

24. 2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**PROPIEDADES OPTICAS DEL AGUA DE LA
LAGUNA DE COYUCA, GRO. Y SU
RELACION CON LOS PARAMETROS
HIDROBIOLOGICOS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
F I S I C O
P R E S E N T A:
RAUL AGUIRRE GOMEZ

MEXICO. D. F.

1987



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.

I N D I C E	Pags.
INTRODUCCION	1
1. ANTECEDENTES	4
2. PROPIEDADES OPTICAS DEL AGUA	10
2.1. CONSIDERACIONES GENERALES	10
2.2. ASPECTOS ELECTROMAGNETICOS	16
2.3. CONSIDERACIONES SOBRE LAS -- PROPIEDADES OPTICAS DEL AGUA PURA.	22
2.4. ABSORCION Y DISPERSION	23
3. PARAMETROS HIDROBIOLOGICOS	33
3.1. CONSIDERACIONES GENERALES	33
3.2. CONSIDERACIONES PRACTICAS	34
3.3. PRINCIPALES PARAMETROS HIDRO- BIOLOGICOS	37
4. METODOLOGIA	43
4.1. LOCALIZACION Y ASPECTOS GEO- GRAFICOS	43
4.2. METODO DE ANALISIS	44
4.3. OBTENCION DEL COEFICIENTE DE REFLEXION	44
4.4. OBTENCION DEL COEFICIENTE DE EXTINCION	46
4.5. CORRELACIONES ESTADISTICAS	48

5. RESULTADOS.	51
6. ANALISIS Y DISCUSION	58
6.1. ANALISIS DE LA TABLA No. 1	58
6.2. ANALISIS DE LA REFLECTIVIDAD	59
6.3. ANALISIS DE LA EXTINCION	64
6.4. ANALISIS DE LAS CORRELACIONES	66
7. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	71
APENDICE I	74
REFERENCIAS	76

I N T R O D U C C I O N .

México es un país que cuenta con una gran extensión de mar territorial. Sus costas están bañadas por los océanos Atlántico y Pacífico que le proporcionan recursos altamente explotables, tanto a nivel científico como económico. Cuenta además, con sistemas acuáticos internos como son los ríos, lagos, lagunas, etc.

Un conocimiento profundo de estos recursos acuáticos traería como consecuencia un mejor aprovechamiento de ellos. Sin embargo, este conocimiento no puede ser completo si no se tiene el concurso de varias disciplinas que participen en él. La ciencia, en general, no está exenta de esta tarea; es así como las ciencias químicas, físicas y biológicas entre otras contribuyen en gran medida al conocimiento de estos recursos. Creemos que es a través de la participación dialéctica de estas ciencias como se puede lograr este objetivo, es decir, los estudios interdisciplinarios son una opción válida e importante para alcanzar el desarrollo.

La Física nos brinda la posibilidad de hacer estudios profundos de los hechos y fenómenos que ocurren en el

agua en particular. Por ejemplo, es posible estudiar las propiedades físicas del agua a través de diferentes ramas de esta ciencia. Estas propiedades pueden ser: Térmicas, mecánicas, eléctricas, acústicas y ópticas.

Las propiedades ópticas del agua de mar, en particular, se refieren a la transparencia de ésta y a la reflexión y refracción de la luz en este medio.

La propagación de las ondas luminosas en el mar, se explica por las propiedades físico-químicas del agua y por las características físicas de la luz, que a su vez tienen gran importancia en los fenómenos biológicos que ocurren en el mar.

En el presente trabajo, nos avocamos al estudio de las propiedades ópticas del agua de una laguna costera, en forma experimental. Se determina el valor de los coeficientes de estas propiedades mediante el uso de equipos adecuados.

Los objetivos que se persiguen en este trabajo son los siguientes:

- 1.- Ofrecer una visión general de las propiedades ópticas del agua, mostrando sus conceptos fundamentales.

- 2.- Determinar el valor de los coeficientes de reflexión y de extinción que caracterizan a estas propiedades.
- 3.- Correlacionar el valor de estos coeficientes con algunos parámetros hidrobiológicos.

Los objetivos anteriores se alcanzan de manera distinta, el primero a través de investigación bibliográfica, - el segundo en forma experimental y el último mediante un análisis estadístico por computadora de coeficientes de correlación.

Este trabajo forma parte del proyecto de Percepción Remota del Laboratorio Interdisciplinario de la Facultad de Ciencias de la U.N.A.M.

1.- ANTECEDENTES.

El estudio de las propiedades ópticas del agua se remonta a muchos años atrás. En particular, la investigación sistemática del efecto de la luz en el agua de mar, conocida como Oceanografía Óptica, recibió su impulso inicial a principios del siglo XIX con las investigaciones realizadas independientemente por Kotsebu, oficial de la marina rusa, y por P.A. Secchi, astrónomo italiano, quienes hicieron observaciones de la transparencia del agua sumergiendo un disco plano en el océano y anotando la profundidad a la que éste dejaba de ser visible.

En 1889, Regnard hizo uso de una celda fotoeléctrica de Selenio para medir la luz natural en el océano; no obtuvo datos de utilidad, pero sentó las bases para el futuro aprovechamiento de diseños fotoeléctricos para explorar parámetros luminosos en el agua.

Shelford y Gail realizaron, en 1922, una buena aplicación en el uso de las fotoceldas al efectuar mediciones que relacionaban la penetración luminosa y la distribución de plantas marinas, realizando además mediciones de la ilumina-

ción submarina en función de la altura solar y la profundidad en el agua.

En el mismo año Atkins y Poole estimulados por el trabajo de Shelford y Gail, iniciaron una serie de investigaciones que continuaron por espacio de 30 años y que enriquecieron en gran medida el conocimiento de las propiedades ópticas del mar y la distribución de luz en el océano.

En 1934, Pettersen publicó una serie de siete artículos sobre la luz en el mar; diseñó instrumentos e hizo mediciones de todas las propiedades ópticas básicas requeridas para una documentación óptica completa del agua oceánica.

En el año de 1936, se realizó el Congreso "International Council for the Exploration of the Sea", con el fin de normalizar la instrumentación para la medición de la luz en el mar, introducir unidades de medición adecuadas y presentar informes de las investigaciones efectuadas hasta esa fecha.

Jerlov y Liljeqvist, en 1938, reportaron datos importantes sobre la distribución de radiancia en un campo luminoso natural, usando como parámetros la profundidad y el color del océano, ángulo solar y las condiciones de ilumina-

ción de la superficie; con los datos obtenidos calcularon, por integración, algunas cantidades que posteriormente se ligarían a la teoría de transferencia radiativa en el mar.

Legrand publicó, en 1939, un artículo sobre la penetración luminosa en el mar, donde se hacía un análisis muy cuidadoso y exhaustivo sobre la luz en el agua, provocando una gran influencia en el ámbito.

En los Estados Unidos, L.V. Whitney publicó en 1941, dos artículos en los cuales predijo la existencia de la distribución de radiancia a grandes profundidades, basándose en estudios efectuados en los lagos de Wisconsin.

En 1947-1948, una expedición sueca dirigida por H. Pettersen, realizó un viaje de circunavegación, tomando mediciones ópticas, tales como registros in situ de la transparencia del agua por medio de un haz luminoso; lecturas en laboratorio de dispersión a 45° del haz luminoso; todo esto mediante variaciones espectrales y cambios de profundidad en el mar.

En 1950 - 1951, una expedición danesa, al mando de A. Fr. Bruun, realizó una investigación profunda para ma

dir la productividad orgánica de áreas oceánicas importantes y para relacionar la actividad fotosintética con medidas de la energía radiante submarina disponible. Este programa, que fué dirigido por Nielsen y Jensen, fué novedoso y tuvo mucho éxito.

El año de 1956, fué importante en el estudio óptico del mar cuando Legrand, dirigiendo el barco Calypso, realizó una serie de medidas para determinar la transmitancia espectral de las aguas costeras en el mediterráneo, reportando mediciones de radianza en las regiones ultravioleta y visible del espectro electromagnético, y aportando elementos sobre la polarización submarina.

En el Año Geofísico Internacional, 1957 - 1958, dos embarcaciones, bajo los auspicios del Instituto Hidrográfico Alemán, realizaron medidas simultáneas de temperatura y transmitancia en el Atlántico norte, para crear un perfil vertical de estos dos parámetros en un estudio dedicado a observar la interacción de diferentes masas de agua.

En años más recientes se han realizado investigaciones en diversas partes del mundo, en las que se cuenta -

con una tecnología mas avanzada para la determinación de características ópticas de cuerpos de agua, por ejemplo, existen estudios realizados con espectroradiómetros sumergibles. También existe la posibilidad de hacer análisis por medio de técnicas de Percepción Remota que brindan la oportunidad de conocer una zona amplia del área de estudio a través de su comportamiento reflectivo como función del material en suspensión.

En la literatura revisada, se encontró que en México sólo en fechas recientes se han realizado estudios ópticos de cuerpos de agua, concentrándose principalmente en la Universidad Nacional Autónoma de México; por ejemplo, en el año de 1977, Ruíz y Lemus realizaron un estudio acerca de las características espectrales en diversas regiones del espectro - - electromagnético, del material suspendido en las presas Requena y la Esperanza.

En el año de 1983, en el Seminario sobre la Percepción Remota en México, Ruíz, De la Lanza y Vega presentaron un trabajo sobre hidrología de cuerpos de agua y Percepción Remota, aplicado principalmente a la laguna de Coyuca de Benitez.

Ruiz presentó, en 1985, correlaciones estadísticas entre los parámetros hidrobiológicos medidos, en el verano de 1981, en la laguna de Coyuca y la "reflectividad" obtenida de las imágenes multiespectrales del satélite Landsat 3, con el fin de mostrar la posibilidad de detectar algunos parámetros hidrobiológicos como son el fitopláncton, la clorofila, la producción primaria, los sólidos suspendidos, etc., a través de esta técnica.

Aguirre y Ruiz presentaron, en el mismo año, resultados radiométricos "in situ" de la laguna de Coyuca de Benitez, correlacionando la radiación reflejada por este cuerpo de agua y los parámetros hidrobiológicos.

Estos trabajos sirven como base para el desarrollo de la presente investigación.

2.- PROPIEDADES OPTICAS DEL AGUA

Las propiedades ópticas del agua revisten, hoy en día, una gran importancia, dado que, es a través de ellas - que podemos conocer el comportamiento de la luz cuando inter actúa con este fluido.

En este capítulo daremos algunas consideraciones - generales que se tienen sobre este tema, así como un funda- mento teórico, basado en la teoría electromagnética y final- mente la aplicación de ésta a una situación real.

2.1.- Consideraciones Generales.

El conocimiento de las propiedades ópticas del agua está basado en los diversos fenómenos que sufre la luz en los diferentes medios en que se propaga; la reflexión, la transmi- sión y la refracción son algunos de estos fenómenos. Estas - propiedades son utilizadas, en gran medida, en diversas ramas de la ciencia y de la ingeniería. Por ejemplo, en la Oceano- grafía óptica se utilizan para explicarse fenómenos de trans- parencia del mar, en la Biología Marina para determinar zonas acuáticas productivas y en la Ingeniería para la creación de instrumental submarino que permita un estudio más profundo de

este medio.

Todos estos estudios se basan en la información - que se tiene de las propiedades ópticas del agua pura, a -- través de análisis en laboratorio, para después establecer un patrón de comparación con los sistemas acuáticos naturales.

Actualmente, las propiedades ópticas del agua se han separado en dos grupos: Propiedades Inherentes y Propiedades Aparentes (Preisendorfer, 1961).

Las Propiedades Inherentes son aquellas que son - independientes de los cambios de la distribución radiante, - de la orientación del haz luminoso, y de las condiciones de iluminación del medio óptico.

Las Propiedades Aparentes son aquellas que sí dependen de estos cambios (Morrison, 1970).

