEORICO

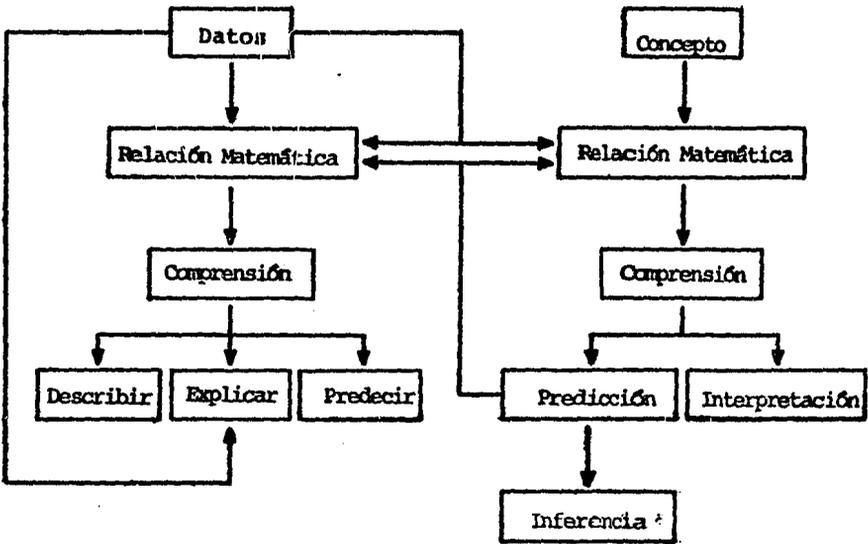


Figura 2. Comparación en la interpretación del modelaje, Rosenblueth (1981).

Se debe tomar en cuenta que el potencial productivo, para una comunidad pesquera, es determinante ya que es la principal fuente de alimento que abastece a la región.

Considerando lo anterior se calcula que en la República Mexicana, existen 12,555 Km² de lagunas costeras, (Cárdenas, 1969) y por su dimensión y comportamiento las podemos clasificar de excepcionales, (Laukford, 1977). Sin embargo, muchas de estas lagunas se encuentran en un estado lamentable de explotación y en peligro latente de la amenaza de la contaminación (Yáñez, 1978).

Es aconsejable que éstos sistemas acuáticos costeros, sean estudiados en forma integrada con una visión multidisciplinaria, donde la hidrobiología, la biometeorología, geología, pesca, etc. den un mejor entendimiento de su dinámica. Con estas consideraciones debe determinarse un equilibrio en términos cuantificables expresados en fórmulas matemáticas y llevados en síntesis, sobre los modelos ecológicos. Estos modelos son herramientas útiles que permiten construir, de datos, una representación real del sistema.

El objetivo del presente trabajo es determinar, mediante procesos de simulación matemática, la productividad primaria de tres lagunas costeras (Nuxco, Coyuca y Chautengo) que forman parte del Sistema Lagunar del Estado de Guerrero, (Klimek, 1978); utilizando consideraciones de Sverdrup (1953); en el mar y con modelos Steele (1976), Smith (1980) que están en función de parámetros ambientales como son principalmente insolación, temperatura y viento y biológicos como clorofilas.

II. ANTECEDENTES.

Contribuciones significativas se han realizado en el estudio del Sistema Lagunar Guerreroense, abarcando aspectos de tipo Geológico y Geomorfológico, Lankford (1974, 1975), Lankford, et al (1974), Carranza, et al (1974), de tipo hidrográfico Arpi, et al (1974), Castellanos (1975), así como numerosos trabajos en el aspecto biológico. Además existen contribuciones para la parte química con explicaciones estadísticas presentadas por De la Lanza (1981), para la laguna de Huizache, Caimanero, Sinaloa, Méx. Sin embargo, independientemente de las contribuciones particulares de cada disciplina al mejor conocimiento de este Sistema Lagunar, se puede decir que, el aspecto multidisciplinario con medidas *in situ* no ha sido logrado, posiblemente es debido a las dificultades que presentan los diversos tipos de muestreo utilizados como estándares universales, -- por lo cual se puede decir que este aspecto no ha sido integrado con toda la magnitud deseada.

Se considera que el autor que más se aproxima al objetivo planteado en el estudio de productividad primaria e hidrodinámica, es el realizado por Klimek (1978), por lo que se utilizará éste como la fuente de información básica necesaria para llevar a cabo los modelos de simulación matemática, aplicados a una zona costera mexicana.

III. METODOLOGIA Y AREA DE ESTUDIO.

Para el presente estudio se consideró la información contenida en Klimek (1978). Dicha información incluye, entre otros:

- Determinación de la Productividad Primaria
- Evolución de Oxígeno disuelto.
- Determinación de los nutrientes.
- Aspectos de la hidrodinámica del Sistema Lagunar Costero.

Este análisis hidrobiológico se encuentra referido *in extenso* en Klimek (1978).

Para los modelos de simulación en la productividad -- primaria se utilizó a Steele (1976) en donde los elementos esenciales para el modelaje son: la insolación, la producción máxima, el coeficiente de extinción y la profundidad de la capa de mezcla. El modelo de Smith (1980), considera para la simulación: la temperatura, el radio carbono: clorofila, el coeficiente de extinción, la profundidad de capa de mezcla y la insolación para encontrar la producción y el crecimiento del fitoplancton. Se incluyen dos consideraciones que son fundamentales en la productividad primaria: Ryther (1959) tiene su principio en los efectos radiativos que determinan el desarrollo del fitoplancton; y Sverdrup (1953) que participa con la profundidad crítica determinándose esencial barrera física en la producción. Así mismo, se incluyen consideraciones generales físico-

biológicos y de Simulación Matemática, para un mejor entendimiento en el desarrollo de Modelaje de la Productividad Primaria.

La zona costera del Estado de Guerrero, tiene una longitud aproximada de 475 Km, desde la desembocadura del Rfo Balsas en el norte a Punta Maldonado en el sur. (figura 3). Las lagunas en estudio se encuentran localizadas entre las siguientes coordenadas: (Figuras 4, 5, 6, 7, y 8).

| | 1) Latitud | 2) Longitud | 3) Superficie |
|------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------|
| Laguna Nuxco | 17° 74' N | 100° 47' W | 5.5 km ² |
| | 17° 64" S | 100° 49" W | |
| Laguna Coyuca | 18° 22' N | 99° 58' W | 34 Km ² |
| | 18° 11' S | 100° 08' W | |
| Laguna Chautengo | 17° 02' N | 99° 02' W | 34 Km ² |
| | 16° 89' S | 99° 09' W | |
| | 4) Orientación | 5) Ubicación | |
| Nuxco | Noroeste-Suroeste | 20 Km. Norte del Pueblo Nuxco y frente al Pueblo "El 20". | |
| Coyuca | Oeste-Este | Noroeste de Acapulco | |
| Chautengo | Oeste-Este | Entre Rfo Copala y Rfo Nexpa. | |

La costa guerrerense presenta características fisiográficas muy diversas pudiendo ser agrupadas en dos gran-

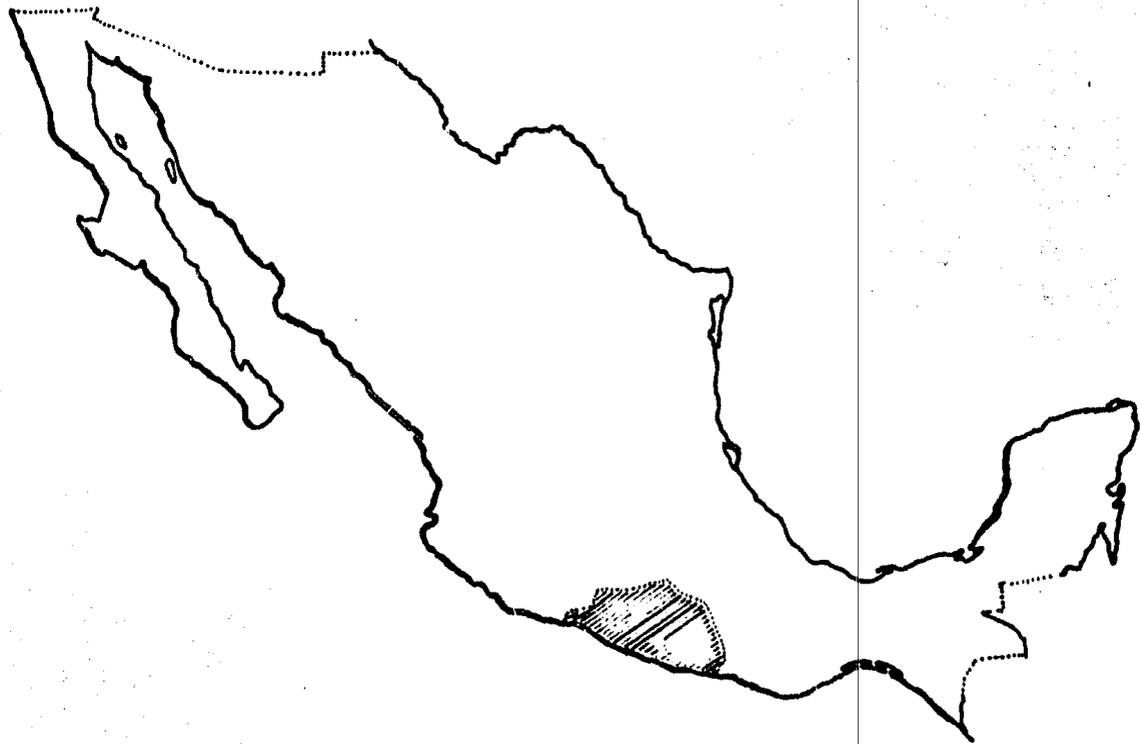


FIGURA 3. Localización Geográfica del Estado de Guerrero.

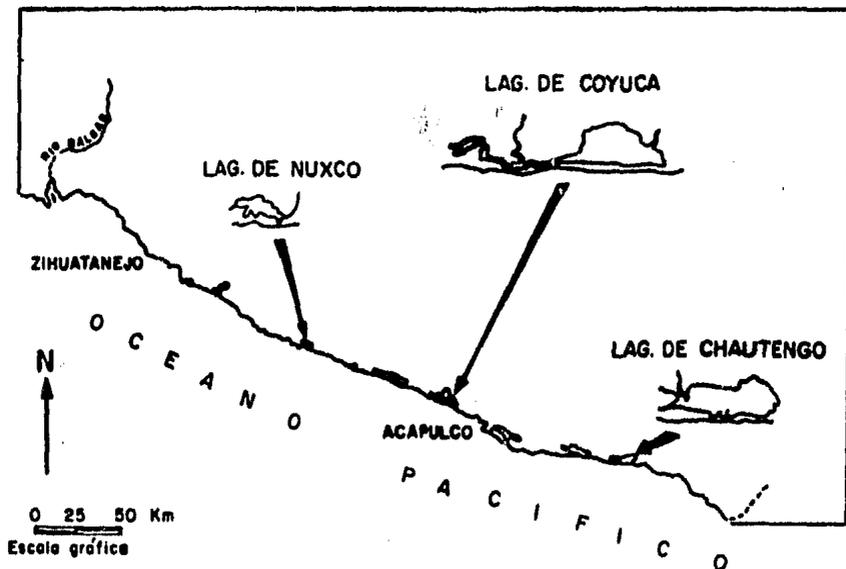


FIG. 4 . Situación geográfica de las tres lagunas en estudio.