Esta separación nos indica el carácter que deben - tener estas propiedades; ésto es, la obtención de los valores para las Propiedades Inherentes debe hacerse en condiciones - de laboratorio, donde se puede tener control sobre algunas -- variables, mientras que la obtención para los valores de las

Propiedades Aparentes debe hacerse en trabajo de campo.

Existen cuatro Propiedades Inherentes, que son las siguientes:

- 1.- Coeficiente de Atenuación (α)
- 2.- Coeficiente de Absorción (a)
- 3.- Coeficiente de Dispersión (s)
- 4.- Función de Dispersión Volumétrica β (θ)

Estos coeficientes se relacionan de la siguiente manera:

$$\alpha(\lambda) = a(\lambda) + s(\lambda) \quad \text{y} \quad s = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin\theta d\theta$$

lo que formalmente quiere decir que la atenuación luminosa depende de la absorción y la dispersión producidas en el medio. Debemos notar que las Propiedades Inherentes se refieren a la propagación luminosa en el medio acuático.

A diferencia de las Propiedades Inherentes, que son muy concretas, existe una gran gama de Propiedades Aparentes representadas por diversos coeficientes. Entre éstos se encuentran, principalmente, los siguientes:

1.- Coeficiente de Reflexión ó Reflectividad (R)

2.- Coeficiente de Extinción (d')

El Coeficiente de Reflexión se define operacionalmente como el cociente de la radianza reflejada L y de la irradianza E, esto es:

$$R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{L(\theta_r, \phi_r)}{E(\theta_i, \phi_i)}$$

donde se nota la dependencia que existe con la orientación del haz luminoso, representado por el ángulo polar θ y el ángulo azimutal ϕ .

La radianza L se define como la cantidad de energía que emerge desde un elemento de superficie por unidad de tiempo. La irradianza E se define como la cantidad de energía que incide en un elemento de superficie, por unidad de tiempo.

Formalmente se definen como el valor promedio del vector de Poynting $S = \bar{E} \times \bar{H}$ (Hecht, 1974), del siguiente modo:

$L = \langle S \rangle = \langle E_r \times H_r \rangle$ y $E = \langle S \rangle = \langle E_i \times H_i \rangle$, donde i quiere decir incidente y r reflejado. Por lo tanto, lo podemos representar así:

$$R = \frac{\overline{E_r \times H_r}}{\overline{E_i \times H_i}}$$

(1)

El coeficiente de extinción (K) se define en función de la irradianza superficial E_0 y la irradianza E_z a una cierta profundidad z , como un decaimiento exponencial, esto es:

$$E_z = E_0 e^{-Kz} \quad (2)$$

este coeficiente también es conocido como coeficiente de -- atenuación difusa.

Es importante destacar que las propiedades ópticas aparentes consideran tanto al fenómeno de la reflexión como al de transmisión y son de gran importancia en el desarrollo de investigaciones realizadas en campo, por lo que son indispensables en el presente trabajo.

Ahora bien, debe hacerse una distinción entre el coeficiente de atenuación κ y el coeficiente de atenuación difusa o de extinción K . El coeficiente de atenuación es, como ya mencionamos, una propiedad inherente del medio, dependiente únicamente de las características ópticas de éste y es utilizado, en gran medida, en situaciones de laboratorio.

El coeficiente de atenuación difusa mide la extinción de la luz del día con la profundidad de penetración en el agua considerando, además, factores externos tales como la altura del sol (θ), la cobertura de nubes, la longitud de la trayectoria, etc., así como también a las propiedades ópticas inherentes como lo es α (Cushing, 1976), es decir, --
$$K = K(\alpha, \theta, z)$$

En investigaciones de campo, éstos dos coeficientes se relacionan generalmente del siguiente modo: (Jerlov, 1974)

$$K = \alpha (1 - \cos \theta)$$

Esta relación es válida en condiciones adecuadas - tales como: días despejados, poco viento, oleaje escaso, etc.

Deben observarse en esta relación los dos aspectos siguientes:

a).- El coeficiente de extinción depende del valor del coeficiente de atenuación.

b).- A incidencia normal, $\theta=90^\circ$, ambos coeficientes coinciden.

Por consiguiente, se puede dar una estimación de n en función de α y de θ en los trabajos de campo.

Por otro lado, para una descripción detallada del conjunto de propiedades ópticas del agua se puede consultar un artículo de Preisendorfer (1960), sobre este tema.

El estudio de las propiedades ópticas descansa sobre una base teórica sólida, proporcionada por la teoría -- electromagnética (Döring, 1965), como se verá en el siguiente inciso.

2.2. Aspectos Electromagnéticos.

La teoría electromagnética proporciona una visión general de lo que sucede con una onda electromagnética al -- interactuar en medios diferentes.

Consideremos la siguiente situación: Una onda electromagnética que viaja en un medio no conductor, incide en -- la superficie de un medio conductor, parte de esta onda se refleja y parte se transmite en el medio.

Para simplificar el análisis de esta situación, supondremos que la onda electromagnética es monocromática, pla-

na e incide normalmente en el medio conductor (Fig. 1).

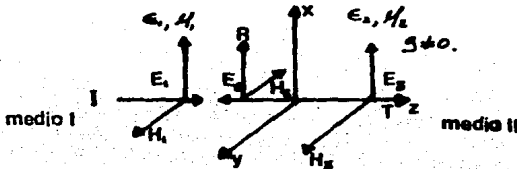


Fig. 1 Representación esquemática de una onda electromagnética incidiendo normalmente en un medio conductor.

El medio 1, no conductor, está caracterizado por las constantes ϵ_1 y μ_1 , mientras que el medio 2, conductor, lo está por ϵ_2 y μ_2 , y una conductividad g distinta de cero ($g \neq 0$).

Los campos eléctricos y magnéticos \vec{E}_1 , \vec{H}_1 , \vec{E}_2 , \vec{H}_2 representan a las ondas incidentes y reflejada, respectivamente y se expresan del siguiente modo:

$$\vec{E}_1 = \hat{i} E_{1,0} e^{i(k_1 z - \omega t)} \quad , \quad \vec{H}_1 = \hat{j} \sqrt{\epsilon_1 / \mu_1} E_{1,0} e^{i(k_1 z - \omega t)}$$

$$\vec{E}_2 = \hat{i} E_{2,0} e^{i(k_2 z - \omega t)} \quad , \quad \vec{H}_2 = \hat{j} \sqrt{\epsilon_2 / \mu_2} E_{2,0} e^{i(k_2 z - \omega t)} \quad (3)$$

donde ϵ_1 y ϵ_2 representan la permitividad en cada medio, μ_1 y

μ_2 la permeabilidad, ω es la frecuencia de la onda y $k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$

La onda transmitida en el medio conductor queda expresada como:

$$\vec{E}_3 = \hat{z} E_{3,0} e^{i(\eta z - \omega t)} \quad , \quad \vec{H}_3 = \hat{y} \frac{\eta E_{3,0}}{\omega \mu_2} e^{i(\eta z - \omega t)} \quad (4)$$

donde η es llamada constante de propagación y está dada por la siguiente relación (ver apéndice I)

$$\eta = \sqrt{\omega^2 \epsilon_2 \mu_2 + i \omega \mu_2 \sigma} = \alpha + i \beta \quad (5)$$

de donde, a través del álgebra de los números complejos, obtenemos las siguientes expresiones para α y β .

$$\alpha = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}{2} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_2} \right)^2} \right]^{1/2}, \quad \beta = \frac{\omega \mu_2 \sigma}{2 \alpha} \quad (6)$$

Considerando las condiciones a la frontera apropiadas, tenemos lo siguiente (Reitz, 1969):

$$E_{1,0} + E_{2,0} = E_{3,0} \quad \text{para la componente tangencial eléctrica.} \quad (7)$$

$$\sqrt{\epsilon_1 / \mu_1} (E_{1,0} - E_{2,0}) = \frac{\eta E_{3,0}}{\omega \mu_2} \quad \text{para la componente tangencial magnética.} \quad (8)$$

Los componentes normales de los campos se anulan al considerar la incidencia normal.

Como η es compleja, $E_{1,0}$ y $E_{3,0}$ no pueden ser -- ambas reales. Esto indica que pueden existir corrimientos de fase distintos de cero y de π .

Resolviendo formalmente las ecuaciones (7) y (8) para $E_{2,0}$ y $E_{3,0}$ en función de $E_{1,0}$, tenemos lo siguiente:

$$E_{2,0} = \frac{1 - \frac{\eta}{\omega \mu_2} (\sqrt{\mu_1/\epsilon_1})}{1 + \frac{\eta}{\omega \mu_2} (\sqrt{\mu_1/\epsilon_1})} E_{1,0} \quad \text{para el campo reflejado} \quad (9)$$

$$E_{3,0} = \frac{2}{1 + \frac{\eta}{\omega \mu_2} (\sqrt{\mu_1/\epsilon_1})} E_{1,0} \quad \text{para el campo transmitido.}$$

Estas ecuaciones son válidas pero complicadas. -
Conviene, por lo tanto, hacer aproximaciones que nos representen situaciones de interés.

Por ejemplo, se obtiene una buena aproximación -
para un buen conductor si consideramos: $\frac{\sigma}{\omega \epsilon_2} \gg 1$

de donde f y δ se transforman en:

$$f = \delta = \sqrt{\frac{\omega \mu_2 \sigma}{2}} \quad (10)$$

Basándose en estos resultados, se tiene una expresión para la amplitud del campo reflejado dada por

$$E_{2,0} = \frac{1 - (1+i)\sqrt{\frac{\mu_1}{2\omega\mu_0\epsilon_1}}}{1 + (1+i)\sqrt{\frac{\mu_1}{2\omega\mu_0\epsilon_1}}} \quad (11)$$

De las ecuaciones de Fresnel sabemos que el coeficiente de reflexión se obtiene al comparar el vector de Poynting reflejado con el incidente. Como ambas ondas están en el mismo medio es equivalente comparar el cuadrado de la magnitud de $E_{2,0}$ con el cuadrado de la magnitud de $E_{1,0}$ esto es

$$R = \frac{|E_{2,0}|^2}{|E_{1,0}|^2} \quad (12)$$

Por otro lado, la onda transmitida tal como se había expresado en (4) representa la solución a la ecuación de onda en un medio conductor (Edminister, 1979) y puede desarrollarse de la siguiente manera, recordando que $\eta = \delta + i\gamma'$

$$\vec{E}_2 = \hat{z} E_{2,0} e^{i(\delta z - \omega t)} e^{-\gamma' z}, \quad \vec{H}_2 = \hat{y} \sqrt{\epsilon_1/\mu_1} E_{2,0} e^{-i(\delta z - \omega t)} e^{-\gamma' z} \quad (13)$$

que representa claramente una onda amortiguada en la dirección z.

Es importante hacer notar que se produce atenuación de la onda de corrimiento de fase, en virtud de que existe conductividad en el medio 2. Si $g=0$, puede observarse en las ecuaciones (6) que $\sigma = \omega\sqrt{\epsilon_2}$, $\delta_1=0$ con lo que se recupera la expresión para la onda transmitida en un medio no conductor con incidencia normal:

$$\vec{E}_3 = \hat{z} E_{s,0} e^{i(k_2 z - \omega t)} \quad (\text{Reitz, 1969})$$

Las consideraciones hechas hasta ahora, son para la interacción de una onda electromagnética en dos medios diferentes arbitrarios. Nos interesa aplicar estos conceptos a la situación particular siguiente: La luz solar viajando a través de la atmósfera incide en un cuerpo de agua natural, el cual la refleja y la refracta.

En el siguiente inciso se dan algunas consideraciones sobre lo que sucede en la interacción de la luz con el agua.

2.3. Consideraciones sobre las propiedades ópticas - del agua pura.

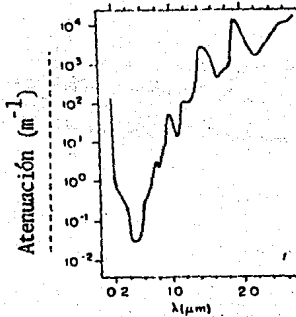
Se llama agua pura a la que no contiene sales y carece de material disuelto y/o en suspensión. Este compuesto presenta características ópticas que nos son de gran ayuda para el desarrollo del presente trabajo. Estas características son las siguientes:

1.- El agua pura es capaz de reflejar la luz en forma especular y, en ciertas condiciones, en forma difusa.

2.- Posee una gran capacidad de atenuación del haz luminoso.

3.- Dada su estructura molecular presenta una absorción y una dispersión selectiva dependiente de la longitud de onda que actúe en ella.

Con base en esta última característica, sabemos que absorbe de manera importante la radiación infrarroja transformándola en calor. Mientras que en la zona de visible es, en gran medida, transparente, es decir, su atenuación es baja en la región del azul ($\lambda=400-600$ nm) alcanzando un mínimo alrededor de los 480 nm (ver fig.2) (Ishimaru, 1978).



Atenuación de la luz por agua pura como función de la longitud de onda (De Jerlov y Steemann Nielsen, 1974 pp. 18 19.)

Fig. 2.

Es conveniente, sin embargo, esclarecer los conceptos de absorción y de dispersión, con el fin de obtener una visión mas amplia del fenómeno de atenuación de las ondas electromagnéticas en un medio dispersor.

2.4. Consideraciones generales sobre la absorción y la dispersión.

En este inciso nos ocuparemos, principalmente de la absorción y sus aspectos mas relevantes; después nos avocaremos a la descripción de la dispersión. Debemos mencionar, que la presentación de la descripción de estos con

ceptos no es muy detallada, aunque toca los aspectos principales.

Existe una visión, que podemos llamar "clásica", acerca de la absorción selectiva y es la siguiente: Un átomo es eléctricamente neutro, dado que consta del mismo número de protones, localizados en el núcleo, y de electrones rodeándolo. Al aplicar un campo eléctrico al átomo, es posible polarizarlo, es decir, se puede lograr un corrimiento del centro de la carga positiva de este átomo, en la dirección del campo, y otro desplazamiento, del centro de la carga negativa en la dirección opuesta. (Suponiendo que estos centros coinciden inicialmente). Este desplazamiento de los centros produce un dipolo eléctrico, que crea un campo eléctrico fuera del átomo; tanto la polarización del átomo como el campo del dipolo inducido permanecen mientras exista el campo exterior. (Ver figura a).

En el caso de una molécula la situación es un poco diferente. Existen moléculas denominadas polares, llamadas así porque poseen un momento dipolar permanente, como es el caso del ácido clorhídrico (HCl) y el agua (H_2O) en--

tre muchas otras. Estas moléculas tienen un centro positivo, correspondiente al Hidrógeno, y un centro negativo correspondiente a los iones de Cloro y de Oxígeno, respectivamente. Es decir, sus centros de carga no coinciden y dan lugar a un campo dipolar exterior (Ver figura b).

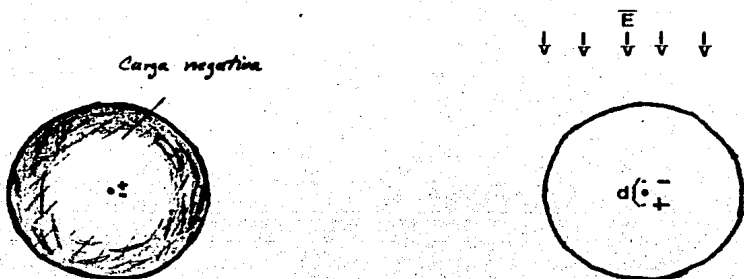


Fig. a.- Representación esquemática de la polarización inducida.

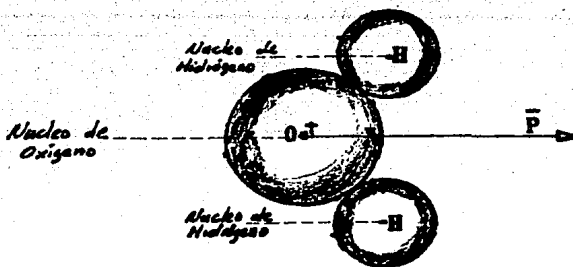


Fig. b.- Representación esquemática de una molécula de agua y la dirección de \vec{P}

En ausencia de un campo eléctrico externo, los dipolos moleculares están orientados al azar. Por lo que no existe ninguna dirección dominante del campo de los múltiples dipolos presentes en un conjunto de moléculas. Dado que el número de moléculas presentes en una muestra de dieléctricos es extremadamente grande, esto hará que los campos se anulen efectivamente. Al aplicar un campo eléctrico a estas moléculas el efecto que se obtiene es el de ordenar los dipolos, quienes experimentarán una torsión. Esta torsión tiende a alinear los dipolos permanentes con el campo, de tal forma que las cargas positivas se orienten en la dirección de éste y las cargas negativas en la dirección antiparalela. Al igual que en el átomo, este efecto dura mientras esté presente el campo externo. (Ver figura c).

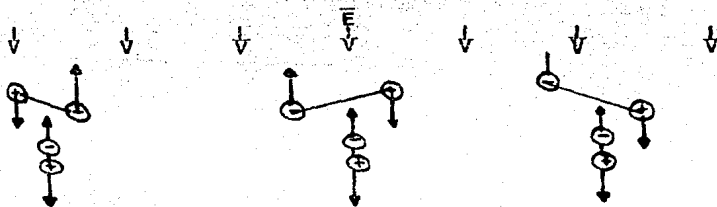


Fig. c. - Representación esquemática del efecto de torsión experimentado por las moléculas a causa de un campo externo.

Con base en esta situación es posible comprender la absorción selectiva de la longitud de onda por parte de las moléculas, como una manifestación de la resonancia. El fenómeno de resonancia se encuentra en casi todas las ramas de la física. Si lo aplicamos a este caso tendremos la siguiente situación: Supongamos que los electrones están ligados al núcleo atómico como por resortes, por lo que tendrán una fuerza restauradora lineal junto con su masa. Esto es, estamos pensando a los electrones como pequeños osciladores con una frecuencia de resonancia ω_0 . Su ecuación de movimiento estará dada por:

$$F = m \left(\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x \right)$$

donde F es la fuerza relacionada con el campo eléctrico -- $\bar{F} = q\bar{E}_0$ y γ es un coeficiente de amortiguamiento. La solución de la ecuación es de la siguiente forma:

$$x = X_0 e^{i\omega t}$$

y al sustituir en la ecuación original, tendremos el siguiente valor:

$$X = \frac{qE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)}$$

considerando que la contribución de la fuerza magnética es despreciable y que la amplitud de oscilación es lo suficientemente pequeña para que el campo eléctrico pueda ser evaluado en la posición promedio del electrón. Si el campo eléctrico varía en forma armónica con el tiempo $e^{i\omega t}$, tendremos que la contribución del momento dipolar de cada electrón es:

$$\bar{P} = q x = \frac{q^2 E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma)}$$

En general, si existen N moléculas por unidad de volumen con Z electrones por molécula y, además, en lugar de tener la frecuencia de un sólo enlace para todos los átomos, se tienen f_j electrones por molécula con frecuencia de resonancia ω_j y constante de amortiguamiento γ_j ; obtenemos una expresión para la constante dieléctrica $\epsilon(\omega)$, que está dada por la siguiente relación:

$$\epsilon = 1 + 4\pi \chi_e = 1 + \frac{4\pi q^2 N}{m} \sum_j \frac{f_j}{(\omega_j^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j)} \quad \text{con } (\sum_j f_j = Z)$$

Analizando esta relación, se pueden notar los siguientes aspectos: a) En general, las γ_j son pequeñas comparadas con ω_j . Si $\omega_j > \omega$ entonces la parte real de ϵ

es considerada como dispersión normal. b) Si ocurre que $\omega_j < \omega$ se considera como dispersión anómala. En este caso puede apreciarse la parte imaginaria de ϵ . Esta parte imaginaria representa una absorción de la onda.

Con esto podemos decir lo siguiente: si la absorción de una onda electromagnética es muy pequeña, entonces $(\omega_j^2 - \omega^2) \gg \delta'_j$, pero si la frecuencia de la onda ω está muy cerca de ω_j , entonces $(\omega_j^2 - \omega^2)$ puede llegar a ser muy pequeña comparada con δ'_j ; y la constante dieléctrica ser completamente imaginaria, siendo la absorción el efecto dominante.

Ahora bien, el fenómeno de dispersión se muestra más claramente, considerando la parte real de esta última ecuación. Analicemos la siguiente situación: Es sabido que en muchos gases ordinarios (Hidrógeno, Helio, etc.), las frecuencias de oscilación se ubican principalmente en el intervalo de la luz ultravioleta. Las frecuencias en el ultravioleta son más altas que en el visible, esto es, $\omega_j > \omega$. Como una primera aproximación se puede despreciar ω^2 al compararlo con ω_j^2 , esto indica que la constante dieléctrica permanece casi inalterable. Sin embargo, al aumentar el valor -

de w el valor de la constante dieléctrica también aumenta, por lo que se puede decir que su valor es mayor en el azul que en el rojo. Esta es la razón por la cual un prisma -- puede desviar más la luz azul que la roja. A este fenómeno se le conoce como dispersión.

Por otro lado, es necesario considerar la parte - imaginaria de la ecuación, con el fin de no dejar fuera a - muchas situaciones naturales de interés, como es el caso de la dispersión en sistemas más complicados (agua, metales, - etc.). Por lo tanto, para un tratamiento detallado de la - dispersión, es necesario emplear la relación compleja de la constante dieléctrica. Si la variación de ϵ' ó del coeficiente de absorción se conocen para todas las longitudes de onda, entonces la otra puede ser conocida por medio de las relaciones de Kramers-Krönig (Nassau, 1983). Usualmente se tiende - a pensar en la absorción como la "causa" y en la dispersión - como el "efecto", sin embargo, ambos fenómenos están estrechamente ligados y no puede existir uno en ausencia del otro. Jackson (1975), desarrolla formalmente el aspecto matemático - de estas relaciones de dispersión.

Existe, sin embargo, un concepto de dispersión diferente al mencionado que se refiere a la capacidad que poseen las partículas localizadas en medios cualesquiera, de esparcir la luz natural o artificial. Si estas partículas son más pequeñas que la longitud de onda de la luz que las ilumina, se produce la llamada dispersión de Rayleigh. Si el tamaño de las partículas es superior al de la longitud de onda de la luz incidente, esto da lugar a la llamada dispersión de Mie. Mie desarrolló en 1908, una teoría general de dispersión luminosa por partículas esféricas, isotrópicas, etc. En esta teoría se enuncia que la dispersión llega a ser más intensa y más prominente en la dirección hacia adelante, por lo que la dispersión en el azul ya no es tan importante, como en el caso de la teoría de dispersión de Rayleigh. Los cálculos en la teoría de Mie son complicados y requieren, en general, del uso de una computadora. Ishimaru (1978) hace una descripción matemática detallada de los cálculos usados en esta teoría. Por otro lado, cuando la forma de las partículas no es tan simple, es necesario tener un enfoque más complicado que, hasta la fecha, no se ha desarrollado plenamente.

Finalmente, podemos decir que la conjugación de - la absorción y de la dispersión -esparcimiento- nos dan la atenuación de una onda electromagnética. Estos fenómenos - están presentes, en diferentes proporciones, en los materiales sometidos a estudio.

Estos conceptos y los vertidos anteriormente, nos serán de utilidad al analizar el comportamiento de la luz en un medio como el agua, que contenga partículas suspendidas - y disueltas. En el siguiente capítulo se mencionan las di-- versas sustancias y partículas que conforman los parámetros hidrobiológicos presentes en el cuerpo de agua, que le dan - una óptica distinta a este sistema.