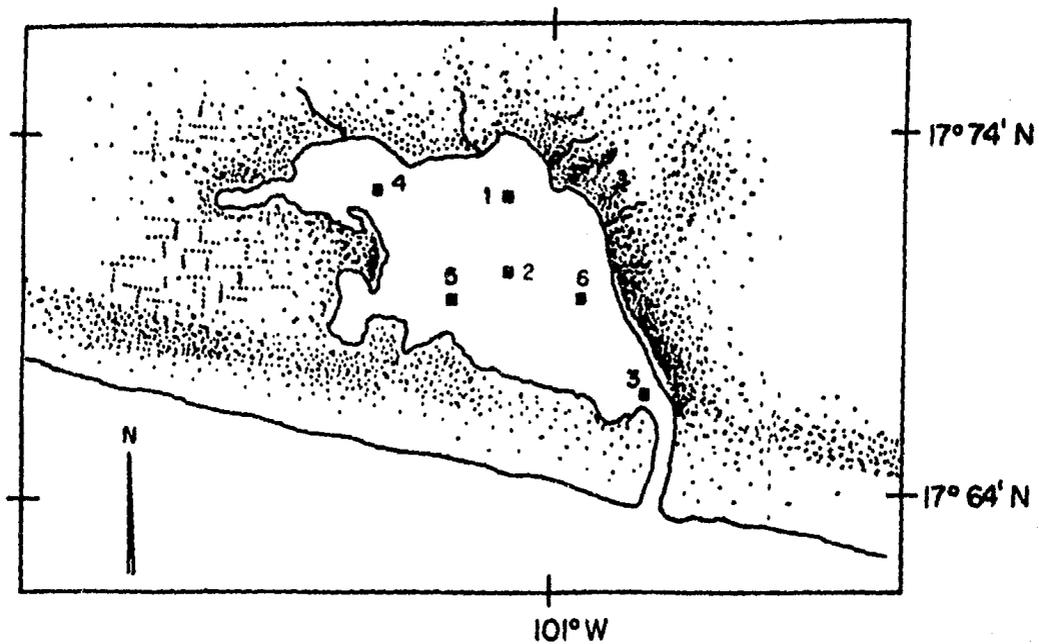


Fig. 5_ Localización de las Estaciones de Laguna Nuxco

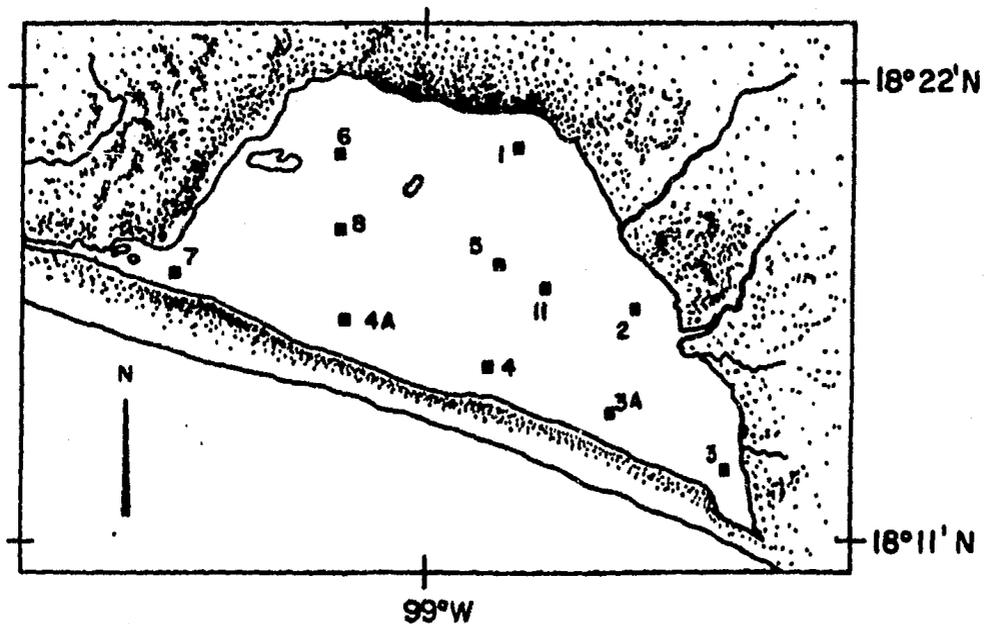


Fig. 6 _Localización de las Estaciones de Laguna Coyuca.



Fig. 7 _ Localización de las Estaciones de Laguna Chautengo (1976)

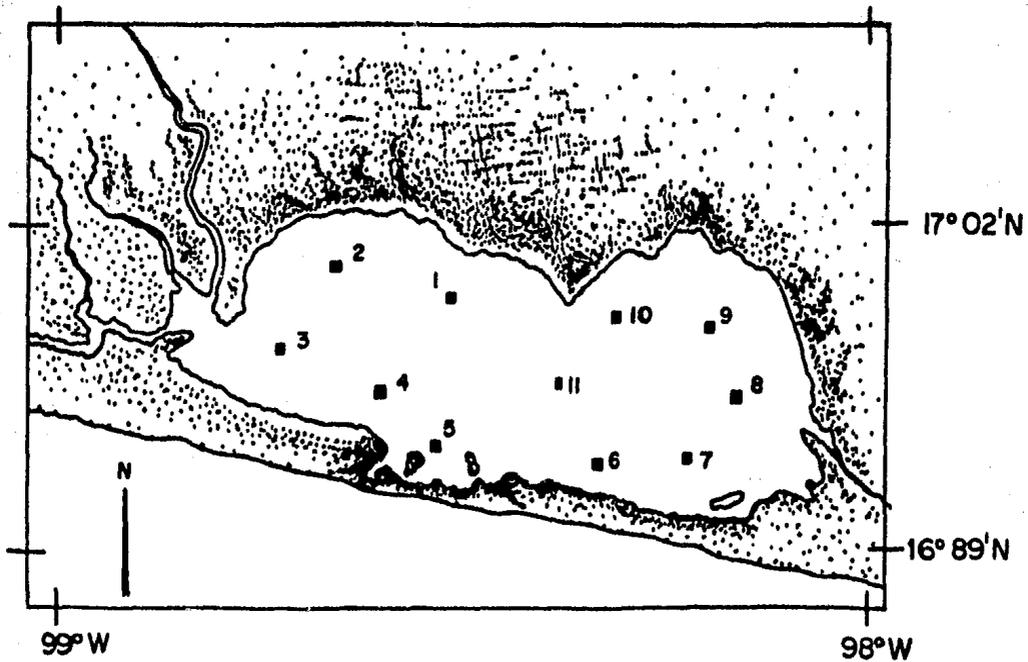


Fig. 8.- Localización de las Estaciones de Laguna Chautengo (mayo 1977)

des sistemas, Lankdord (1974):

A) Sistema litoral rocoso, que abarca cuatro zonas con extensiones de 5 a 20 Km, de longitud a lo largo de la costa, predominando sobre éstas las costas montañosas acantiladas.

B) Sistema litoral lagunar, que comprende casi toda la costa Guerrerense, formado por llanuras y lagunas costeras, de aproximadamente 98° a 101° Latitud W y 16° a 18° Longitud W.

El clima durante el período de este estudio (1976-1977) fue de un promedio del tipo $A_w, (w)_i$; y que de acuerdo a la clasificación de Köpen corresponden a:

A_w = Sub-húmedo con lluvias en verano y p/T entre 43.2 y 55.3 p.p.

(W) = Lluvias en invierno, menores del 5%

i = Clima isotérmico (oscilando con rangos de menos de 5°C).

Es indispensable hacer notar que es necesario para cada laguna, una clasificación más detallada del clima de -- acuerdo al Sistema Thornwaite, ya que como se sabe la productividad depende en buena parte de las condiciones climatológicas predominantes.

Región de Nuxco: A (a) c (ip)

A (a) = Caliente sin Invierno

c = Sub-húmedo

i = Invierno seco

p = Primavera seca

Región de Coyuca: A (a) B (ip)

A (a) = Caliente sin Invierno

B = Húmedo

i = Invierno seco

p = Primavera seca

Región de Chautengo: A (a) C (oip)

A (a) = Caliente sin Invierno

C = Sub-húmedo

o = Otoño seco

i = Invierno seco

p = Primavera seca

El origen de las lagunas es inherente a la productivi--
dad del sistema acuático, por lo tanto se hará una breve -
descripción de la génesis del sistema lagunar (Lankford, -
1977).

El origen de las lagunas es a partir de depósitos del
Cuaternario clásico (Aluvial y depósitos de playa), habiéndose
formado sobre la planicie costera cuando los valles y
ríos originales fueron labrados y el nivel del mar fue muy
bajo durante el Pleistoceno tardío; subiendo de nivel du--
rante la era postglacial (Lankford, 1977).

Las olas erosionaron la superficie profunda, formando
el sedimento dentro de una isla de barrera primitiva. Por
consecuencia, el nivel del mar continuó ascendiendo y la
barrera fue elevándose por acción de las olas, originando

un complejo cinturón de cerros de playa. Subsecuentemente el sedimento de los ríos bloqueó la conexión directa con el mar y permitió la formación de un complejo deltaico de canales y lagunas. En base a esto se formó el Sistema Lagunar siguiente:

Laguna Coyuca-Río Coyuca-Laguna Mitla-Río Atoyac-Laguna Tular-Río Texpan-Pantano Tenexpa-Río Nuxco-Laguna y Pantano Copala-Río Copala-Laguna Chauntengo-Río Nexpa-Complejo Lagunar Tecomate.

IV. CONSIDERACIONES GENERALES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA.

A. EFECTOS RADIATIVOS.

La luz es un factor importante para los organismos por dos razones. Una, es que es usada como un estímulo en ritmos estacionales y diarios, en animales y plantas. La otra es porque lleva a cabo los procesos fotosintéticos, que son esenciales en la vida diaria de cualquier organismo fotoautotrofo (Patterson y Hoglund, 1934). (Figura 9).

El color verde, de la mayor parte de los vegetales, se debe a la presencia de clorofila en sus células, pigmento que la planta utiliza en la fotosíntesis, definiendo ésta como la producción de hidratos de carbono sencillos, y formación de protefmas por la acción de la luz a partir de los compuestos inorgánicos, anhídrido carbónico y agua (Echlin, 1966).

La fotosíntesis es el origen de la energía básica de toda actividad biológica. El hombre debe a este fenómeno la obtención de sus alimentos y de los carburantes naturales almacenados en el interior de la tierra. Cada año, aproximadamente 1×10^{11} toneladas de anhídrido carbónico se convierten en hidratos de carbono, por medio de la fotosíntesis y por lo que se refiere a la conversión energética dicha cantidad es mucho mayor que toda la energía que la humanidad transforma normalmente a partir de los

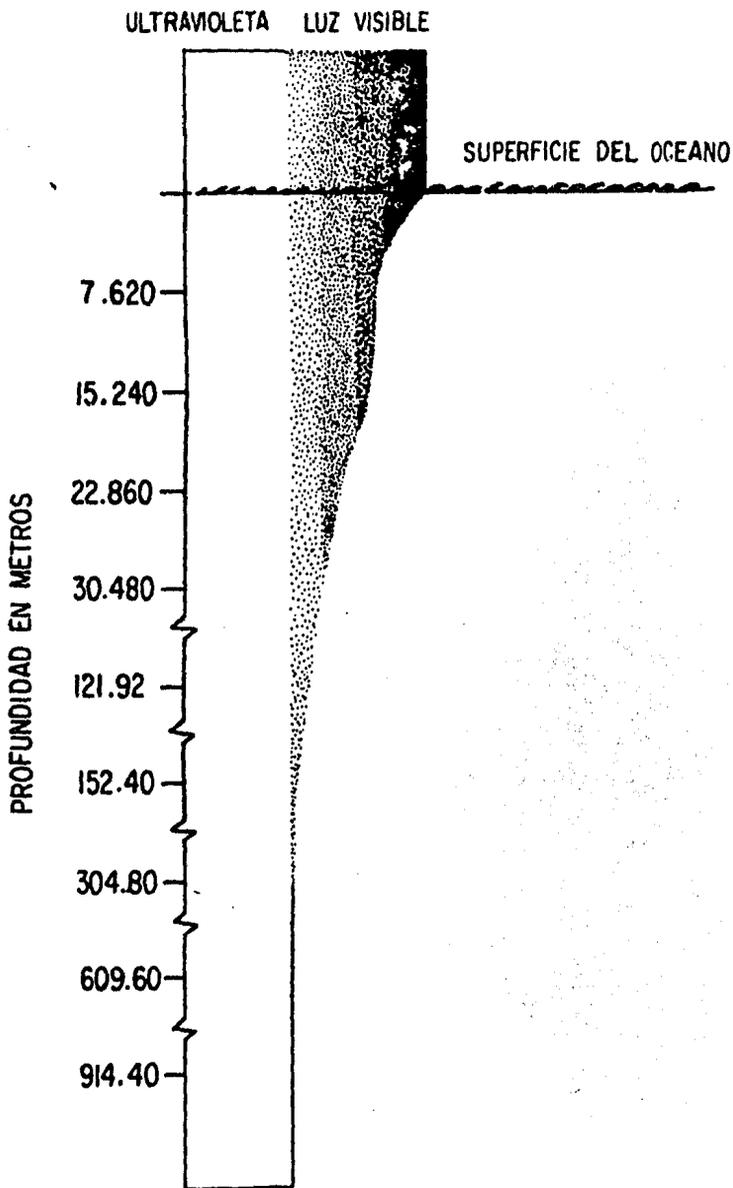
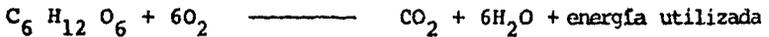


Fig. 9. Absorción de las ondas de luz a través de la superficie del agua.

carburantes naturales (Commoner, 1980). Una producción de energía almacenada, que comprende el proceso fotosintético lleva a cabo la conversión de CO_2 , agua y energía lumínica en oxígeno libre y monosacáridos de alta energía.

Es importante enfatizar el fenómeno de la fotosíntesis Echlin (1966), ya que de este dependerá la productividad, la producción, la tasa de crecimiento celular del fitoplanc_uton en relación directa con las variables ambientales que determinarán el comportamiento del ecosistema. La fijación fotosintética del dióxido de carbono y su liberación por -respiración, es la síntesis de la capacidad productiva. A través de la respiración, se efectúa la oxidación de los compuestos producidos en la fotosíntesis liberándose energía para llevar a cabo los procesos bioquímicos de la plan_{ta}:
ta:



Durante los procesos fotosintéticos de óxido reducción y respiración, la energía es conservada en forma de ATP -- que es la unidad básica de intercambio de energía de todas las células vivas. Esta a su vez prende una reacción fotoquímica (Reacción de Hill), que ocurre en presencia de luz y otra termoquímica ó fase oscura, como se vió en la reacción anterior.

Las radiaciones del espectro visible tienen la energía adecuada para ordenar la biosfera (Cereijido, 1978). En el

tiempo en que el átomo receptor está excitado, la probabilidad de asociarse a otro y formar una molécula más compleja, es mucho mayor que cuando no lo está. En el ultravioleta de energía resulta excesiva (en el electrón del átomo receptor se excita tanto que se escapa del átomo y éste se ioniza). Sin embargo, el infrarrojo tiene una energía suficiente (el átomo que recibe la radiación vibrará más intensamente, pero la influencia que sufre no es lo suficientemente intensa, para excitar a los electrones de sus órbitas). Por lo tanto estas gamas de radiación solar no sirven para formar moléculas biológicas complejas, Hutchinson y Bowen (1950).

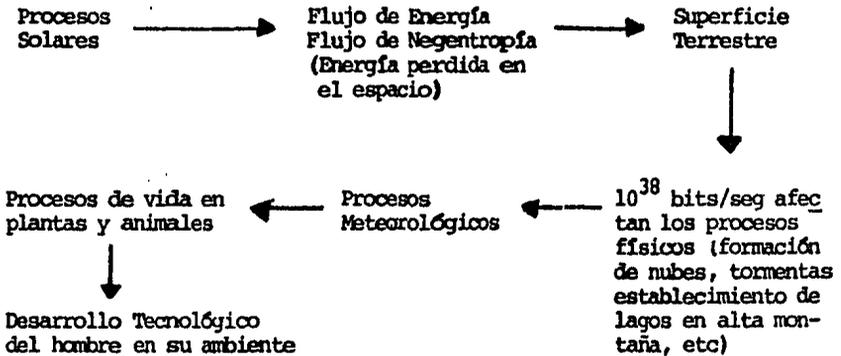
En la pirámide de producción, parte de la energía solar es usada (10-20%) para los niveles tróficos superiores y una mayor cantidad es degradada para realizar reacciones químicas y efectuar trabajo (Steele, 1976). Al ambiente se regresa 80 ó 90% como calor ó entropía.

Cuando el flujo de radiación solar, penetra sobre la superficie acuática, ésta absorbe selectivamente el haz luminoso, ocurriendo el mínimo de absorción en aproximadamente 0.47 nm (azul); el ultravioleta es absorbido y al final del rojo del espectro se da la principal absorción, observándose que en el infrarrojo, aproximadamente el 90% del flujo solar es absorbido en el primer metro, convirtiéndose en energía térmica utilizada por los organismos. La dispersión y absorción solar se hacen más importantes cuando aumenta el contenido de sustancias disueltas y suspendidas en el agua.

La absorción es fuerte en el violeta y moderada en el azul, con grados de absorción moderado en longitudes de onda entre los 470-700 nm y débil a mayores longitudes de onda.

B. EFECTOS TERMODINAMICOS.

Los fenómenos térmicos reflejados en el balance de calor y el de energía sobre la superficie de la tierra, indican los siguientes procesos; Scot (1965):



Por consecuencia son de primordial importancia los -- efectos termodinámicos sobre el ambiente, tanto atmosférico como acuático, manifestándose a través de los procesos de transporte como la conducción, convección, advección y radiación y de transformación de energía (evaporación, condensación y precipitación).

Sobre la interfase aire-agua, el mar y cualquier cuerpo

de agua gana y pierde calor, como consecuencia lógica de su balance energético; entre esta transición de energía se forman dos tipos de regímenes térmicos dados por la interacción entre las aguas superficiales y parámetros meteorológicos:

a) El Sistema Homogéneo.- Caracterizado por la ausencia de gradientes verticales de temperatura a la vez que existe un completo mezclado.

b) El Sistema Heterogéneo.- Influenciado por una estratificación debido a la transferencia interna de energía -- térmica provocado por la interfase aire-agua.

Se supone que la profundidad a la cual la variación -- diurna es perceptible, dependerá enormemente de la estratificación del agua. En las regiones en donde la evaporación predomina sobre la precipitación, se produce un incremento en la densidad ocasionando hundimientos de las capas superficiales y ascensiones de las profundas para así aumentar la productividad (Ritter y Guzmán, 1979).

Los efectos termodinámicos sobre las lagunas implican la medición del conjunto de algunos parámetros como: momento de calor, temperatura, etc. que deben medirse y tienen que tomarse en cuenta porque afectan directamente la productividad y el balance energético (Scot, 1965).

Para cualquier cuerpo de agua, la temperatura tiene gran importancia, en el desarrollo en la producción de co-

comunidades fitoplanctónicas (Smith, 1980).

La temperatura esta en función de varios factores meteorológicos; entre los que se pueden señalar como responsables en el cambio de la temperatura superficial están los siguientes:

- a) La cantidad de radiación que incide y penetra en la superficie del agua.
- b) Flujo de energía entre la frontera aire-agua.
- c) Advección de calor por vientos principalmente.
- d) Efectos de mezcla originado por el aporte hidrológico terrestre.
- e) Movimientos convectivos.

C. EFECTOS DINAMICOS.

Los movimientos horizontales del aire sobre la superficie tanto de la tierra como del agua y en la atmósfera en sí, crean un movimiento dependiente de un gradiente de presión, el cual queda establecido a través de incesantes interacciones de altas y bajas meteorológicas. Este forcejeo es la base de todos los vientos para ajustar dinámicamente la distribución de calor y densidad.

El flujo de aire entre celdas de convección, es modificado e influenciado por (Tood, 1970):

- a) Rotación de la Tierra
- b) Fricción Superficial

- c) Factores locales de temperatura y convección térmica.
- d) Movimientos frontales.
- e) Naturaleza y topografía de la superficie terrestre.
- f) Dirección y velocidad de los vientos locales.

Los vientos como sistemas locales y estacionales, son de primordial importancia porque provocan corrientes horizontales y verticales (efectos de advección y convección, respectivamente), encargados de transportar los nutrientes que son indispensables para el crecimiento y sostén de la comunidad biológica sobre áreas productivas.

Por otro lado, la capa de mezcla en el potencial productivo lagunar, es de primer orden. Aunque las lagunas sean prácticamente superficiales hay que tomar en cuenta el mezclado (homogéneo principalmente). Esta capa de mezcla interfiere de diversas formas tanto en la productividad como en especies bentónicas de la siguiente manera; Sverdrup, et al (1942):

1. Penetración de radiación.
2. Distribución de elementos biogeoquímicos
3. Migraciones de intercambio entre las capas superiores e inferiores.

La capa de mezcla puede ser producida por los siguientes efectos físicos.

1. La creación de corrientes superficiales originadas por el viento que además determina su circulación.

2. La evaporación enfría la capa superficial estableciendo corrientes de convección, fenómeno que principalmente afecta la productividad en primavera y verano.
3. Tasa de cambio de la temperatura media.
 - a) fuentes de calor positivas (radiación solar incidente).
 - b) fuentes de calor negativas (evaporación, calor sensible, radiación reflejada, etc.)
4. Efectos de advección.
5. Efectos de convección.
6. Distribución de calor por mezclado turbulento.

Otro factor importante, es la turbulencia. Las agrupaciones o parches fitoplanctónicos, bajo condiciones asociadas con vientos débiles o moderados, provocan que las aguas superficiales formen vórtices paralelos. Entre éstos hay regiones de hundimientos en los cuales se acumula material -- flotante, que concentra organismos que tratan de llevarlos hacia abajo. Un tipo similar de circulación se lleva a cabo en las fronteras de aguas de diferente salinidad, que es tal y como ocurre donde desembocan ríos y lagunas costeras (Ritter y Guzmán, 1979).

D. EFICIENCIA FOTOSINTETICA.

La tasa fotosintética de las plantas y la intensidad de la luz, respecto a la profundidad, están en función de la transparencia del agua e incidencia de la radiación en

superficie. Esta dependencia es una proporcionalidad irremplazable (Kiley, 1946), aunque ésta proporcionalidad sea - llevada a bajas intensidades. Existe un nivel en el cual la tasa fotosintética (18.5%) es un máximo y en donde la fotosíntesis es inhibida; demostrado en el mar por Jenkins (1937) Steelman-Nielsen y Densen (1957), y en el laboratorio por Rabinowitch (1951). Este grupo de experimentos han permitido construir una fórmula para la tasa fotosintética que puede ser inferida en términos de la intensidad de luz en la superficie, el coeficiente de extinción y la concentración de clorofilas. (Ryther, 1959).

En la producción cuántica fotosintética, se llevan a cabo los procesos físico-químicos de la reducción de una mole de CO_2 para formar carbohidratos que requieren una energía aproximadamente de 112 Kcal (Ryther, 1959). Tan sólo tres quantums de luz visible, son necesarios para reducir una molécula de CO_2 , sin embargo los bioensayos fisiológicos demuestran que el requerimiento cuántico está entre 8 y 12; por lo que una medida estándar aproximada es de 10 para - el rango del visible (400-700 nm). En cuanto a la eficiencia fotosintética algunas medidas muestran que del 95 al 99% de la energía absorbida por las plantas, se pierde como energía calorífica, con lo cual sólo se emplea para fotosíntesis del 1 al 5%; por consecuencia un valor medio es del 2% para eficiencia fotosintética (Ryther, 1959).

E. RESPIRACION.

Por otro lado, la respiración como aspecto limitante en la producción es decisiva, (Sverdrup, 1953).

La razón de fotosíntesis máxima a respiración es de 10:1, (Ryther, 1956; Steelman-Nielsen y Jensen, 1957). Sin embargo, una vía más rápida y natural para cuantificar la respiración por unidad de carbono en la planta es a través del pulso metabólico dado por la temperatura (T°). En el presente estudio, uno de los modelos contempla este parámetro como vía de cuantificar el crecimiento dados por los datos experimentales y el análisis computacional de las asociaciones naturales del fitoplancton.

V. CONSIDERACIONES GENERALES DE SIMULACIÓN MATEMÁTICA EN LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA.

Los eventos naturales son complejos para comprenderlos o estudiarlos en todos sus aspectos. Rosenblueth (1981), menciona que se debe abstraer o singularizar determinadas variables del complejo para su estudio. Al hacer esta --abstracción desde el principio se organiza un modelo idealizado del objeto. Ejemplo de esto se tiene en las figuras 1 y 2.

Aunque los modelos puedan parecer extremadamente complejos, son elaborados de consideraciones matemáticas muy simples y distribuciones estadísticas que representan las funciones, interrelaciones y valores atribuidos al ecosistema del mundo real. Estas consideraciones son trasladadas al lenguaje de la computadora para permitir la simulación del sistema. La simulación numérica es la técnica capaz de representar la complejidad de dicho sistema. El método de los modelos tiene a comprobar hipótesis y de entre las tres formas de comprobación; el primero investiga la idoneidad de los parámetros, por ejemplo, la dependencia fotosintética/intensidad de luz. El segundo, abarca la trama general del trabajo de investigación; y la tercera forma de comprobación es la de la adecuación general del modelo a los datos reales observados, que sin embargo, son a menudo pocos en exceso frente a los múltiples grados de libertad que abarca la complejidad del mo-

delo (Cushing, 1975).

Una breve historia acerca de los modelos numéricos, podrá dar idea de como con el paso del tiempo, fueron perfeccionándose, aumentando su complejidad por cada variable que se introducía al sistema.

Lohman (1908), realizó el primer estudio cuantitativo del ciclo de producción acuática, basado en su modelo. Ross (1910), plantea las primeras ecuaciones para describir cambios en el número poblacional. Lotka (1925) y Volterra (1926), en sus modelos más generales carecían de carácter analítico. Flemming (1939) describió el ciclo de producción de un modo formalmente analítico, como sigue:

$$\frac{dP}{dt} = P [R - (G_0 + Cgt)] \quad (1)$$

Donde P, es la cantidad de algas en el mar (carbono ó clorofila por unidad volumétrica); R, es la tasa de reproducción de las algas (como coeficiente instantáneo); G₀, es la mortalidad inicial para pastoreo; cg es la tasa de incremento del pastoreo en función del tiempo; t es el tiempo en días. Para condiciones estacionarias.

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$R - G_0 = cgt \quad (3)$$

por lo tanto,

$$l_n \left(\frac{Pt}{Po} \right) = (R - G_0) t - \frac{cgt^2}{2} = cgt \left(T - \frac{t}{2} \right) \quad (4)$$

$$cg = 2 l_n \left(\frac{Pt}{Po} \right) / t (2 T - t) \quad (5)$$

Esto significa que conocido el valor máximo del ciclo de producción, el tiempo necesario para su desarrollo y una evaluación de la tasa de reproducción de las algas, es posible calcular la producción total para cualquier periodo de tiempo. El ciclo se describió según dos exponentes R, ó tasa de reproducción de algas y G, la tasa de pastoreo, este último aumenta con el tiempo y cuando $R > G$, la curva de producción aumenta con el tiempo y cuando $R < G$ disminuye, si $R = G$ la producción alcanza su máximo. De esta forma, el modelo es irreal en cuatro puntos:

1. La tasa de reproducción es constante; cuando lo probable es que crece a lo largo de la estación productiva.
2. Se admite que la tasa de pastoreo crece linealmente lo que puede subestimar la mortalidad al final del ciclo

ya que el zooplancton no aumenta linealmente sino sube hasta un máximo.

3. Existe la posibilidad de que las plantas no sean neutralmente flotantes y que por hundimiento dejarán la zona fótica donde la fotosíntesis excede la respiración.
4. Existen cambios en la fotosíntesis debido a la variación en la intensidad de luz.

Riley (1946) expresa la tasa de reproducción de algas de fotosíntesis y respiración y sus determinantes ambientales:

$$dP/dt = P (Ph - Re - G) \quad (6)$$

Donde Ph , es la tasa instantánea de reproducción de biomasa por fotosíntesis; y Re , es la tasa instantánea de pérdida de biomasa por respiración. Por lo tanto, es una variante del modelo de Flemming con $R = (Ph - Re)$. El modelo se ajusta poco a poco a las observaciones de esta manera, el incremento temporal en G del modelo Flemming se expresa aquí como incremento del zooplancton observado.