3.- PARAMETROS HIDROBIOLOGICOS.

En este capítulo se habla de la importancia de la interacción entre los parámetros hidrobiológicos y las propiedades ópticas del agua, en un sistema natural.

3.1.- Consideraciones Generales.

Como ya se vió, el agua pura es transparente en la zona del azul-verde en el espectro electromagnético -- (Ishimaru, 1978). Sin embargo, si el agua no es pura, esto es, si contiene sales y material disuelto y en suspensión, como es el caso en los cuerpos de agua existentes en el planeta, se producirá una atenuación importante del haz luminoso.

Esta atenuación es provocada por mecanismos de absorción y dispersión producidos, no sólo por la constitución molecular del agua, sino por la presencia del material disuelto y suspendido. Dependiendo de la cantidad y de las cualidades de esta materia se tendrán diversas características ópticas. Por ejemplo, el color del mar es, en ciertas regiones, un azul intenso ocasionado por la baja concentración de material suspendido; mientras que en aguas costeras

predomina el color verde, provocado por la presencia de partículas nutritivas y de microorganismos que conforman el plancton (Morel, 1977).

La transparencia del agua está, por consiguiente, en función del contenido de materia orgánica presente y de las condiciones dinámicas del medio ambiente, como son la variación del ángulo de incidencia solar, las características superficiales del agua, la topografía circundante y las condiciones meteorológicas (Wetzel, 1975). Estas condiciones son básicas para la caracterización de las propiedades ópticas aparentes.

Conviene especificar estas condiciones dinámicas - a fin de enmarcar, con más formalidad, la situación que deseamos analizar.

3.2.- Consideraciones Prácticas.

La energía solar que incide sobre la superficie de la Tierra tiene un intervalo espectral que abarca desde los 300 nm., correspondientes al ultravioleta hasta los 3000 nm., correspondientes al infrarrojo, después de su paso por la atmósfera (Strother, 1980). La luz visible es la porción de -

esta energía que puede ser detectada por el ojo humano y se localiza en el intervalo de los 380 nm. a los 780 nm., aproximadamente. La región fotosintéticamente activa se encuentra, aproximadamente, de los 390 nm. a los 710 nm., (Strickland, 1958).

La superficie del agua refleja una cantidad significativa de energía luminosa. Esta reflexión está en función de las condiciones mencionadas. Entre los aspectos principales de éstas, se considerarán las siguientes:

1.- La reflexión de la radiación solar directa aumenta conforme crece el ángulo de incidencia solar en relación a la normal, esto es, visto de otra manera, la reflexión disminuye hacia el mediodía y es mayor cerca del amanecer o del atardecer.

2.- Existe un aumento de reflexión dependiendo de las características superficiales del agua, como son: la acción de las olas, la presencia de hielo, etc., que producen que la reflexión sea más difusa mientras mayor es su magnitud.

Con base en esto, se puede decir que la luz que incide en un cuerpo de agua no penetra completamente, dado

que existe la reflexión.

La luz que logra penetrar en el medio es rápidamente atenuada por la absorción y la dispersión.

La absorción de la energía luminosa es la fuente principal del calentamiento del agua, es decir, la energía luminosa que es absorbida tanto por el agua como por los compuestos orgánicos disueltos y la materia orgánica particulada, es transformada en calor. Este proceso de absorción se presenta de manera importante en el intervalo del infrarrojo. De esto se deriva que más de la mitad de la energía solar es absorbida por el medio acuático.

Por otro lado, la dispersión de la energía luminosa puede verse como una mezcla de la reflexión producida por la cantidad de arreglos angulares existentes en el interior del agua.

La amplitud de la dispersión en un volumen específico de agua varía grandemente con la composición, la cantidad y la transparencia relativa de los materiales suspendidos. Este proceso se da principalmente en la zona del espectro visible.

Estos factores indican que la absorción y la dispersión dependen de la longitud de onda, es decir, son un proceso selectivo. (ver fig. 3). Conviene mencionar a los elementos que conforman a los parámetros hidrobiológicos -- mas importantes en el estudio óptico de un cuerpo de agua, -- dado que la mayoría de ellos constituye la materia suspendida y disuelta que se ha venido mencionando.

3.3.- Principales Parámetros Hidrobiológicos.

Los principales parámetros hidrobiológicos que se consideran en este estudio son los siguientes:

- 1.- Cantidad de organismos planctónicos (fitoplancton y zooplancton).
- 2.- Concentración de clorofila (CLO)
- 3.- Materia orgánica particulada (MOP)
- 4.- Carbono orgánico particulado (COP)
- 5.- Nutrientes (fosfatos, nítritos, nitratos, amonio).
- 6.- pH
- 7.- Medida de la producción primaria neta (PPN)
- 8.- Medición de la demanda química de Oxígeno (DQO)
- 9.- Medición de la demanda bioquímica de Oxígeno (DBO)

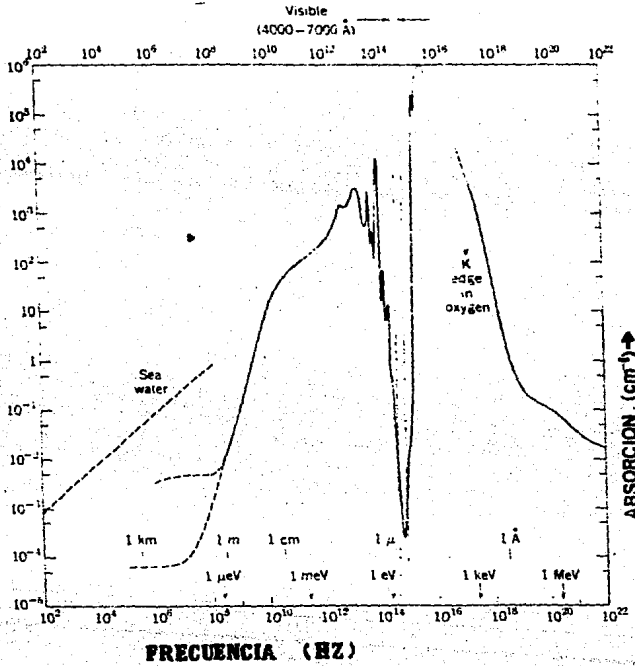


FIG. 3. COEFICIENTE DE ABSORCION DEL AGUA LIQUIDA -
EN FUNCION DE LA FRECUENCIA (JACKSON, 1975).

La importancia de estos parámetros radica en los siguientes hechos: Los organismos planctónicos conforman unos de los principales componentes de la materia suspendida que, como ya se vió, influyen enormemente en la visibilidad o transparencia de un cuerpo de agua. Son organismos con la capacidad de absorber y dispersar la energía luminosa en forma selectiva. El fitoplancton es la microflora marina, y es el alimento principal de los peces y la principal fuente del abasto de oxígeno en el mundo - - - - (Vershinski, 1980).

La producción de este elemento, tan importante para la vida, está vinculado con la función fotosintética. La clorofila es el pigmento responsable de esta función vital. Este pigmento posee también, la capacidad de absorber la energía luminosa que requiere para su labor, con lo que influye enormemente en la caracterización óptica del medio (Fig. 4).

Estos parámetros conforman la materia particulada, entre otros elementos.

Sin embargo, el fitoplancton y el zooplancton requieren de un medio adecuado para su desarrollo. Este medio

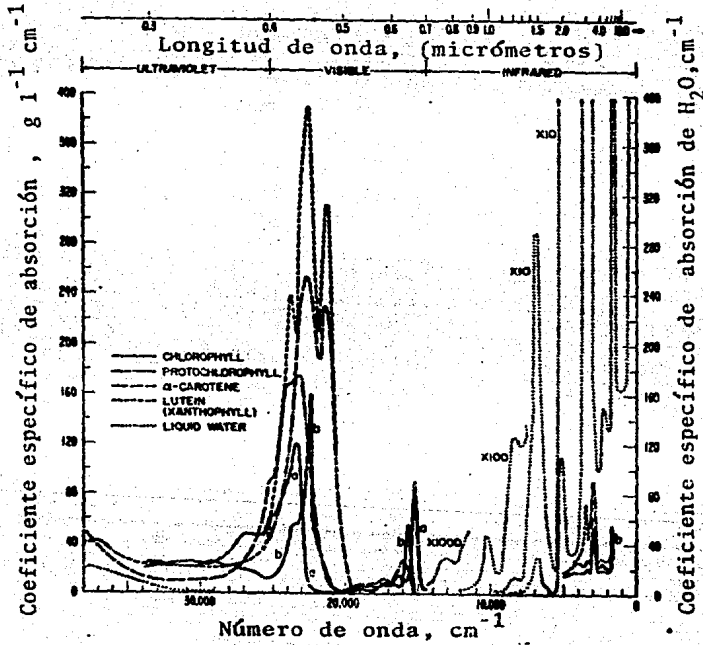


FIG. 4. ESPECTRO DE ABSORCIÓN DE PIGMENTOS VEGETALES Y AGUA. (SEGUN GATES ET AL, 1965).

se lo proporcionan los llamados nutrientes, que son sales químicas y compuestos de nitrógeno, fósforo, silicio, etc., que están presentes en forma de fosfatos, nitritos, nitratos amonio, etc. Estos compuestos, disueltos en el agua, reducen la penetración de la luz en el agua, es decir su transparencia.

Si el cuerpo de agua contiene pocas sustancias en suspensión o pocos organismos, la luz azul será la que penetre a mayor profundidad, mientras que en aguas más turbias, como son las aguas costeras, la región del verde-amarillo será la que tenga mayor penetración. (Jerlov, 1976).

Los parámetros hidrobiológicos restantes se relacionan indirectamente con las propiedades ópticas del agua; son, sin embargo, de utilidad en la caracterización física del sistema acuático. Su importancia radica en los siguientes aspectos: (Contreras, 1984).

La producción primaria neta es la magnitud del -- aporte de oxígeno proporcionado por el cuerpo de agua.

Las demandas química y bioquímica de oxígeno dan información del consumo de oxígeno mediante reacciones quí-

micas y por la acción de los seres vivos, respectivamente.

Finalmente, el pH nos brinda información sobre - el estado de acidez o basicidad del sistema; esta información es útil para el conocimiento de otras características físicas del medio.

Todos estos parámetros son de importancia para - la caracterización óptica de cualquier cuerpo de agua natural.

En el capítulo siguiente, se aplicarán los elementos vertidos en los dos anteriores a un cuerpo de agua particular.

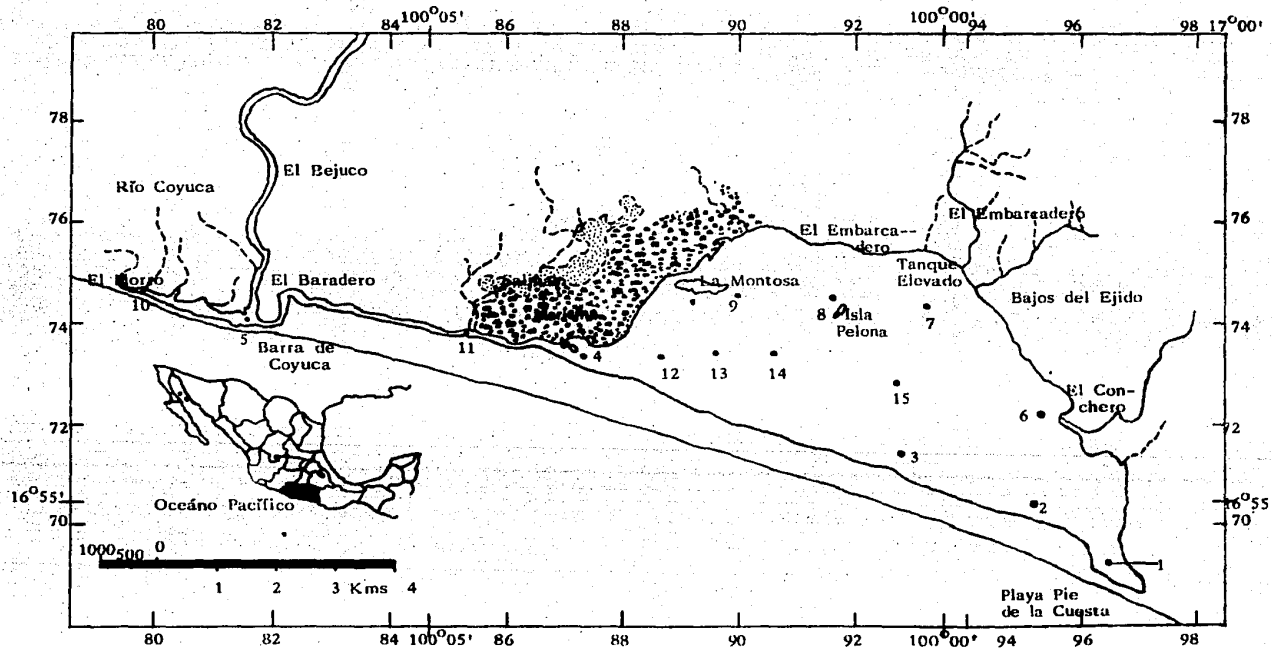
4.- METODOLOGIA.