El modelo de Flemming (1939) sirvió para describir la curva de distribución normal, y el de Riley describe su modificación por los factores ambientales:

$$Ph = p'' I_0 \left[(1 - \exp(-Kz_m)) \right] / Kz_1 (1 - N'') V \quad (7)$$

Donde p'' , indica un coeficiente de dependencia de fotosíntesis con intensidad lumínica; I_0 es la radiación que alcanza la superficie para el espectro fotosintético (400-700 nm) medido en ly/min; K , es el coeficiente de extinción de la energía radiante fotosintética en el mar; z_m , la profundidad de la capa eufótica en metros (aproximadamente al 1% de la penetración lumínica fotosintética); $(1 - N'')$ como factor limitante de nutrientes que modifica la tasa de reproducción linealmente desde $0.55 \mu\text{g-at-Po}_4\text{-P/l}$ hasta cero, es decir $N'' = (0.55 - x) / 0.55$; V , es un factor de turbulencia vertical (como cociente de la capa eufótica/la profundidad de la capa de mezcla). La tasa respiratoria viene dada por $Re = 0.0175 \exp. 0.069 T$, donde T es la temperatura absoluta. La tasa de pastoreo viene dada por $Gh = gh$, donde h , es el peso de herbívoros por unidad de volumen; es un coeficiente basado en las experiencias sobre respiración en Marchall y Orr (1935); de hecho los herbívoros tomaban 7% de su propio peso/día en alimento. Este modelo resulta más complicado que el de Flemming; su gran virtud es que la detallada modulación ambiental de la tasa de reproducción de las algas por la insolación media se expresa así:

$$\frac{(1 - \exp(-Kz_1))}{Kz_1}$$

la respiración se expresa por la temperatura y la tasa de producción de algas por la mezcla vertical y limitación de nutrientes, esto último fue de los resultados obtenidos sobre la experimentación llevados a cabo por Ketchum (1963b).

La aplicación del modelo de Riley se hizo en forma escalonada donde:

$$P_1 = P_0 \exp (Ph - R_0 - G) t \quad (8)$$

Donde P_0 y P_1 , son cantidades de algas en los tiempos t_0 y t_1 respectivamente. Se cambiaron los exponentes en cada nuevo paso de integración, de acuerdo a cambios en las condiciones ambientales obteniéndose datos reales ajustados a las teóricas. Al comparar los dos primeros modelos se ve que el exponente esencial en el de Flemming es $R-G$ en tanto que en el de Riley es $\{R(1-N^*) - G\}$. Ambos modelos son similares en principio si N^* es próximo a cero. Sin embargo se ha demostrado que probablemente N^* era excesivo para el valor de $0.55 \mu\text{g-at-PO}_4\text{-P/l}$ (McAllister, Parson's, Stephens and Strickland, 1961; Autia et al, 1963; Eppley, Rogers and McCarthy, 1969).

El ajuste de los datos es aceptable, lo que significa que la razón R/G fue bien evaluada, Riley, Stommel and Bumpus (1949), estudiaron el ciclo de reproducción en una columna de agua. Su modelo es similar al anterior, pero tienen en cuenta la pérdida de algas por hundimiento y dispersión turbulenta.

Su modelo es:

$$dP/dt = P(Ph-R-G) + (\partial/\partial z) (A/\rho) (\partial P/\partial z) - v(\partial P/\partial z) \quad (9)$$

En donde A, es el coeficiente de dispersabilidad vertical turbulenta en $g/cm^{-1}/seg^{-1}$; v, es la tasa de hundimiento de las algas a $0^{\circ}C$; ρ , es la densidad. La ecuación se resolvió por diferencias finitas. Para futuros modelos hay que tener en cuenta la distribución de los organismos productores, en vista de que las algas sufren hundimientos y los animales emigran de noche a la superficie.

Steele (1958) desarrolló un modelo de producción de fitoplancton basado en la capa de mezcla. Igual que en Harvey, Labor y Russell (1935) el modelo se basó en la transferencia de fósforo a biomasa. Se postuló una tasa constante de mezcla entre las capas; un límite de nutrientes reduciría linealmente la fotosíntesis bajo un nivel de $0.40 \text{ g-at-PO}_4\text{-P/l}$; la tasa de hundimiento de las algas queda establecida en 3 m/día^{-1} , con una tasa de pastoreo de 3.4 m^{-3} de algas eliminadas por gramo de carbono de zooplancton. Se introdujo el coeficiente de respiración de Riley. Hoy habría que modificar el valor de algunos parámetros, quizá lo más importante es que la regeneración inmediata de nutrientes como el fósforo debiera ser incorporada. El modelo Riley, tuvo su éxito por adecuarse relativamente a los datos reales y evaluar correctamente la razón R/G.

El de Steele permitió comprender variaciones del ci--

ciclo en relación a la mezcla por vientos. En cuanto al de Cushing, sugiere la posibilidad de simular matemáticamente el ciclo en términos de tasa de producción de algas y de mortalidad por pastoreo.

Cabe recordar que en los años 20's y 30's regían las ideas de Harvey, Cooper, Laboor y Russell (1935), según las cuales el pastoreo controlaba la producción y también las ideas de Atkins (1923), quien propugnaba la limitación por falta de nutrientes al restablecerse la termoclina.

Los primeros modelos tuvieron sus fallas, pero también contribuyeron aleccionadamente al progreso por ejemplo, Riley observó que R/G podría ser calculada adecuadamente - Steele demostró que la variabilidad del ciclo de producción dependía de la variación en espesor de la capa de mezcla. Smith (1936) y van Oorshot (1953) describen diversas correlaciones con asintota en la intensidad de la luz, aunque ignoraron la inhibición por fotosíntesis que se produce con fuerte irradiación en la capa más superficial del mar después del medio día (Doty y Oguri, 1957). Steele ideó una ecuación para describir la dependencia de la fotosíntesis a toda intensidad de radiación, incluyendo altos niveles de inhibición. La ecuación en Steele (1965), es:

$$P = P_m (I/I_m) \text{ Exp } [I - (I/I_m)] \quad (10)$$

Donde P, es la cantidad de biomasa producida por fotosíntesis (por ejemplo $\mu\text{C/g clorofila/día}^{-1}$, ó en gc/gC/día^{-1} --

P_m , es el máximo valor de P ; I , es la iluminación del espectro fotosintético (390-720 nm) en Ly/min , que a menudo corresponde a la intensidad promediada en la capa fótica durante el día; I_m , es la iluminación a la profundidad en la que se da P_m . Esta ecuación puede utilizarse para cualquier medición de fotosíntesis.

Nielsen y Hansen (1959) calcularon la respiración directamente a partir de la dependencia entre carbono producido e intensidad de luz. Ya Steele había sugerido que la respiración sería $r = 0.2 P_m$.

Como complemento al estudio y sumando el método de radio carbono, la ecuación de Steele y el método de Nielsen y Hansen para evaluar la tasa de respiración, pueden combinarse, para también evaluar la tasa de reproducción de las algas.

Se probó que el tiempo para capturar y devorar una célula fitoplanctónica es proporcional al inverso del volumen explorado, de modo que el tiempo de manipulación del depredador sería solo una pequeña proporción de el de exploración.

La siguiente es una ecuación de Mortalidad por Pastoreo G , (Cushing, 1972b).

$$G = \frac{N[(3.0066 \text{ l})^2 t]}{[1 + a^3 (0.066 \text{ l})^2 7.10^{-6} \text{ m}^3 \text{ C}^3] 10^{-3}} \quad (11)$$

Donde l , es la longitud del herbívoro en cm, wg , su volumen en mm^3 ; C'' , el volumen de las células de las algas en m^3 ; a' , la densidad de algas en n/ml , superior o un cierto umbral; N , número de herbívoros/l.

Harris (1968) demuestra que el cálculo del volumen explorado se sobrestima si el animal explora según trayectorias irregulares en vez de trayectorias regulares o rectilíneas.

Sverdrup (1953) estudió las condiciones en el Atlántico mostrando que el florecimiento del fitoplancton depende de la razón de la profundidad de compensación (a la cual la respiración iguala la fotosíntesis) a la profundidad de la superficie de la capa de mezcla y este florecimiento -- puede ser explicado en términos de luz, mezcla y turbidez del agua.

VI. CONSIDERACIONES DE SVERDRUP (1953),

El primer punto básico para que se dé el florecimiento en cualquier cuerpo de agua, es que en la capa superficial la producción de materia orgánica por fotosíntesis exceda la destrucción por respiración. Sobre un cuerpo de agua, donde existan plantas y animales se da la destrucción de materia orgánica por respiración. La fotosíntesis solamente puede efectuarse en presencia de luz, CO_2 y sales de nutrientes tales como: $NO_2 - NO_3$; PO_4 y otros constituyentes menores.

Gran y Braarud (1935), han señalado que la producción no puede exceder a la destrucción si existe una capa de mezcla profunda. Este razonamiento se fundamenta en que dentro de una mezcla homogénea, caracterizada por la ausencia de gradientes verticales de temperatura, los organismos del plancton se distribuyen uniformemente; pero una producción neta positiva toma lugar solamente arriba de la profundidad de compensación, en tanto abajo de ésta hay una pérdida neta de materia orgánica sintetizada.

En la figura 10, dp es el aumento de materia orgánica por fotosíntesis, dr ; es la disminución de respiración actuando ambos como funciones de la productividad. El aumento (dp) y la disminución (dr), se aplican tanto a la unidad de volumen como de tiempo.

La producción supuestamente obedece a una disminución logarítmica con la profundidad, correspondiendo a esta disminución logarítmica con la intensidad de luz; pero la destrucción es constante e independiente de la profundidad de acuerdo con la suposición de que los organismos están uniformemente distribuidos en la capa de mezcla.

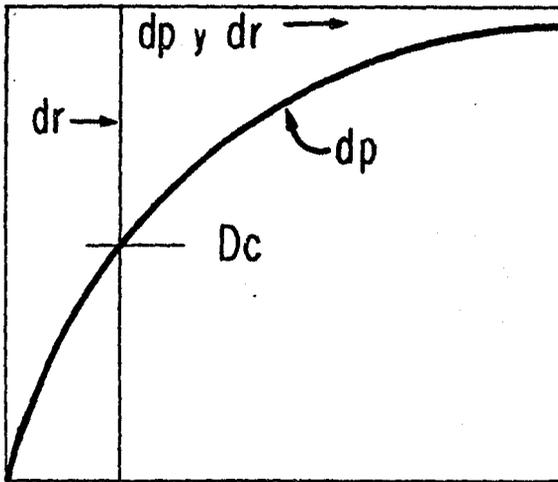


Fig. 10. Variación con la profundidad del incremento de materia orgánica por fotosíntesis, dp , y disminución por respiración, dr . Aumento y disminución aplicados a la unidad de volumen y tiempo.

A una cierta profundidad de compensación, D_c , queda establecido que $d_p = d_r$. Esto implica que deberá existir una profundidad crítica tal que el florecimiento puede ocurrir sólo si la profundidad de la capa de mezcla es menor que este valor crítico. Gran y Braarud (1935), estimaron que la profundidad crítica es de 5-10 veces la profundidad de compensación.

Es posible en base a ciertas suposiciones derivar una expresión analítica para la profundidad crítica (Sverdrup, 1953):

1. Deberá existir un mezclado completo en la capa superior D .
2. Dentro de esta capa la turbulencia es lo bastante fuerte para distribuir a los organismos del plancton de manera uniforme.
3. Dentro de la capa superior, la producción no se ve restringida por los nutrientes.
4. Dentro de la frontera de superficie, el coeficiente de extinción, K , se considera constante.
5. Para la fotosíntesis se consideran longitudes de onda, el coeficiente de extinción es tan grande que la energía asociada es absorbida por arriba del primer metro. La energía del espectro a este rango representa la radiación fotosintéticamente acti-

- va, siendo del 20% de la energía de radiación que llega. Donde una fracción, (albedo) es reflejada de la superficie y $a = 1 - a = 0.94$, que es la fracción de energía que queda disponible en la superficie.
6. Se considera que la producción de materia orgánica por fotosíntesis es, proporcional a la energía de radiación disponible. De acuerdo con Jenkins (1937), esta suposición es correcta si el flujo de energía es menor que $1.8 \text{ g cal cm}^2/\text{h}^{-1}$.
 7. Existe una energía, I_c correspondiente a la profundidad de compensación, (0.13) (Jenkins, 1937), que puede depender de la temperatura. La fotosíntesis y la respiración pueden no conservar su tipo de relación y entonces depende más de la composición del plancton.

Con base en lo anterior puede derivarse una expresión matemática para la profundidad crítica. Este valor dependerá de la cantidad de radiación entrante, la transparencia del agua y el nivel de energía de la profundidad de compensación.

La energía total que llega del sol y del ciclo expresada en $\text{g cal cm}^{-2}/\text{h}$, será I_0 . La energía que atraviesa capa superficial del agua es I_w , entonces tenemos:

$$I_w = (1-a) I_0 \quad (12)$$

La energía efectiva y utilizable que atraviesa la superficie del agua es:

$$I_e = 0.2(I_w) \quad (13)$$

Con un coeficiente de extinción constante, K , la energía existente a una profundidad Z , es:

$$I_z = I_e \text{Exp}kz = 0.2(1-a) I_o \text{Exp}kz \quad (14)$$

La producción a la profundidad Z deberá ser proporcional a la energía disponible. La producción en el intervalo de tiempo dt , es entonces $dp = mI_z dt$, mientras que la destrucción por respiración en el mismo intervalo de tiempo es: $dr = ndt$. Aquí m y n son factores independientes de Z , pero dependen del tipo de población y de la temperatura del agua. Por definición de $dP = dr$ a la profundidad de compensación donde $I_z = I_c$ y $n/m = I_c$.

En el tiempo t , la producción total por fotosíntesis entre la superficie y la profundidad $Z = -D$, estará dada por:

$$P = m \int_0^T \int_{-D}^0 I_e \text{exp}kz \, dt dz = m/k (1-e^{-kD}) \int_0^T I_e \, dt \quad (15)$$

La destrucción total es:

$$R = n \int_0^T \int_{-D}^0 dt dz = nTD \quad (16)$$

La condición para un incremento en la población del fitoplancton es:

$$P > R \quad (17)$$

Introduciendo el valor de I_e de 13; obtenemos:

$$I_e = 0.2/T \int_0^T (1-a) I_0 dt \quad (18)$$

Por lo tanto la profundidad crítica D_{cr} , esta definida por la siguiente ecuación:

$$\frac{D_{cr}}{1 - \exp^{-kD_{cr}}} = \frac{l}{k} \frac{\bar{I}_e}{I_c} \quad (19)$$

Los resultados deberán interpretarse en términos de -estabilización, donde para latitudes medias y altas se observa que se desarrolla una capa de mezcla profunda a fines de invierno, pero conforme la estación avanza se desarrolla una capa de mezcla más superficial bajo la cual la densidad aumenta con la profundidad.

VII. APLICACIÓN Y COMPARACIÓN EN LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS.

A. MODELO DE PRODUCTIVIDAD DE STEELE.

Los efectos de nivel radiativo sobre la productividad primaria en las lagunas de Nuxco, Coyuca y Chautengo son contemplados a lo largo de este modelo mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_I = \int_t^{t+\tau} \int_{-Z_m}^0 P(z,t) dz dt \quad (20)$$

En donde existe una relación entre la radiación incidente (I) y la razón fotosintética por unidad de volumen de agua (P), se considera una capa de mezcla (Z_m) con la suficiente turbulencia para que resulte tanto óptica como isotérmicamente homogénea, así se puede utilizar un coeficiente de extinción único para la penetración de la luz, observándose una fotosíntesis total relativa (P_I), entre dos intervalos de tiempo. El modelo consideró el periodo de tiempo del amanecer al anochecer ($t, t + \tau$) y el espacio de integraciones entre la superficie y la capa de mezcla ($0, -Z_m$).

La fotosíntesis relativa para cualquier profundidad y tiempo esta dada por la ecuación de Steele (1965).

$$P_I(z,t) = \frac{I_o(z,t)}{E_m} e^{-1 \frac{I_o(z,t)}{E_m}} \quad (21)$$

En donde I_o , es la variable dominante expresada como la insolación que llega a la superficie del agua; E_m , es el nivel de radiación en que la máxima producción, P_{max} , ocurre disminuyendo la luz logarítmicamente con la profundidad, obedeciendo a la ley de Beer de la forma $I(z,t) = I_o e^{-Ez}$; Sverdrup (1942) y Sverdrup (1953) y Jerlov (1951).

Se considera que de la radiación global incidente, un 6% es reflejada (α) y la luz restante que penetra a la superficie del agua, solamente el 20% en la región del visible es utilizada en la producción fotosintética, entonces la ecuación que rige tal suposición esta dada:

$$I(z,t) = 0.2 (1-\alpha) I_o e^{-Ez} = 0.188 I_o e^{-Ez} \quad (22)$$

Donde la energía efectiva para la producción fotosintética a una cierta profundidad y con respecto al tiempo se obtendrá para cada laguna.

De esta forma sustituyendo (3) en (2) e integrando esta en (1), Vollenweider (1970) y Fee (1969); se obtiene:

$$P_I = \frac{P_{max}}{E Z_m} e^{-a \frac{I_0}{E_m}} e^{-E Z_m} - e^{-a \frac{I_0}{E_m}} \quad (23)$$

En donde la simulación de la razón media de producción fotosintética, P_I , para una capa de mezcla Z_m ; P_{max} , es la máxima producción sobre la laguna para ese tiempo de muestreo; y E , es el coeficiente de extinción calculado de $E = D/1.7$; donde D , es la profundidad del disco de Secchi. Para calcular los efectos de la luz sobre la producción fotosintética relativa, para una cierta Z_m , sólo se necesita conocer el valor de E deducida de la profundidad del disco de Secchi, Forsberg (1969); y la cantidad de radiación incidente I_0 , Budyko (1963) y en donde E_m , se le considera constante para cierta P_{max} a lo largo del desarrollo mensual para cada laguna.

B. MODELO DE PRODUCTIVIDAD DE SMITH (1980).

Este modelo hace la estimación de la producción fitoplantónica y tasa de crecimiento específico a partir de --clorofilas, luz y temperatura.

Dentro de los modelos de crecimiento del fitoplancton existen dos relaciones fundamentales empíricas; una es entre la tasa de crecimiento y la temperatura, y la otra entre la fotosíntesis y la iluminación. Las variaciones de fotosíntesis del fitoplancton y la tasa de crecimiento con la luz y la temperatura ha sido investigada por más de cinco décadas. Eppley (1972) ha obtenido de la literatura datos acerca de la tasa máxima de crecimiento específico, --así el crecimiento de una población por unidad de biomasa a baja saturación menor que 50 $\mu\text{g atm/l}$ de nutrientes y --condiciones de luz, son estimadas con una simple función --de la temperatura; $\mu_{\text{max}}(T)$.

Bannister (1974a) escribió algunas ecuaciones para la producción del fitoplancton y el crecimiento en términos --de la producción máxima cuántica. μ_{max} , que es el número de moles del producto fotosintético por mole de fotones absorbidos.

Como antecedente, también se cita que Warburg y Negelein (1973), realizaron los primeros estudios experimentales acerca de la producción cuántica fotosintética máxima. Bennister

(1974) dió buenos argumentos para adoptar 0.06 mole de Carbono (0.07 mole O_2) por mole de fotones, como la máxima producción para el plancton en la naturaleza. La producción máxima cuántica representa el límite superior de la eficiencia fotosintética en reacciones con luz, y la tasa de crecimiento específica máxima por día; μ_{max} , representa el límite superior de largas series de reacciones en la oscuridad las cuales culminan con la síntesis de nuevo material celular. El propósito de este modelo, adaptado para los datos de las lagunas costeras es mostrar que la tasa de crecimiento específico máxima y la producción cuántica máxima pueden estar relacionados matemáticamente a través de la curva de luz fotosintética; $P(I)$ y que esta relación provee bases para derivar una expresión general bivariada para el crecimiento del fitoplancton como una función de la luz y la temperatura.

El efecto de introducir $\mu_{max}(T)$ en $P(I, Q_{max})$ es el de eliminar el parámetro de saturación de luz. Sin embargo, la asimilación neta de los nutrientes, ricos en las aguas de las lagunas puede variar entre 5-10 veces (Klimek, 1978). La tasa de fotosíntesis neta por unidad de peso de clorofila "a", a la saturación de luz, es cercanamente constante y dependiente sobre la fotosíntesis bruta, si la respiración a la saturación de luz permanece constante o toma valores insignificantes.

La curva de luz fotosintética con la profundidad des-

cribe la variación de la tasa fotosintética con una determinada intensidad, mostrando un aumento lineal en la tasa con la intensidad a bajos niveles de luz y una atenuación gradual de la tasa máxima a altos niveles de luz. La tasa de crecimiento específica máxima, está asociada con este límite superior de la curva fotosintética, en tanto que la producción cuántica máxima está asociada con la pendiente inicial y es observada a muy baja intensidad de luz. Rabinowitch y Govindjee (1969), han discutido la relación entre los procesos fotosintéticos fase clara y oscura, haciendo notar que en la reacción luminosa, sus productos vienen a ser sustratos usados en la enzima que controla las reacciones oscuras.

Steele (1962) obtiene una curva de luz en donde toma en cuenta los efectos de sobresaturación y sirve como modelo para la dependencia-luz de la tasa de crecimiento en las simulaciones del crecimiento del fitoplancton (Dituro, et al, 1971; O'Connor et al, 1973).

Las siguientes ecuaciones contemplan el desarrollo del modelo Smith (1980).

Para la tasa de crecimiento específico máximo, Eppley expresa: $\mu_{\max} (T) \text{ día}^{-1}$ como:

$$\mu_{\max} = e^{0.0275(T) - 0.230} \quad (24)$$

La relación entre fotosíntesis y la tasa de crecimien-

to queda definida como:

$$\mu - r = \frac{P - R}{C} \quad (25)$$

Donde P (en mg carbono/M⁻³/dfa⁻¹) es la producción bruta; R, es la respiración más cualquier otro proceso de pérdida; C, es la tasa de cambio de la cosecha del fitoplancton, y $\mu - r$, es la tasa de crecimiento específica neta por dfa⁻¹.

La tasa de absorción de luz por clorofila en una capa ópticamente delgada, esta dada por la ley de Beer en donde Kc, es el coeficiente de extinción por unidad de clorofila (m⁻²/dfa⁻¹). Bannister encontró un valor para Kc de 0.016 m⁻² mg⁻¹, y para μ_{max} de 0.06 mole/carbono.

Para encontrar la tasa de crecimiento específica por dfa⁻¹ está se da por:

$$\mu = \left[\frac{0.000313 \theta}{I_0} + 10^{0.230 + 0.0275 (T)} \right]^{-1} \quad (26)$$

En donde θ , es el cociente Carbono: Clorofila (unidades dimensionales); I₀, es la intensidad de luz (calorías/cm⁻³/minuto); T, es la temperatura del agua en (°C).

$$\theta = 136 I_0 / \max \quad (27)$$

Indicando el comportamiento de θ , (Yentsch y Lee, 1966; Eppley, 1972) como un aumento en θ como también de luz y una disminución en θ con un aumento en la temperatura.

Para encontrar la tasa de crecimiento específica para la capa de mezcla como un todo, es posible hacerlo definiendo μ , como valor promedio, para la capa de mezcla.

El valor de la profundidad promediada para μ es obtenida por: Smith (1980).

$$\mu = \frac{\mu_{\max} e}{Ez_m} \left[\exp \left(\frac{\phi_{\max} K_c I_0}{\mu_{\max} \theta e (1+Ez_m)} \right) - \exp \left(\frac{\phi_{\max} K_c I_0}{\mu_{\max} \theta e} \right) \right] \quad (28)$$

Donde; μ_{\max} es la tasa de crecimiento específica máxima (día^{-1}); E , es el coeficiente de extinción de luz total (m^{-1}); Z_m , es la profundidad de la capa de mezcla (m^{-1}); e , exponencial = 2.718 ϕ_{\max} , constante 0.06; K_c , constante = 0.016; θ la razón C: C clorofila del fitoplancton; I_0 , intensidad de luz en superficie ($\text{cal/cm}^{-2}/\text{min}^{-1}$).

Por lo tanto, la siguiente expresión para la producción bruta en la capa de mezcla (ΣP , biomasa de Carbono, por unidad de área por unidad de tiempo) esta dada por el producto de la biomasa del fitoplancton, la tasa de crecimiento específica media y la profundidad de la capa, de mezcla.

La biomasa es generalmente medida como la concentración de clorofila; quedando de esta forma la ecuación de la producción como:

$$\Sigma P = \left(\frac{C_0 \mu_{\max} \theta e}{E} \right) \text{Exp} \left(- \frac{\phi \max Kc I_0}{\mu_{\max} \theta e (1+EZm)} \right) - \text{exp} \left(- \frac{\phi \max Kc I_0}{\mu_{\max} \theta e} \right) \quad (29)$$

Las ecuaciones (4) y (5) son expresiones de la tasa instantánea y pueden ser numéricamente integradas sobre una distribución de irradiancia diurna al calcular el crecimiento y la producción diaria.

La presencia de la relación carbono: clorofila (θ), en una expresión para la tasa de crecimiento específica (μ), es interesante en vista de las varias observaciones que se han reportado de una relación aparente entre la razón Carbono: clorofila y ciertos factores ambientales, luz y temperatura en particular. El interés en la variabilidad de (θ) en la naturaleza, obedece al hecho de que la concentración de clorofila es conveniente medirla y usarla como un índice de la biomasa de las algas dado que su relación a Carbono celular es conocido.

Hay mucha discusión acerca de la variación en la proporción Carbono: Clorofila con condiciones ambientales que aluden a la naturaleza adaptativa de cambios en θ (ejemplo Yentsch y Lee, 1966; Eppley et al, 1973). La implicación del término adaptativo en esta discusión, es que la variación observada en células clorofilianas, reflejan una tendencia sobre el fitoplancton a mantener una tasa de absorción de luz sobre los rangos de luz y temperatura.

A la fecha, los investigadores no se han puesto de acuerdo en definir un óptimo con respecto al nivel y tasa de absorción de luz con respecto a la célula clorofiliana. Myer y Grahan (1971) han evidenciado por datos de laboratorio, una hipótesis para esta idea:

La tasa máxima de absorción de luz está asociada con la tasa de crecimiento de la célula, la cual muestra que los cambios en θ para chlorella crecen bajo varios niveles de luz manteniendo cercanamente constante la tasa de crecimiento específico ligeramente abajo de la tasa de crecimiento específico con la temperatura, $\mu_{\max}(T)$.