En el presente capítulo se muestra la metodología empleada para obtener el valor de los coeficientes de reflexión y de extinción en la laguna costera de Coyuca de Benítez, Guerrero. Se dan, además, los aspectos geográficos relevantes de este sistema acuático.

4.1.- Localización y aspectos geográficos.

La laguna de Coyuca de Benitez, pertenece al conjunto de lagunas costeras del estado de Guerrero. Cuenta con una superficie de 34 Km² (Yañez-Arancibia, 1977). Se localiza a los 16° 54' de latitud norte y a los 100° 03' de longitud oeste (CETENAL, 1973).

La laguna se abre al mar a través de un canal meándrico, lo cual le da una dinámica muy especial. Cuenta con dos pequeñas islas; La isla Montosa, que es la mayor y está habitada y la isla Pelona, deshabitada (Möller, 1973). Cuenta con vegetación de diferentes tipos; manglar, tular, palmar, etc. Tiene aporte de los ríos Coyuca, las Cruces y El Conchero que proporcionan a la laguna cantidades importantes de materia orgánica y sales disueltas



MAPA No. 1.- SISTEMA LAGUNAR DE COYUCA DE BENITEZ, GUERRERO,
 UBICACION DE LAS LOCALIDADES DE MUESTREO.

4.2.- Método de análisis.

Para su estudio, la laguna fue dividida en quince puntos de muestreo, distribuidos a lo largo y ancho de ella (mapa 1).

En cada punto de muestreo se colectaron muestras de agua mediante una botella Van Dorn, a diferentes profundidades (subsuperficial, 0.5 m., y 1 m.) denominándose como -- muestras superficiales (s), media (m), profunda (p). Posteriormente fueron analizadas en laboratorio, proporcionando -- mediante este análisis, los parámetros hidrobiológicos ya -- mencionados.

Simultáneamente a la colecta, se realizó el registro de los datos radiométricos para la obtención del coeficiente de reflexión y, mediante el uso del llamado disco de Secchi, se obtuvo la medida de la transparencia del agua, -- con el fin de obtener el coeficiente de extinción. Estas medidas se hicieron en cada punto de muestreo.

La forma en que se obtuvieron estos coeficientes -- se detalla en los siguientes incisos.

4.3. Obtención del coeficiente de reflexión.

La obtención del coeficiente de reflexión o reflectividad fue realizada mediante el uso del Radiómetro - - - IL-700/760, que es un instrumento óptico capaz de medir el flujo de la energía radiante en el rango espectral que comprende desde los 300 nm., hasta los 900 nm., es decir, abarca las zonas correspondientes al ultravioleta, al visible y al infrarrojo cercano.

El procedimiento para la obtención de este valor - fué el siguiente:

En cada punto de muestreo se calibraba el radiómetro, de acuerdo a su manual de instrucción, dado que las lecturas se hacían a diferentes horas y las condiciones meteorológicas podían variar.

Una vez calibrado, se medía la cantidad de luz incidente apuntando el detector óptico del radiómetro en la dirección a la cual se localizaba el sol en ese instante. Posteriormente, se medía la cantidad de luz reflejada por el cuerpo de agua, apuntando el detector en dirección a éste. Este proceso se repetía tres veces, para tener datos confiables. La medición se hacía cada 100 nm., partiendo de los 300 nm., hasta llegar a los 900 nm.

Con estos resultados se calculaba posteriormente el coeficiente de reflexión del cuerpo de agua, es decir, el porcentaje de la radiación reflejada por éste, esto es, $R=L/E$.

4.4. Obtención del coeficiente de extinción.

Para la obtención de este valor, es deseable la utilización de un fotómetro o de un espectroradiómetro sumergibles, sin embargo, dada la imposibilidad económica de adquirirlos, es necesaria la utilización de otros instrumentos, como es el caso del disco Secchi.

El disco Secchi es un disco blanco, pesado, de 30 cm., de diámetro, aproximadamente, el cual es sumergido en las aguas hasta que deja de ser visible, observándolo desde el lado sombreado de la embarcación. Este instrumento fué diseñado, en el siglo XIX, por el oceanógrafo italiano, Alessandro Secchi.

El disco Secchi nos permite hacer una estimación aceptable del coeficiente de extinción. Comparando mediciones hechas con fotómetros submarinos y las realizadas con el disco Secchi se ha encontrado que existe una variación del 15% únicamente entre estas mediciones (Tyler, 1968).

La transparencia medida con el disco Secchi es básicamente una función de la reflexión de la luz por la superficie del disco y está, por consiguiente, afectada por las características de absorción del agua y de los elementos contenidos en ella. Mientras mayor concentración de materia orgánica disuelta exista, la transparencia será menor; el decrecimiento es en forma exponencial. Esto es, la reducción de la transmisión luminosa medida con el disco Secchi, está fuertemente influida por el aumento de la dispersión luminosa provocada por la materia particulada en suspensión (Wetzel, 1975).

Las transparencias observadas con el disco Secchi varían de pocos centímetros en las lagunas o lagos turbios a decenas de metros en aguas claras y oceánicas (Jerlov, 1968).

A partir de este valor de la transparencia, se puede hallar el coeficiente de extinción por medio de la siguiente relación (Sverdrup, 1942).

$$K = \frac{1.7}{D}$$

donde K es el coeficiente de extinción, D es la transparencia

medida con el disco y 1.7 es una constante determinada empíricamente por diversos factores (Margalef, 1983).

$$K^1 = 0.03 + 0.0015 + \sum_i 34 \frac{V_i}{d_i} = \frac{1.7}{D}$$

donde 0.03 es el valor de la extinción del agua a los 540 nm., 0.0015 es la extinción debida a la clorofila (mg/m^3), y $\sum_i 34 \frac{V_i}{d_i}$ es la extinción debida a las partículas suspendidas.

El valor de 1.7 es el que mejor se ajusta a las condiciones experimentales y da, por tanto, una fórmula de estimación más exacta que las otras propuestas. El valor de esta constante puede variar dependiendo de la región geográfica que se trate, sin embargo, no puede ser mayor que 2.3 por la siguiente razón: la profundidad a la cual desaparece el disco, corresponde aproximadamente a la profundidad a la cual la luz de la superficie se reduce al 10% y dado que la luz se atenúa como $e^{-K^1 z}$ esto implica que - - - -
 $K^1 = 2.3 / D$ (Cushing, 1976).

4.5. Correlaciones estadísticas.

Es importante conocer el grado de influencia que presentan los parámetros hidrobiológicos a los coeficientes

ópticos medidos, pues no basta el tener el valor de estos coeficientes en forma aislada, sino mediante la interacción con estos parámetros. Esto se hace posible a través del -- uso del análisis estadístico de las correlaciones simple y múltiple.

El análisis de correlación simple nos permite observar la influencia que tiene cada parámetro particular -- con los coeficientes ópticos. El análisis de correlación -- múltiple nos permite visualizar la influencia global de los parámetros hidrobiológicos, en su conjunto, en relación con los coeficientes ópticos medidos.

El grado de asociación de las variables está representado por el coeficiente de correlación r . El valor de -- este coeficiente puede variar de $+1$ a -1 , pasando por cero. Cuando r toma alguno de estos valores se dice que existe una correlación perfecta positiva ó negativa, respectivamente. -- Si $r=0$ se dice que la correlación es nula, ésto es, no existe ninguna asociación entre las variables. Si el valor de r es alto, esto indica que un cambio en una variable se compensa por un cambio en la otra variable, de tal suerte que, dando el valor de una variable, el valor asociado de la otra -- puede estimarse con mucha precisión. Puede ocurrir, sin em-

bargo, la llamada correlación espuria que surge cuando existe una buena correlación entre dos variables, pero únicamente como producto del azar.

El cálculo del coeficiente de correlación se obtiene a través de la siguiente relación:

$$r = \frac{[(\sum xy \div n) - \bar{x}\bar{y}]}{(\sigma_x \sigma_y)}$$

donde x es la variable independiente, y es la variable dependiente, n es el número de datos, σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de las x y las y .

El análisis estadístico fue realizado mediante el programa SPSS de la computadora Burroughs de la U.N.A.M. El programa proporciona un sistema de computación estadístico, diseñado para el análisis de una gran cantidad de datos, realizando procedimientos de cálculo de la estadística descriptiva.

En el siguiente capítulo se muestran los valores de los coeficientes de reflexión, de extinción y los resultados de las correlaciones estadísticas simple y múltiple de estos valores con los parámetros hidrobiológicos.

5.- RESULTADOS.

En el presente capítulo se muestran los valores obtenidos para los coeficientes de reflexión y de extinción. Se muestran también los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico por computadora de las correlaciones simple y múltiple de los parámetros hidrobiológicos y la reflectividad a diferentes longitudes de onda. Los resultados se muestran en tablas, ordenadas de la siguiente forma:

Tabla No. 1.- Datos de la temperatura, tanto ambiental como del agua en los tres niveles de muestreo, hora de muestreo y datos de las condiciones meteorológicas imperantes en esa época del año. Se reportan para cada punto de muestreo. La presentación de estos datos obedece a que se están considerando propiedades ópticas aparentes, que dependen de estos factores.

Tabla No. 2.- Se presentan los valores de la reflectividad para cada punto de muestreo, en función de la longitud de onda. El cálculo del porcentaje se hizo a través de la relación L/E. Se anexa la gráfica correspondien-

te. (Gráfica 1).

Tabla No. 3.- Se presentan los valores del coeficiente de extinción para cada punto de muestreo, obtenidos mediante la relación $k=1.7/D$.

Tabla No. 4.- Se muestran los resultados obtenidos mediante la matriz de correlación entre los parámetros hidrobiológicos y los porcentajes reflectivos a las longitudes de onda siguientes: 500 nm., 600 nm., 700 nm., y 900 nm.

Tabla No. 5.- Se muestran los valores obtenidos en el análisis de regresión múltiple entre la reflectividad a las longitudes de onda siguientes: 500 nm., 600 nm., y 700 nm., y los parámetros hidrobiológicos en su conjunto.

TABLA No. 1 DATOS OBTENIDOS EN EL MUESTREO REALIZADO EN LA LAGUNA DE COYUCA EN EL MES DE AGOSTO DE 1984.