La última ecuación del modelo es la que describe la tasa fotosintética integrada a una cierta profundidad:

$$DP = \left[\frac{\mu_{\max} K_c I_d (1 - \exp^{-\epsilon Z_m}) \bar{C}}{2 \epsilon Z_m} \right] \left[e^{-\frac{\epsilon Z_m}{\exp \epsilon Z_m - 1}} \left(\frac{\epsilon Z_m}{e^{1 - e^{-\epsilon Z_m}}} \right) \right] \quad (30)$$

En donde P, es la biomasa de Carbono, por unidad de área por unidad de tiempo; I_d , insolación diaria total dada en Langleys; \bar{C} , clorofila fitoplancton en mg/m^{-3} cabe hacer notar que en intentar usar esta última ecuación existen dos problemas:

a) Determinar la historia en corto tiempo de la intensidad de luz en la superficie como lo "censado" por las células del fitoplancton.

b) Una segunda limitación sobre el uso del valor óptimo teórico de θ en hacer estimaciones de producción y tasa de crecimiento específico, es el hecho de que bajo circunstancias de temperatura de verano y una capa de mezcla más profunda que la zona eufótica, tiende a dar razones -- Carbono: Clorofila menores del rango normal esperado.

Para probar este modelo es más fácil hacerlo con datos de producción bruta que con estimaciones de la tasa de crecimiento específico, esto es debido a las siguientes razones: Primero, por la relativa simplicidad de hacer mediciones de productividad pudiendo compararlos con los ya -- existentes y publicados; y en cambio la gran escases de datos publicados sobre la tasa de crecimiento específico medidos para cuerpos de agua naturales y segundo, las tasas de cambio para el número de fitoplancton en la naturaleza dependen de muchos factores tales como tasa de división celular incluyendo tasas de pastoreo y coloniaje; así que las comparaciones de las tasas de crecimiento específico son -- también requeridas para la respiración y la excreción; y que, por último, las mediciones para la fotosíntesis bruta, que son las tasas de crecimiento específico (Talling, 1965; Megard, 1972), no se ven influenciadas por la limitación de nutrientes.

VIII. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

De acuerdo a las consideraciones y modelos utilizados en el presente estudio, Sverdrup (1953) señala a la profundidad crítica D_{cr} , como principal factor limitante en la productividad primaria sobre un ecosistema marino. En el desarrollo matemático para obtener la profundidad crítica se llegó a la ecuación que la describe:

$$\frac{D_{cr}}{1 - e^{-K D_{cr}}} = \frac{1}{K} \frac{\bar{I}_e}{I_c}$$

En donde para ambientes acuáticos costeros estas consideraciones de Sverdrup (1953) no cumplen satisfactoriamente tal condición, como se podrá apreciar en la figura 11, la productividad mantiene sus picos más altos a escasos centímetros de la superficie y a medida que la profundidad crítica, D_{cr} , y el coeficiente de extinción, Z_m , decrecen logarítmicamente con la luz, la productividad aumenta y disminuye conforme la estación del año avanza. Para que se cumpliera la ecuación de Sverdrup (1953), la capa de mezcla al ir disminuyendo en profundidad, la productividad tendiera a aumentar.

Sin embargo, las máximas productividades para las lagu-

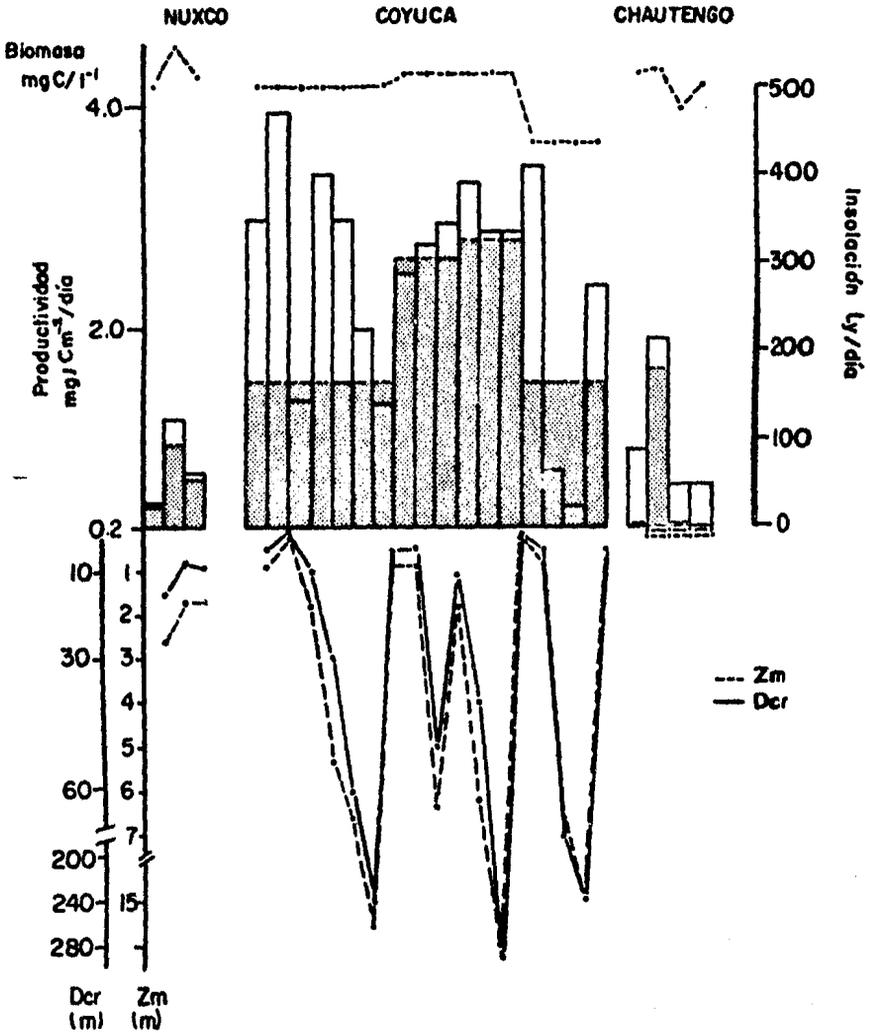


FIG. 11. Valores comparativos para las tres lagunas en donde la insolación es el parámetro principal que afecta a la productividad. En Sverdrup (1953).

nas de Nuxco y Chauntengo se dan a una profundidad crítica de 10 a 30 m con productividades de 0.4 a 1.2 mgC/m⁻²/día y de 0 a 10 m con productividades de 1.0 a 2.0 mgC/m⁻²/día respectivamente. Para la laguna de Coyuca, la profundidad crítica se fue hasta los 280 m con una productividad de 3.2 mgC/m⁻²/día siendo que la máxima producción obtenida en esta laguna fue en superficie a una profundidad de 0.50 cm y con una productividad de 4.2 mgC/m⁻²/día e insolación de 500 ly/día.

Debido a estos resultados para sistemas acuáticos costeros, las consideraciones de Sverdrup (1953), no se aproximan al objetivo de este estudio siendo principalmente aplicables a sistemas acuáticos estables.

Para corroborar estos resultados se precisa de la tabla 1, en donde se obtienen los resultados para las consideraciones de Sverdrup (1953).

En las figuras 12 y 13 se analiza con más detalle la profundidad crítica y el coeficiente de extinción como parámetros físicos que no determinaron el desarrollo de la productividad y la biomasa.

T A B L A I

VALORES DE LA PROFUNDIDAD CRITICA, Dcr, Y COEFICIENTE DE
EXTINCION, Zm, CON RESPECTO A LA PRODUCTIVIDAD EN
gC/m⁻²/dfa Y ESTACIONALIDAD PARA CADA LAGUNA.

| | Mes/Año | Productividad gC/m ⁻² /dfa | Dcr (m) | Zm (m) |
|---------------------|-------------|------------------------------------------|---------|--------|
| Laguna de Mexco | Julio 1976 | 0.923 | 16.79 | 0.88 |
| | Abril 1977 | 0.680 | 17.10 | 0.94 |
| Laguna de Coyuca | Abril 1976 | 2.65 | 18.19 | 1.00 |
| | Agosto 1976 | 2.80 | 18.19 | 1.00 |
| Laguna de Chautengo | Junio 1976 | 1.64 | 1.87 | 0.10 |
| | Julio 1976 | 0.497 | 1.88 | 0.10 |

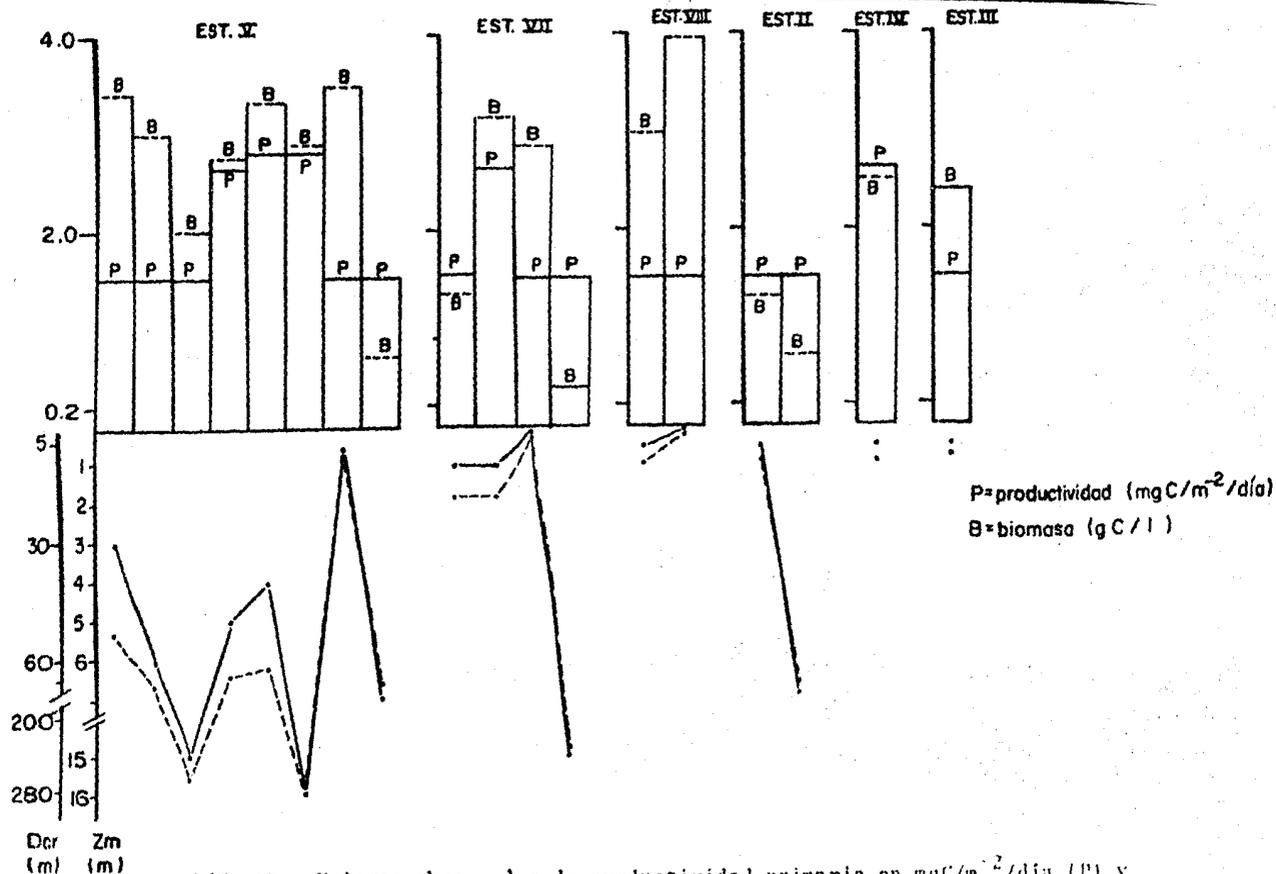


FIG. 12. Valores observados de productividad primaria en mgC/m²/día (P) y Biomasa en mgC/l, comparados con la profundidad crítica (Zm) de Sverdrup (1953) y el coeficiente de extinción (Dcr) de Klimck (1978) para la Laguna de Coyuca.

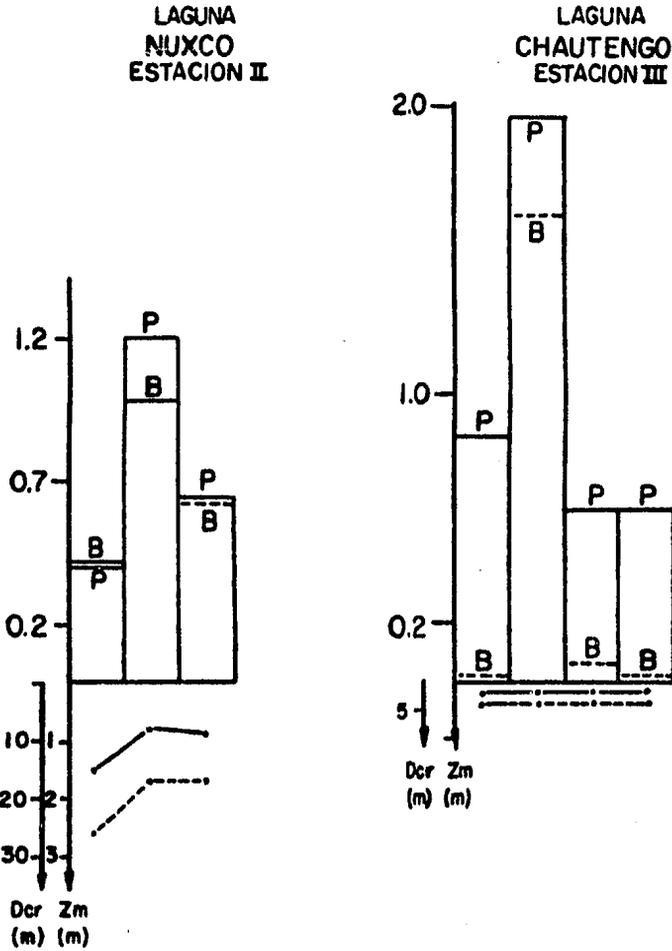


FIG. 13. Valores observados de productividad primaria en $\text{mgC/m}^2/\text{día}$ (P) y Biomasa en mgC/l (B), comparados con la profundidad crítica (Dcr) de Sverdrup (1953) y el coeficiente de extinción (Zm) de Klimek (1978) para dos lagunas.

En el desarrollo del modelo de Steele (1976), se consideró la razón media de producción fotosintética para toda la columna de agua, en donde se toman parámetros indispensables como la producción máxima, el coeficiente de extinción y la insolación. La ecuación que describe este modelo es la siguiente:

$$P_I = \frac{P_{max}}{E Z_m} e^{-a \frac{I_0}{E_m}} e^{-E Z_m} e^{-a \frac{I_0}{E_m}}$$

Steele (1976) considera en su modelo, que la capa de mezcla esta homogéneamente bien distribuida y sin limitaciones por nutrientes.

Los resultados que arroja el modelo para simular a la productividad son los siguientes:

En la Laguna de Nuxco y para el mes de julio de 1976, la productividad máxima observada fue de 28.6 mgC/m⁻²/mes y la calculada fue de 23.2 mgC/m⁻²/mes (Fig. 14).

Para la Laguna de Coyuca, en agosto de 1976, la máxima productividad observada fue de 86.8 mgC/m⁻²/mes y la calculada fue de 89.42 mgC/m⁻²/mes (Fig. 14).

En la Laguna de Chautengo, mostró el segundo lugar en importancia de productividad; para junio 29 de 1976 el valor máximo observado fue de 47.6 mgC/m⁻²/mes (Fig. 14).

La estimación de la productividad calculada para estas tres lagunas, demuestra que el modelo de Steele (1976), es

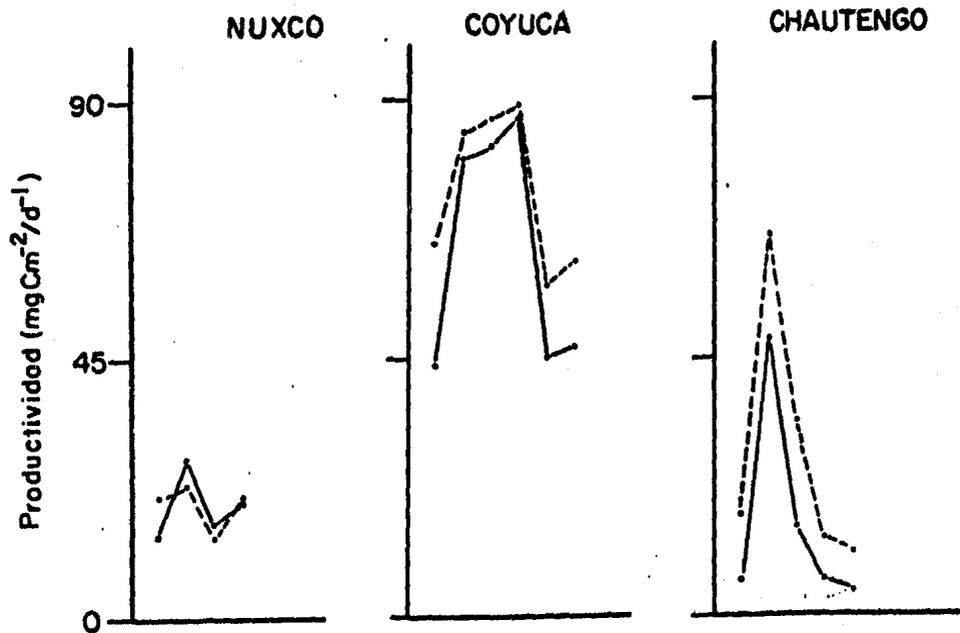


FIG. 14. Valores observados (línea continua) y calculados (discontinua) de productividad primaria para el modelo de Steele (1976).

de gran confiabilidad para este sistema lagunar costero, además de haber sido sometido para bahías y estuarios (Alvarez y Nájera, 1979).

La aplicación del Modelo de Smith (1980), llevado a este sistema lagunar costero (Hutchinson, 1976), implicó el uso de variables biológicas y ambientales que determinaron el desarrollo de la productividad primaria. Al respecto se puede señalar que la intensidad luminosa, la temperatura, el viento, así como la razón entre Carbono: clorofila "a" y el coeficiente de extinción fueron factores indispensables para llevar a cabo la simulación matemática de la producción del ecosistema. Se obtuvo una significativa semejanza con los datos observados y calculados para la tasa de crecimiento específica y la producción bruta, especialmente afectada por los efectos meteorológicos (Tabla II). Estas ventajas del modelo arrojan los siguientes resultados:

Para el modelo de Smith (1980), aplicado a este Sistema Lagunar Costero, se desarrollaron las siguientes ecuaciones:

Para la tasa de crecimiento específico del fitoplancton se utilizó:

$$\mu_{\max} = e^{0.0275 (T) - 0.230}$$

Y la tasa de crecimiento específico por día del fitoplancton, es:

$$\mu = \left[\frac{0.000313 \theta}{I_0} + 10^{0.230 + 0.275 (T)} \right]^{-1}$$

T A B L A II.

EFFECTOS METEOROLOGICOS PROMEDIO QUE ESTIMULARON LA PRODUCTIVIDAD PARA EL MODELO DE STEELE (1976) Y SMITH (1980)

| <u>Laguna</u> | <u>Mes/año</u> | <u>Epoca</u> | <u>Días claros</u> | <u>Días nublados</u> | Vientos (Km/h) | | <u>Dirección y Número de Estación muestreada.</u> |
|---------------|----------------|--------------|------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------------------------|
| | | | | | <u>Vel. max.</u> | <u>Vel. min.</u> | |
| Nuxco | Mayo 1976 | Seca | 21 | 10 | 29 | 12 | NW (4) |
| | Julio 1976 | Lluviosa | 6 | 25 | 50 | 14 | ENE (6, 3) |
| | Abril 1977 | Seca | 28 | 2 | 30 | 11 | SSE (5,6,3) |
| Coyuca | Feb. 1976 | Seca | 27 | 2 | 19 | 12 | NW (4a,6,7,8) |
| | Abril 1976 | Seca | 28 | 2 | 30 | 11 | SSE (3,3a,4,4a) |
| | Ago. 1976 | Lluviosa | 7 | 24 | 33 | 16 | OE (7) |
| | Nov. 1976 | Lluviosa | 20 | 10 | 24 | 13 | ESE (2,3,3a) |
| Chautengo | Junio 1976 | Seca | 5 | 25 | 43 | 18 | NNE (1',1,4) |
| | Junio 1976 | Lluviosa | 4 | 25 | 43 | 18 | NNE |
| | Julio 1976 | Lluviosa | 6 | 25 | 50 | 14 | ENE (4) |
| | Enero 1977 | Lluviosa | 27 | 4 | 22 | 12 | WNW (1,2) |
| | Mayo 1977 | Lluviosa | 21 | 10 | 29 | 12 | NW (1,2) |

En donde para la laguna de Nuxco, la tasa de crecimiento específico observado (μ /día) presentó un mínimo para el mes de julio de 1976 con 3.54 y máximo crecimiento calculado de 4.05. En el mes de abril cuando por generalidad se espera un máximo florecimiento del fitoplancton, la tasa de crecimiento se mantuvo constante en 3.82, el cual no varió con respecto al tiempo por una toma de temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) homogénea (Fig. 15).

Para la Laguna de Coyuca existe una significativa semejanza entre los datos observados y los esperados. En el mes de Febrero de 1976 la tasa de crecimiento específico máximo fue de 2.92 y el calculado de 3.097. En abril de 1976 disminuye el crecimiento hasta 1.01 y 1.035 observado y calculado respectivamente. Matemáticamente se dan oscilaciones en la tasa de crecimiento específico máximo, teniendo en cuenta que para este mismo mes, el crecimiento observado aumenta a 3.46 y el calculado a 3.455 (Fig. 15).

En la Laguna de Chautengo y para los meses de junio y julio de 1976, la tasa de crecimiento específico fue la más alta de las tres lagunas obteniendo un valor máximo observado de 5.05 mes de enero y calculado de 4.77. El invierno de 1977 la tasa de crecimiento observado fue de 3.3 y el calculado de 3.15. En esta laguna de Chautengo, a diferencia de Coyuca y para la misma época del año, la temperatura aumentó en 0.3°C y en crecimiento específico observado aumento en 0.230 y el calculado 0.203 (Fig. 15)

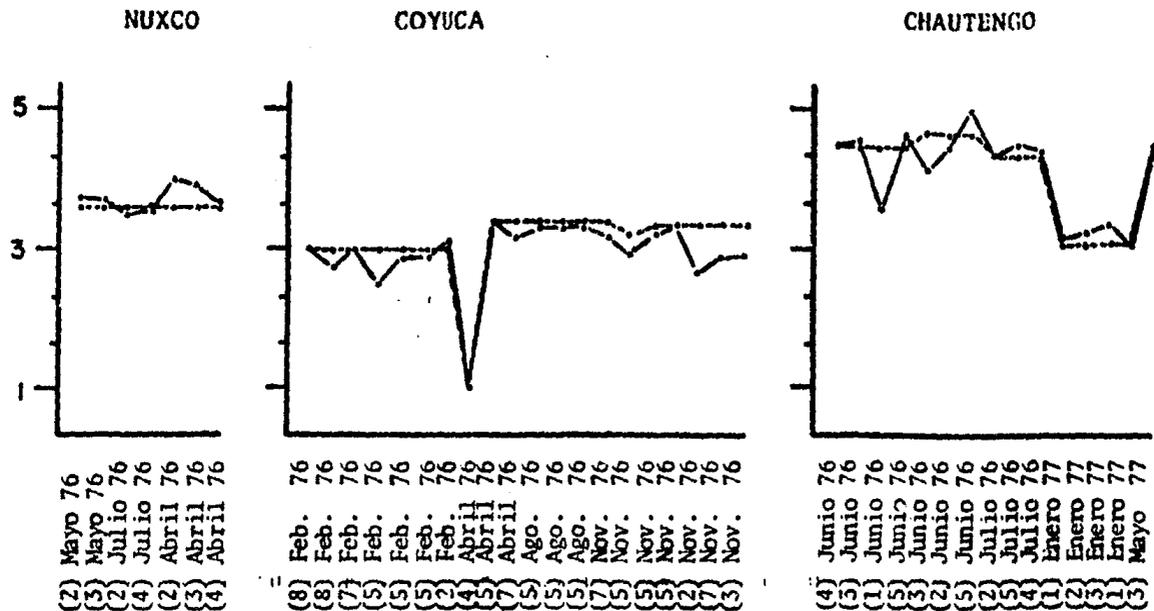


FIG. 15 Valores de tasa de crecimiento específico (μ) usando valores observados de θ (línea continua) y usando valores calculados de θ (línea discontinua) del Modelo de Smith (1980) para las tres lagunas de estudio.

Los valores dados por la razón entre carbono: clorofila "a" conocidos como θ , indican que hay proporcionalidad entre carbono: clorofila "a" con respecto a la luz e inversamente proporcional entre carbono: clorofila "a" con respecto a la temperatura. Así tenemos que:

$$\theta = 136 \frac{I_0}{\mu_{\max}} = \frac{136 I_0}{e^{0.0275(T) - 0.230}}$$

En donde no hay semejanza entre los datos observados y los calculados, con respecto al tiempo y para cada laguna. De esta forma, θ observada aumenta y disminuye con respecto al tiempo y θ calculada oscila entre 25 y 30; radio que estima el autor es el mejor (Fig. 16).

Los valores para integrar el crecimiento y la producción diaria, para una columna de agua homogéneamente bien distribuida, se calculó por la siguiente ecuación (30):

$$\Sigma P = (C \theta_{\max} e / \epsilon \left[\exp\left(\frac{-\phi_{\max} K_c I_0}{\mu_{\max} \theta \exp(1 + \epsilon / z_m)}\right) - \exp\left(-\frac{\phi_{\max} K_c I_0}{\mu_{\max} \theta e}\right) \right])$$

La anterior expresión fue integrando el producto de la biomasa del fitoplancton, la tasa media de crecimiento específico y la profundidad de la capa. Los valores arrojados indican productos instantáneos por día; por tal razón y por conveniencia numérica se dan en las unidades expresadas en la figura 17. Cabe hacer notar la gran afinidad entre los valores observados y calculados con respecto al tiempo.