PUNTOS DE MUESTREO	INTERVALO DE TIEMPO HORA -	TEMPERATURA AMBIENTAL (°C)	TEMPERATURA DEL AGUA (°C)			DATOS METEOROLÓGICOS.
			S	M	P	
1	11:52 a 12:01	29	28	27	27	nublado, lluvia ligera.
2	12:28 a 12:35	29	29	30	30	nublado, lluvia ligera.
3	13:08 a 13:17	26	29	30	30	nublado, lluvia ligera.
4	11:22 a 11:28	28	27	27	28	sin lluvia
5	12:40 a 12:45	34	25	25	25	situación muy variable.
6	11:02 a 11:10	27	29	30	30	nublado.
7	10:20 a 10:30	28	28	28	28	nublado.
8	09:50 a 10:03	26	28	28	28	nublado, lluvia ligera.
9	09:17 a 09:25	25	27	27.5	27.5	nublado.
10	13:10 a 13:17	30	31	31	31	situación variable.
11	11:54 a 12:01	28	26	26	26	nublado.
12	10:47 a 10:54	26	31	32	32	situación muy variable.
13	10:15 a 10:22	29	31	32	32	nublado.
14	09:34 a 09:43	30	30	31.5	31.5	nublado mucha evaporación
15	13:38 a 13:44	25	29	29	29	nublado.

TABLA No. 2 DATOS DE LA REFLECTIVIDAD DEL CUERPO DE AGUA EN CADA PUNTO DE MUESTREO A DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA.

LONGITUD DE ONDA (nm.)	PUNTOS DE MUESTREO														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
300	68.8	34.2	63.4	81.8	27.5	59.4	61.7	75.5	37.5	53.8	53.8	84.6	64.2	100	44.9
400	68.8	63.8	53.5	81.8	22.5	85.5	61.6	81.9	65.0	56.2	81.8	100	53.8	100	41.8
500	67.9	65.6	46.2	69.0	22.5	68.4	54.3	71.7	77.5	69.2	60.0	76.0	52.9	100	63.0
600	57.5	43.8	40.0	100	100	65.0	82.5	80.2	65.7	82.5	100	100	82.5	100	34.2
700	32.7	25.5	31.4	67.5	82.5	42.0	44.5	50.7	45.2	90.7	67.5	77.5	42.5	62.5	28.6
800	30.8	27.2	31.9	47.5	47.5	36.0	36.5	35.2	35.2	37.5	47.5	92.5	42.5	47.5	33.3
900	38.5	37.2	33.5	60.0	26.4	58.0	46.8	67.6	34.6	23.6	60.0	76.0	52.9	86.6	59.5

VALORES DE REFLECTIVIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA (%)

GRAFICA No. 1.- REFLECTANCIA DEL CUERPO DE AGUA EN LOS
DIFERENTES PUNTOS DE MUESTREO.

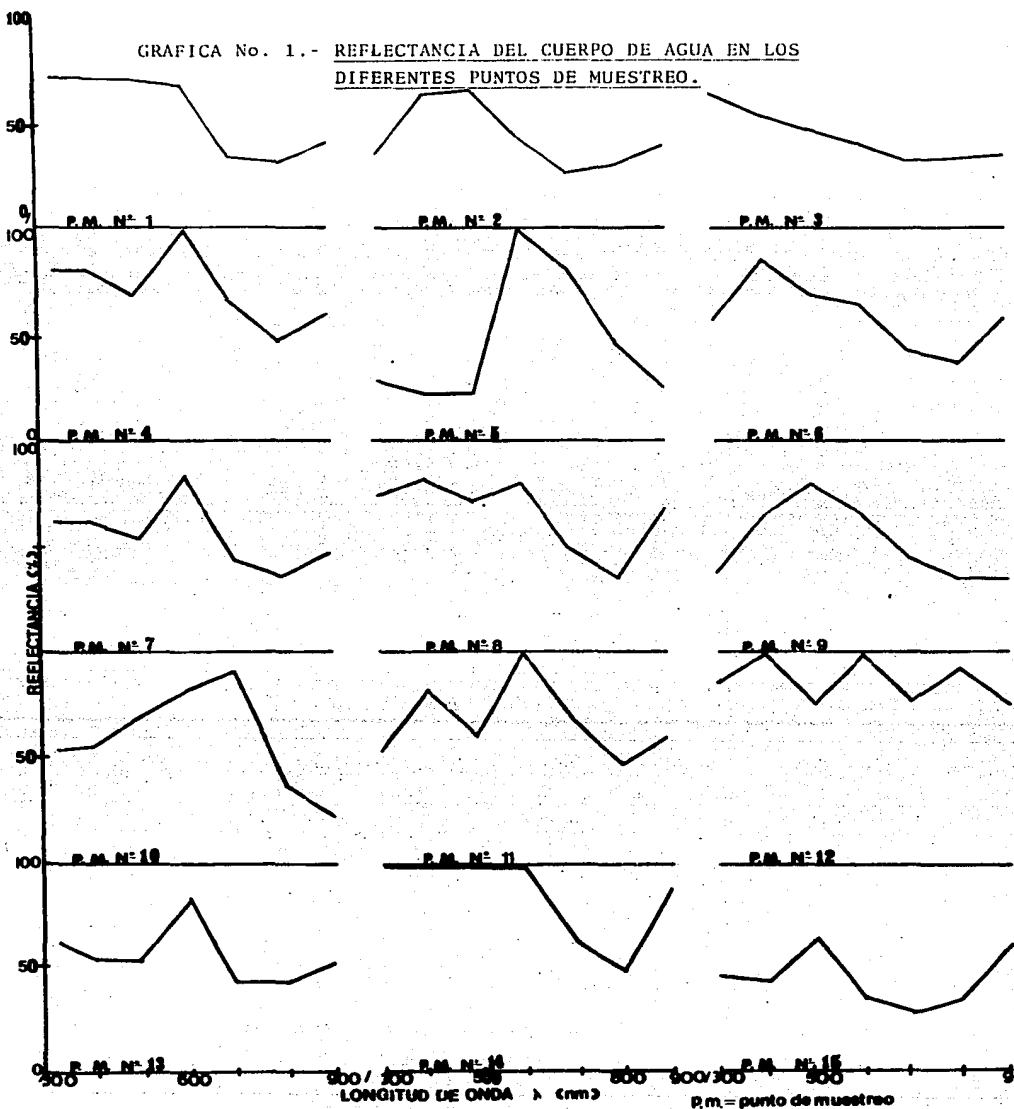


TABLA No. 3 VALORES DEL COEFICIENTE DE EXTINCION EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MUESTREO.

PUNTOS DE MUESTREO	TRANSPARENCIA (cm.)	COEFICIENTE k (m ⁻¹)
1	40	4.25
2	40	4.25
3	40	4.25
4	05	34
5	05	34
6	50	3.40
7	50	3.40
8	40	4.25
9	40	4.25
10	60	2.80
11	05	34
12	40	4.25
13	40	4.25
14	40	4.25
15	60	4.25

TABLA N° 4. MATRIZ DE CORRELACION DE LOS PARAMETROS HIDROBIOLOGICOS CON LOS VALORES DE REFLECTIVIDAD DEL CUERPO DE AGUA A DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA.

	FITO	MOP	COP	NAT	NIT	FOS	AMN	CLO	PPN	DQO	T.S.	pH	REFLECTIVIDADES			
													500	600	700	900
FITO	1.000	-0.441	-0.786	-0.450	-0.709	-0.812	0.182	0.247	0.409	0.240	-0.512	0.231	0.254	-0.408	-0.284	0.549
MOP	0.445	1.000	0.146	0.708	0.741	0.474	-0.342	-0.284	-0.237	-0.326	-0.808	-0.266	-0.375	0.487	0.083	-0.188
COP	-0.078	0.146	1.000	0.006	0.217	0.116	-0.208	0.016	0.149	0.105	0.185	0.086	0.301	-0.123	0.612	0.299
NAT	-0.450	0.708	0.006	1.000	0.693	0.455	-0.309	-0.456	-0.524	-0.109	-0.665	-0.151	-0.296	0.498	-0.123	-0.422
NIT	-0.709	0.741	0.217	0.693	1.000	0.861	-0.455	-0.531	-0.541	-0.277	0.938	0.136	-0.126	0.547	0.212	-0.367
FOS	-0.812	0.474	0.116	0.455	0.861	1.000	-0.154	-0.495	-0.600	-0.261	0.743	-0.265	0.044	0.249	0.124	-0.433
AMN	0.182	-0.342	-0.208	-0.309	-0.455	-0.154	1.000	0.334	0.296	-0.330	0.445	0.211	0.061	-0.766	0.515	-0.408
CLO	0.247	-0.284	0.016	-0.456	-0.531	-0.495	0.334	1.000	0.664	-0.166	0.454	-0.108	-0.469	-0.537	0.054	-0.137
PPN	0.409	-0.237	0.149	-0.524	-0.541	-0.600	0.296	0.664	1.000	-0.230	0.492	0.244	-0.174	-0.424	0.117	0.270
DQO	0.240	-0.326	0.105	-0.109	-0.277	-0.261	-0.330	-0.166	-0.230	1.000	0.360	-0.252	0.556	-0.124	-0.047	0.361
T.S	-0.512	-0.808	-0.185	-0.664	0.938	-0.743	0.445	0.454	0.492	0.360	1.000	0.195	0.216	-0.450	-0.145	0.297
pH	0.231	-0.266	0.086	-0.151	0.136	-0.265	0.211	-0.108	0.244	-0.252	0.1957	1.000	0.059	0.172	-0.197	0.106
R500	0.254	-0.375	0.301	-0.296	-0.126	0.044	0.061	-0.469	-0.174	0.556	0.216	0.059	1.000	////	////	////
R600	-0.408	0.487	-0.123	0.498	0.547	0.249	-0.766	-0.537	-0.424	-0.124	-0.450	0.172	////	1.000	////	////
R700	-0.284	0.083	0.612	-0.123	0.212	0.124	-0.515	0.054	0.117	-0.047	-0.145	-0.197	////	////	1.000	////
R900	0.549	-0.188	0.299	-0.422	-0.367	-0.433	-0.408	-0.137	0.270	0.361	0.297	0.106	////	////	////	1.000

TABLA N° 5. VALORES DE CORRELACION MULTIPLE DE LA REFLECTIVIDAD CON LOS PARAMETROS HIDROBIOLOGICOS A DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA.

REFLECTIVIDAD A 500 nm.		REFLECTIVIDAD A 600 nm		REFLECTIVIDAD A 700 nm	
DQO	0.5568	AMN	0.7665	COP	0.6127
CLO	0.6754	DQO	0.8641	AMN	0.7381
NAT	0.8298	CLO	0.9235	NAT	0.7794
COP	0.8748	COP	0.9532	DQO	0.8441
AMN	0.9361	FOS	0.9661	FITO	0.8772
FITO	0.9396	PPN	0.9805	T.S	0.9204
FOS	0.9566	T.S.	0.9816	PPN	0.9314
PPN	0.9615	FITO.	0.9870	pH	0.9420
T.S.	0.9652	MOP	0.9903	CLO	0.9438
NIT	0.9706	pH	0.9914	FOS	0.9442
pH	0.9766	NIT	0.9927	NIT	0.9536
MOP	0.9829	NAT	0.9998	MOP	0.9588

6.- ANALISIS Y DISCUSION.

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos para los coeficientes de reflexión y extinción, así como las inferencias que pueden hacerse a través del análisis estadístico. Primeramente se discuten los datos de la tabla No. 1, en seguida, se analiza el aspecto radiométrico del coeficiente de reflexión, posteriormente se hace lo mismo con el coeficiente de extinción y finalmente se discuten los resultados arrojados por el análisis estadístico de las correlaciones simple y múltiple.