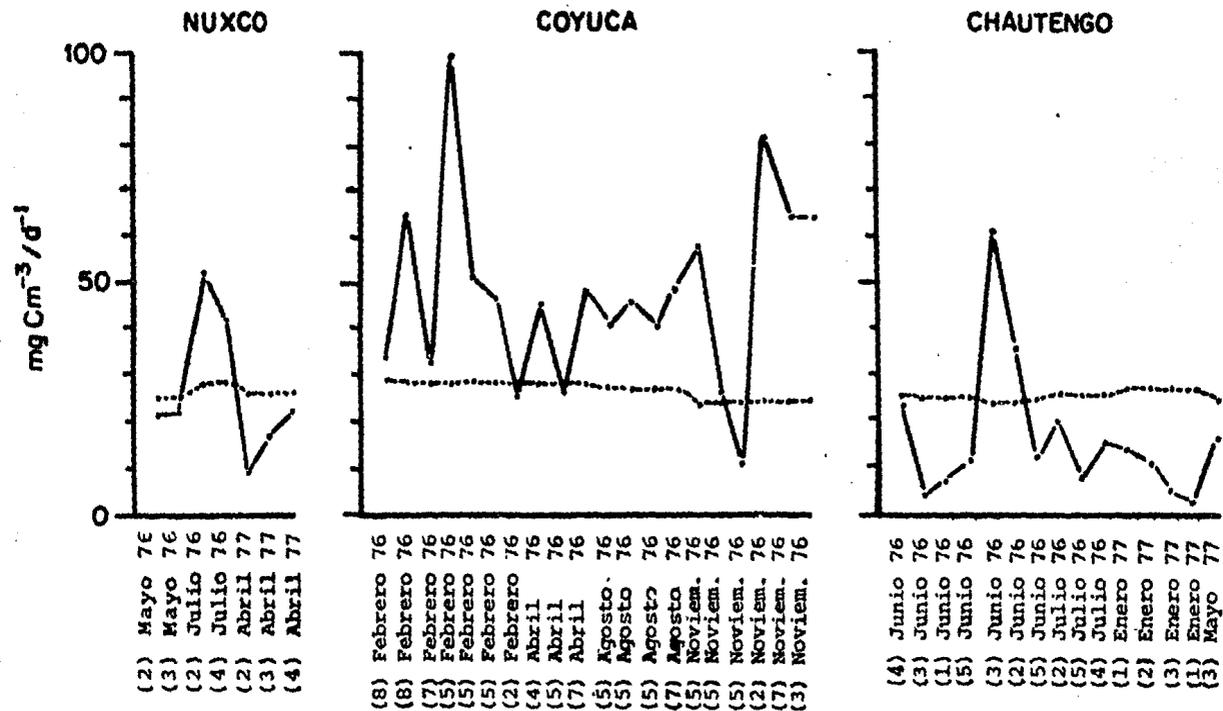


FIG. 16. Valores entre la razón Carbono-Clorofila (observada, línea continua y calculada discontinua) como función de la insolación y la temperatura.

Productos instantáneos por día para la producción bruta y el crecimiento específico:

En la laguna de Nuxco, el mes de julio de 1976 presentaron máximos valores observados de $4.79 \times 10^{-3} \text{ mgC/m}^{-2}/\text{día}$ y calculados $3.58 \times 10^{-3} \text{ mgC/m}^{-2}/\text{día}$ (Fig. 17).

Para la laguna de Coyuca en donde se confirma la máxima productividad con un valor observado de $3.23 \times 10^{-2} \text{ mgC/m}^{-2}/\text{día}$ y calculados de $1.67 \times 10^{-2} \text{ mgC/m}^{-2}/\text{día}$ (Fig. 17).

En la laguna de Chautengo las tasas instantáneas de producción y crecimiento son muy heterogéneas con respecto al tiempo pero muy semejantes entre los datos observados y los calculados. Así se tiene que para el mes de junio de 1976 la producción observada es de $19.608 \times 10^{-3} \text{ mgC/m}^{-2}/\text{día}$ y el calculado es de $10.641 \text{ mgC/m}^2/\text{día}$ (Fig. 17).

Podemos observar y deducir del presente trabajo y de sus resultados, que los técnicas de modelación matemática utilizando como herramienta principal variables ambientales y las de origen biogeoquímico presentan un amplio panorama a aprovechar y desarrollar ya que de ninguna forma unas excluyen a las otras, sino más bien presentan un aspecto multidisciplinarios de complementaridad.

El uso de variables físicas y biológicas como las aquí utilizadas, insolación, temperatura, índice de turbidez, capa de mezcla, productividad primaria, enmarcan el ambiente favorable o desfavorable para un crecimiento dado

y puedan llegar a utilizarse para conocer ambientes óptimos de desarrollo así como sus posibles limitantes. La simulación matemática es sólo un instrumento más a todo tipo de lenguaje que nos ayuda a decifrar e interpretar los múltiples interrelaciones dadas, que de otra forma sería imposible de decifrar.

Los modelos analizados en este estudio son sólo un primer intento de globalización de los hechos reales y por sus consideraciones implícitas no reflejan exactamente la realidad, sin embargo como inicialización nos dan un punto de partida para seguir explorando en objetivos más deseables.

IX. BIBLIOGRAFÍA.

- Aach, H. G. 1952. *Archivo Mikrobiol.* 17, 213.
- Alvarez Borrego, Sy Nájera de Muñoz, S. 1979. Series de tiempo de fitoplancton en dos lagunas costeras de Baja California. *Ciencias Marinas (Méx)* 6 (1 y 2): 75-88.
- Bannister, T.T. 1974. Production equations in terms of chlorophyll concentration, quantum yield and upper limit to production. *Limnology and Oceanography*, 9(11): 1-12.
- Cushing, D.H. 1954. Some problems in the productions of oceanic plankton. Document VIII presented to Common Wealth Oceanographic Conference.
- Cushing, D.H. 1958. The effect of graging in reducing the primary production. *Rapp. Cons. Explor. Mer.* 144-149.
- Cushing, D.H. 1959. On the nature of production in the sea. *Fish Invest. Lond.* (2).
- Cushing, D.H. 1975. *Ecología Marina y Pesquerías*. Ed. Acribia, Zaragoza.
- Commoner, B. 1980. *Energías alternativas*. Gedisa, Barcelona.
- De la Lanza Espino, G. 1981. Importancia de la materia orgánica en los sedimentos de Huizache-caimanero, Sinaloa, Méx. (Tesis Doctoral).
- Eugqvist, A. y Syoberg, S. 1980. An analytical integration method of computing diurnal primary production from Steele's light response curve. *Ecological Modelling*. 8: 219-232.

Fleming, R.H. 1939. The control of diatom populations by grazing. Cons. Perm. Internatl. Explor. Mer. Journ. du Cons. 14, 2: 210-227.

Fee, J. E. 1973. A numerical model for determining integral primary production and its application to lake Michigan. V. Fish. Res Board. Ca. 30: 1447-1468.

Gran, H. H. and Braarudt. 1935. A cuantitative study of the phytoplankton in the bag of fundy and the gulf of maine. Journal. Biol. Canada, 1-5 y 279-467.

Gross, F. and Zeothen, E. 1948. The buoyancy of plankton diatoms: a problem of cell physiology. Proc. Roy. Soc. B. 1935, 382.

Hutchinson, G.E. and Bowen, V.T. 1950. Limnological studies in Connecticut.

Iverson, H. C., Carl, J.L. Saugen. 1974. Simulation model for wind-driven summer. Phytoplankton Dynamics in Auke Bay Alaska.

Jenkins, P. M. 1937. Oxygen production by the diatom *coscinodiscus excentricus* Ehr in relation to submarine illumination in the English Channel. Jour. Mar. Biol. Assoc. U.K. 22: 301-342.

Jerlov, N.G. 1951. Optical studies of oceans waters. Rep. Swedish Deep Sea Exp. 1947-1948, 3, 1: 1-69.

Ketchum, B.H. and Redfield, A.C. 1949. Journal Celular Physiol. 33: 281.

Klimek, R. 1978. The hydrochemistry and productivity of three coastal tropical lagoons in the South of Mexico. (Tesis doctoral).

Kok, B. 1952. On the efficiency of chorella growth. Acta Bot. Meerl. 1, 445.

Krogh, A. and Berg, K. 1931. Intern. Rev. Ges. Hydrobiol. Hydrog. 25, 205.

Lankford, R.R. 1977. Coastal Lagoons of Mexico. Their origin and clasifications. In: Wiley, M (Ed.) Estuarine processes. Estuarine Research Federations Conference Galveston, Texas. Oct. 6-9, 1975. Academic Press. Inc. New York 2: 182-215.

Mann, K.H. 1972. Macrophyte production and detriectus food chains in coastal waters. Mem. Inst. Ital. Ideobiol. 29. Suppl. 353-386.

Marshall, S.M. and Orr, A.P. 1955a. Biology of a marine copepod. Edinburgh: Oliver and Boyd.

Marshall, S.M., Nichols, A. G. and Orr, A.P. 1935. On the biology of Calanus finnarchicus. VI. Oxygen consumption in relation to environmental conditions. F. Mar. Biol. Ass. U.K. 20: 1.

Murray, Jr. B. G. 1982. Oecologia (Berl) 53: 370-373.

Rabinowitch, E.I. 1956. Photosynthesis and related processes. Vol. 2, part 2 pp. 1925-1939.

- Radach, G. 1982. Dynamic interactions between the lower trophic levels of the marine food web in relation to the physical environment during the fladen ground experiment Netherlands Journal of Sea Research 16: 231-246.
- Reid and Wood. 1976. Ecology of inland waters and estuaries.
- Rhoads, D.C. y Young, D.K. 1970. The influence of deposit feeding organism on sediment and stability and community trophic structure. J. Mar. Res. 25: 150-178.
- Ricker, W.E. 1946. Ecology.
- Riley, G.A. 1942. The relationship of vertical turbulence and spring diatom flowering. Jour. Mar. Res. 5: 67-87.
- Riley, G.A. 1946. Factor controlling phytoplankton population on Georges Bank. F. Mars. Res. 6: 54.
- Riley, G.A., Stommel, H. and Bumpus, D.F. 1949. Quantitative ecology of the plankton of the western North Atlantic Bull. Bingham Oceanogr. Cell. 12. art. 3.
- Ritter, W.O. y Guzmán, S.R. 1978. Efectos meteorológicos en la productividad oceánica del Golfo de Panamá. I, II, pp. 349-358.
- Rodhe, W. 1948. Environmental requirements of freshwater plankton algae. Symb. upsalinens 10: 1.
- Rosenblueth, A. 1981. El método científico. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

- Ryther, J. H. 1954b. The ratio of photosynthesis to respiration in marine plankton algae and its effect upon the measurement of productivity. Deep. Sea Res. 2: 134.
- Ryther and Yeuntsh. 1957. *Himnology Oceanology* 2: 281.
- Ryther, J. H. 1956. Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. *Himnol. and Oceanogr.* 1: 61.
- Schwoerberl, J. 1975. *Métodos de hidrobiología*. Ed. Blume Madrid.
- Scott, D. 1965. The determination and use of thermodynamics data in ecology.
- Slobodkin, L. B. 1961. Growth and regulation of animal population. Chap. 12.
- Smith, R.A. 1980. The theoretical basis for estimating phytoplankton production and specific growth rate from chlorophyll light and temperature data. *Ecol. Modelling* 10: 243-264.
- Steele, J. H. 1956. Plant production on the fladen ground. *F. Mar. Biol. Ass. U.K.* 35: 1.
- Steele, J.H. 1974a. The structure of marine ecosystems 128 pp. Cambridge Harvard University Press. Cambridge. Mass.
- Steele, J. H. 1958. The quantitative ecology of marine phytoplankton. *Bio. Rev.* 34.

- Steele, J. H. 1958. Plant production in the Northern sea
Mar. Res. Scot. 1958. No. 7.
- Steele, J. H., Nielsen, E. and Jensen, E.A. 1957. Primary
oceanic production Galathea Rep. 1, 49.
- Sverdrup, H. V., Johnson, M. W., Flemming, R.H. 1942.
The Oceans Prentice Hall. New York. pp. 1087.
- Sverdrup, H. B. 1953. On conditions for the vernal bloo-
ming of phytoplankton. F. Cons. Int. Explor. Mer. 18:
287.
- Tanada, T. 1958. Ibid 39, 276.
- Tood, D.K. 1970. The water encyclopedia water information
Center, Port Washington. N.Y.
- Tribus, M. and McIrvine, C.E. 1978. Energy and information
- Wassink, E.C. 1953. The efficiency of light energy conver-
sion in chlorella cuetores as compared with higher plants.
Cornegie Inst. Wash Publ. No. 600, pp. 55-62.
- Weil, K.P. 1970. Oceanography. Introduction to the Marine
Environment.
- Wroblewski, J. S. and O'brien, J. J. 1975. A spatial model
of phytoplankton patchiness.
- Wyrtki, K. 1964. Termohaline circulation in relation
ship at the general circulation of the oceanic.
- Utterback, C.L. and Jorgensen, W. 1936. ibid 26, 257.

Yañez-Arancibia, A. 1967b. Fish culture in coastal lagoons: Perspectives in Mexico. Progress in Marine Research in the caribbean and adjacent regions. In: Stewart, H.B. (Ed) CICAR II Symposium, Caracas, Venezuela, July 12-16, 1976. FAO Fish. Rep. 200: 529-547 (1977).

Yañez-Arancibia, A. 1978. Taxonomía, Ecología y Estructura de las comunidades de peces en aguas costeras con bocas efímeras del Pacífico de México. Publ. Esp. 2: 1-306.

Yañez-Arancibia, A. 1975a. Sobre los estudios de peces en las lagunas costeras. An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, 2 (1): 53-60.