6.1.- Análisis de la tabla No. 1

En esta tabla podemos observar lo siguiente:

a).- La hora de las lecturas y de los muestreos varían de las 9:17 hrs. a las 13:44 hrs., distribuyéndose en forma más ó menos homogénea. Con ésto puede garantizarse que la influencia de la "posición solar" en la incidencia de la radiación será mínima y, por consiguiente, la toma de datos puede ser confiable. Jerlov (1976) menciona, basado en hechos experimentales, que se pueden tener lecturas adecuadas en un intervalo de $\pm 45^\circ$ alrededor de la nor--

mal, ésto es, ± 3 hrs., alrededor del mediodía y que a ángulos solares cercanos al amanecer o al atardecer se produce una dispersión selectiva de importancia, creándose una fuente de error.

b).- La temperatura del cuerpo de agua varió de los 25° a los 31°C. , Hawkes (1974) menciona que a temperaturas cercanas a los 35°C. , el agua presenta efectos anómalos sobre las franjas de interferencia y sobre el índice de refracción, sugiere que la causa de este fenómeno es debida a la densidad de inhomogeneidades presentes en el líquido. - Esto nos induce a considerar al índice de refracción como - constante en el intervalo medido. Sin embargo, es conveniente en futuros estudios, realizar mediciones "in situ" de este parámetro, mediante el uso de un refractómetro, para tener una visión más adecuada de su comportamiento verdadero.

c).- Los datos meteorológicos indican el grado de dificultad para realizar las mediciones, sin embargo, se pudieron obtener buenas estimaciones estadísticas de los coeficientes ópticos, como se verá mas adelante.

6.2. Análisis de la reflectividad.

Puede observarse en la gráfica No. 1, que, si bien

a primera vista, la respuesta espectral de cada punto de muestreo parece caótica, siguen, sin embargo, un comportamiento análogo, para verlo, consideremos el comportamiento reflectivo de las siguientes bandas: a).- de los 400 nm. a los 600 nm. b).- de los 600 nm. a los 700 nm. c) de los 800 nm. a los 900 nm. y tendremos la siguiente situación:

I.- En la banda ubicada entre los 400 nm. y los 600 nm. se tiene la región en la cual se localiza el valor más alto en la mayoría de los puntos de muestreo.

II.- En la banda formada entre los 600 nm. y los 700 nm. existe en la mayoría de los puntos una tendencia a la disminución del porcentaje de reflexión.

III.- En la región del infrarrojo cercano, la banda de los 800 nm. a los 900 nm., puede observarse que el porcentaje de reflectividad es menor que en la región I, -- acentuándose hacia los 800 nm.

Este comportamiento reflectivo es explicable, en gran medida, por las propiedades de absorción del agua y de las de algunos parámetros hidrobiológicos.

Se había hecho notar que el agua absorbe fuertemente hacia la región del infrarrojo, situación que se aprecia, en general, en el comportamiento reflectivo de cada punto de muestreo. Por otro lado, se hizo mención al hecho de que las aguas costeras mostraban una coloración verde-amarilla (Morel, 1977), es decir, se está hablando de la banda comprendida entre los 500 nm. y los 600 nm., en que esta coloración es reflejada por el agua y el material inmerso en ella.

Dentro de este material mencionado cabe destacar la actuación de la clorofila. Este pigmento tiene un espectro conocido (ver fig. cinco) en donde puede notarse que tiene una alta reflectividad en la banda de los 500 nm. a los 600 nm., es decir, el color verde juega un papel importante; mientras que tiene su pico de máxima absorción en la región de los 600 nm. y los 700 nm. Finalmente, la llamada "sustancia amarilla" ó húmica, formada por la materia disuelta y los nutrientes, influye enormemente en la coloración del cuerpo de agua, es decir, en su reflectividad.

Todos estos elementos aunados, permiten explicar en gran medida, la respuesta espectral de esta laguna costera.

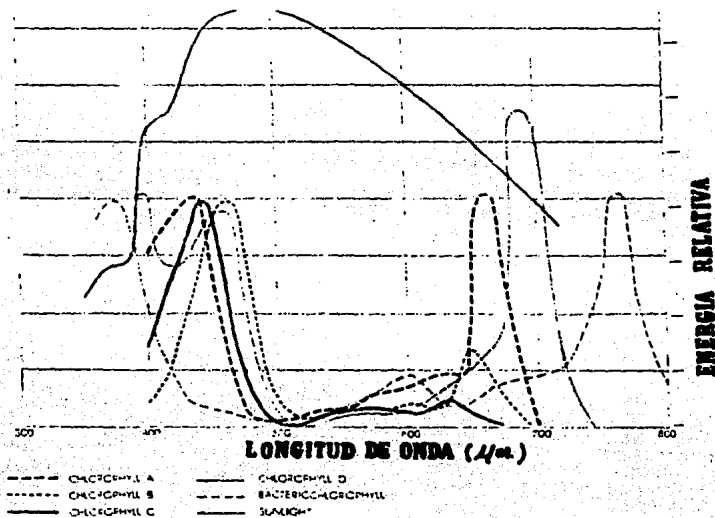


FIG. 5. ESPECTRO DE ABSORCION DE LOS DISTINTOS TIPOS DE CLOROFILA EXISTENTES EN LOS VEGETALES.

A manera de ilustración se puede visualizar, mediante el uso de un mapa, el comportamiento reflectivo de la laguna a una longitud de onda determinada. Eligiendo los 700 nm., como la longitud de onda representativa, dado que el pico de máxima absorción de la clorofila está en -- las vecindades de esta longitud de onda y, por otro lado -- formando tres grupos en función del porcentaje de reflectividad, obtenemos lo siguiente, de acuerdo con la tabla No. 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
32.7	25.5	31.4	67.5	82.5	42.0	44.5	50.7	45.2	90.7	67.5	77.5	42.5	62.5	28.6

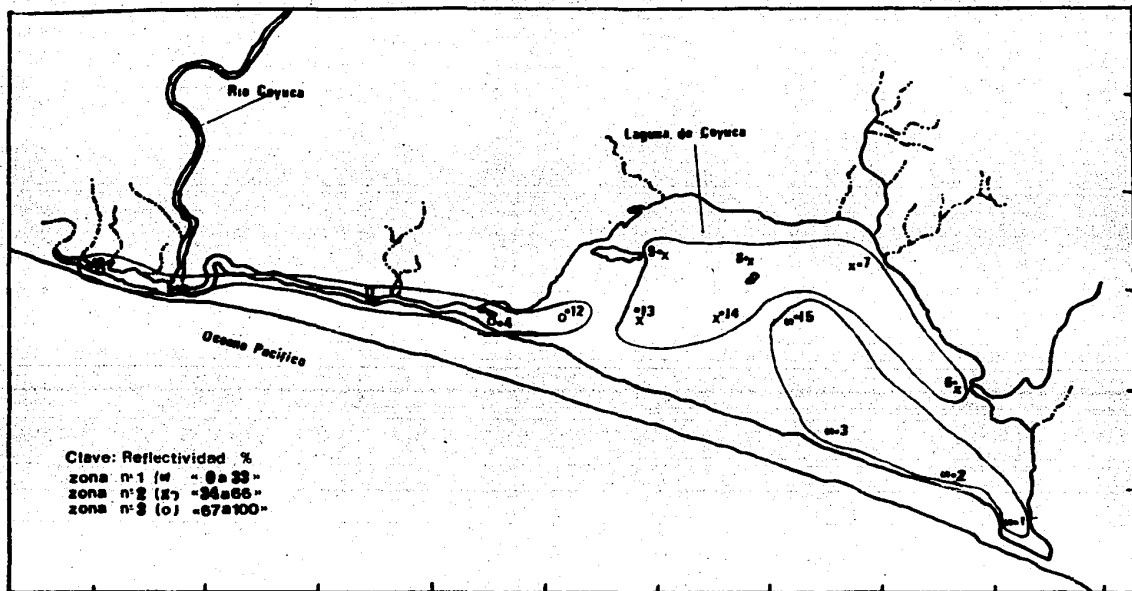
Considerando la siguiente división por porcentaje de reflexión: Grupo I de 0 a 33%, Grupo II de 34% a 66% y Grupo - III de 67% a 100%.

De acuerdo con esta división y los valores de reflectividad, se ve que los grupos quedan integrados de la siguiente manera: (mapa 2).

Grupo I formado por los puntos 1, 2, 3 y 15

Grupo II formado por los puntos de muestreo

6, 7, 8, 9, 13 y 14



MAPA No. 2.- REFLECTIVIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA DE COYUCA A LOS 700 nm.

Grupo III integrado por los puntos 4, 5,
10 y 11.

En el mapa se observa que los grupos así construídos marcan zonas bien delimitadas en la laguna, como son la zona de Pie de la Cuesta situada al sureste de la laguna, - la zona centro-norte y la zona del canal.

Esta situación trae como consecuencia, el poder - discriminar zonas ópticamente diferentes, en función de la - reflectividad.

6.3. Análisis de la extinción.

Con base en la tabla III y en el mapa número 3, - puede observarse la siguiente situación:

1) La transparencia de la laguna varió desde los cinco centímetros (5 cm) hasta los sesenta centímetros - - (60 cm), por lo que puede decirse que la laguna es poco -- transparente.

2) Puede notarse que, basándonos en el punto anterior, los coeficientes de extinción son altos.

Sin embargo, es posible notar que existen valores iguales en diversos puntos de la laguna, por lo que es posi

ble agruparlos de acuerdo a este valor (mapa 3).

A través de esta agrupación, tendremos las siguientes zonas:

Zona No. 1, con coeficiente de extinción de 4.25 m^{-1} , comprende los puntos de muestreo 1, 2, 3, 8, 9, 12, 13, 14, 15.

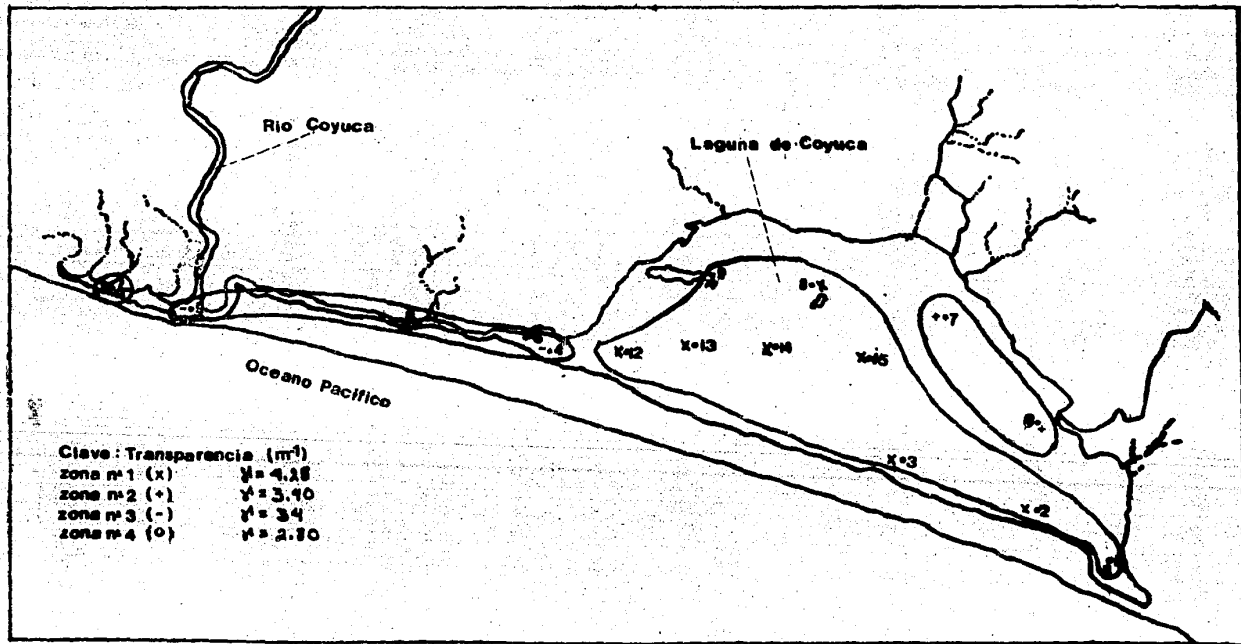
Zona No. 2, con coeficiente de extinción de 3.40 m^{-1} abarca los puntos de muestreo 6 y 7.

Zona No. 3, con coeficiente de extinción igual a 34 m^{-1} se tienen los puntos 4, 5 y 11

Zona No. 4, con coeficiente de extinción de 2.8 m^{-1} , se tiene el punto 10.

Puede notarse en el mapa No. 3 que estas zonas están bien delimitadas dentro de la laguna. Esto nos indica que, si bien la laguna tuvo poca transparencia, es en general, bastante homogénea, a excepción de la zona ubicada en la barra del canal.

Las diferencias que se presentan pueden atribuirse a factores geográficos. Por ejemplo, los puntos 6 y 7 se localizan a la salida del río "El Conchero" y una escu--



MAPA No. 3.- DISTRIBUCION DE LA TRANSPARENCIA SECCHI EN LA LAGUNA DE COYUCA.

rentía, respectivamente, que aportan sedimentos y materia orgánica a la laguna. Por otro lado, en la zona del canal, donde se localizan los puntos 4, 5 y 11, existen condiciones geológicas importantes. Por ejemplo, en el punto 5 se localiza la llamada Barra de Coyuca, que se abre al mar en la época de lluvia, afectando de manera importante las condiciones de toda esta zona. Además, se cuenta con la presencia del Río Coyuca, que trae consigo materiales suspendidos y disueltos. Estos factores le dan una dinámica especial a esta zona.

Por otro lado, debe observarse que existen ciertas semejanzas en los mapas 2 y 3, como son el agrupamiento de la zona del canal y de la zona correspondiente a Pie de la Cuesta (puntos: 1, 2, 3, 15).

6.4 Análisis de las correlaciones.

Con base en la tabla No. 4, podemos analizar el valor de los coeficientes de reflexión y de extinción a la luz de los parámetros hidrobiológicos. Conviene, sin embargo, recalcar los siguientes aspectos:

- 1) La correlación estadística se refiere al grado

de asociación entre dos variables si es simple, y a una variable dependiente y dos o más variables independientes, si es múltiple. (Hoel, 1971).

2) Se dice que un resultado es estadísticamente significativo, si es altamente improbable que pudiera haber ocurrido al azar.

La significación estadística depende del tamaño de la muestra sometida a análisis. En este caso concreto, el número de datos para cada variable fué de 15, por lo que a través de la tabla de correlaciones (Spiegel, 1963), se pueden dar los siguientes intervalos de significación:

a) Si el valor del coeficiente de correlación r está entre 0.53 y 0.65, la significación es del 99%.

b) Si el valor de r se localiza entre 0.66 y 1, la significación es del 95%.

Con ésto en mente, podemos analizar los resultados obtenidos.

En el caso de la transparencia Secchi, se observa que:

i) Con la materia orgánica particulada presenta una correlación inversa de -0.808 , lo cual es lógico, dado que a mayor cantidad de materia orgánica, menor será la -- transparencia.

ii) Con los nutrientes, nitratos (NAT), nitritos (NIT), fosfatos (FOS) y amonio (AMN) presenta, con los tres primeros correlaciones altas y significativas al 95%, no -- así en el caso del amonio, en que la correlación es baja. -- La explicación de la situación del signo positivo en la mayoría de estos elementos puede darse en función de que en la laguna se hallan formando compuestos y no se presentan -- como iones aislados. Sin embargo, estadísticamente se nota que son altamente correlacionables.

iii) Con los parámetros hidrobiológicos restantes, presenta correlaciones bajas, por lo cual ninguna infe -- rencia se puede hacer.

En el aspecto de las reflectividades, se pueden -- ver los siguientes aspectos:

i) La reflectividad a los 500 nm., presenta corre -- laciones bajas a excepción de la demanda química de oxígeno (DQO), en la que se tiene una significación estadística del 99%.

Esto es explicable en el siguiente sentido: La demanda química de oxígeno es el consumo de éste por agentes químicos, lo que se traduce en la presencia de sales y elementos reaccionando químicamente. La presencia de estos compuestos influyen ópticamente en el cuerpo de agua a esta longitud de onda particular.

ii) La reflectividad a los 600 nm muestra correlaciones significativas al 99% con los nitritos y el amonio presentando una significación menor con los nitratos. Muestra una correlación significativa con la clorofila (-0.537) y a una escala menor con la materia orgánica particulada. En esta longitud de onda particular los nutrientes, la clorofila y la materia suspendida juegan un papel óptico de importancia, lo cual era de esperarse.

iii) La reflectividad a los 700 nm presenta correlaciones de importancia con el carbono orgánico particulado (COP) y en grado menor con el amonio.

Podría parecer a primera vista que las correlaciones, en general son bajas a las longitudes de onda correspondientes a los 500 y 700 nm y un poco mejores a los 600 nm.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los parámetros hidrobiológicos no están aislados, sino que interactúan en forma complicada en el cuerpo de agua, y que es mediante su participación conjunta como logran afectar la reflectividad.

Basados en los resultados mostrados en la tabla -- No. 5, se puede observar que el valor del coeficiente de correlación múltiple es altamente significativo en las tres -- longitudes de onda consideradas, $r=0.982$ para los 500 nm, $r=0.999$ a los 600 nm y $r=0.958$ a los 700 nm., con una significación del 95%.

Esto nos indica que el conjunto de parámetros hidrobiológicos afecta de manera importante el valor de los -- coeficientes ópticos.

Con base en este análisis y discusión, podemos dar una serie de conclusiones y sugerencias.

7.- CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.

1. Se efectuaron medidas de los coeficientes de reflexión a diferentes longitudes de onda en diversos puntos de muestreo de la laguna de Coyuca de Benitez, pudiéndose localizar zonas ópticamente distintas mediante una longitud de onda específica. Estas zonas concuerdan con las halladas en el estudio biológico de la producción primaria fitoplanctónica, realizado simultáneamente en el verano de 1984 y son, además, las que correspondieron al verano de 1983, en forma independiente (Pérez, 1986). Con base en lo anterior, puede decirse que es posible determinar zonas de interés ecológico mediante la utilización, "in situ", de instrumentos radiométricos.
2. Mediante los valores hallados para el coeficiente de extinción, se pudieron encontrar zonas con diferentes propiedades ópticas. Esto es importante, desde cualquier punto de vista, dado que, con esta información se pueden localizar zonas económicamente productivas (Megard, 1980); es decir, es una aplicación de la Física a otras disciplinas, en particular a la Biología. Cabe mencionar que en los trabajos conjuntos realizados en la lagu

na de Coyuca se encontraron zonas biológicamente diferentes, que guardan cierta semejanza con las que se determinaron con el coeficiente de extinción (Dávila 1986 López, 1986; Monreal, 1987; Pérez, 1986).

Estos resultados nos muestran que la utilización del disco Secchi para la determinación del coeficiente de extinción, es de importancia en estos estudios.

3. Los análisis estadísticos nos muestran que los parámetros hidrobiológicos influyen de manera importante en la caracterización óptica de un cuerpo de agua.
4. La metodología empleada es válida para el análisis de diferentes sistemas acuáticos, aunque debe mencionarse que ésta debe estar vinculada con otras disciplinas, como puede ser la Biología en especial, para poder ofrecer interpretaciones más adecuadas a los fenómenos que ocurren en los cuerpos de agua.
5. Es importante realizar las medidas de los coeficientes, en especial el de extinción, con equipos mas modernos, como puede ser un espectroradiómetro sumergible. Esto enriquecería de manera importante la metodología emplea

da, al proporcionar información más precisa y más objetiva.

6. Se sugiere hacer análisis en laboratorio, mediante el uso de un espectrofotómetro, de la respuesta espectral de algunos de los parámetros hidrobiológicos utilizados, para así tener una base firme en que apoyarnos, para obtener una discriminación más adecuada de ellos, como es el caso de la clorofila cuya respuesta ha sido ya obtenida en el laboratorio.

APENDICE I

Ondas planas monocromáticas en medios conductores.

En un medio conductor, la ecuación de onda está representada del siguiente modo; en el sistema M.K.S.

$$\nabla^2 E_s + \omega^2 \epsilon \mu E_s + i\omega g \mu E_s = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación es para una onda monocromática de frecuencia ω . Suponiendo que el frente de onda sea paralelo al plano X-Y, la ecuación se reduce a:

$$\frac{d^2 E_s}{dz^2} + \omega^2 \epsilon \mu E_s + i\omega g \mu E_s = 0 \quad (2)$$

con $E_s = E_s(z)$. La solución de esta ecuación se halla haciendo $E_s = E_0 e^{i\eta z}$. Sustituyendo en (2), tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dz^2} (E_0 e^{i\eta z}) + \omega^2 \epsilon \mu E_0 e^{i\eta z} + i\omega g \mu E_0 e^{i\eta z} &= 0 \\ -\eta^2 E_0 e^{i\eta z} + \omega^2 \epsilon \mu E_0 e^{i\eta z} + i\omega g \mu E_0 e^{i\eta z} &= 0 \\ -\eta^2 + \omega^2 \epsilon \mu + i\omega g \mu &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Resolviendo esta ecuación mediante el álgebra de complejos tenemos:

$$\text{Si } \eta = \rho + i\delta$$

en forma polar tenemos:

$$\eta = \sqrt{(\omega^2 \epsilon^2 \mu^2 + \omega^2 g^2 \mu^2)^{1/2}} (\cos \varphi + i \sin \varphi); \quad \varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{g}{\omega \epsilon} \quad (4)$$

y en forma cartesiana:

$$\delta = \sqrt{\omega \sqrt{\epsilon \mu}} \left(\frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{g^2}{\omega^2 \epsilon^2}} \right)^{1/2}, \quad \gamma = \frac{\omega g \mu}{2 \alpha}$$

Ambas formas son convenientes y pueden usarse dependiendo del problema que se trate.

La onda plana que avanza en la dirección Z se describe por:

$$E(r, t) = E_s(z) e^{i(\delta z - \omega t)} e^{-\gamma z}$$

que representa una onda amortiguada exponencialmente avanzando en la dirección positiva de z.

REFERENCIAS.

- Aguirre, R., y Ruiz, P., 1985. Radiometría de un cuerpo de agua y su corrección con algunos parámetros hidrobiológicos. Presentado en el XXVIII Congreso Nacional de Investigación en Física. Hermosillo, Sonora.
- Contreras, F., Manual de Técnicas Hidrobiológicas. 1984, U.A.M. -I
- Cushing & Walsh, 1976, The ecology of the sea. W.B. Saunders Co.
- Dávila, J., 1986. Distribución y abundancia del fitoplancton durante el ciclo estacional Verano 1983-Verano 1984 en la laguna de Coyuca de Benítez, Estado de Guerrero y su posible detección por técnicas de percepción remota. Tesis profesional Facultad de Ciencias U.N.A.M.
- Döring, W., 1965. Introducción a la física teórica. U.T.E.H.A. Vol. 3 pp 92-123
- Delgadillo, E., 1986. Evaluación de la materia orgánica particulada en la laguna de Coyuca de Benítez, Gro., durante el ciclo Otoño 1983 Verano 1984 y su relación con Percepción Remota. Tesis profesional. Facultad de Ciencias, U.N.A.M
- Duntley, S.Q., 1963. Light in the sea. J. Op. Soc.; 53, 214-233
- Edminister, J. 1979, Electromagnetismo Mc. Graw-Hill (Serie Schaums)

- Gates et all., 1965. Spectral properties of plants. Applied Optics. 4.11
- Hawkes, J.B. y Astheimer, R.W., 1974. Optical properties of water in the neighborhood of 35°C. J. Op. Soc. 64
- Hecht, J. 1979, Optica Mc. Graw-Hill (Serie Schaums).
- Hoel, 1971, Statistical Methods. Wiley & Sons. New York.
- Hulburt, E.O., 1945. Optics of distilled and natural water. J. Op. Soc. 35 (11), pp, 698-705
- Ishimaru, A., 1978. Wave propagation and scattering in random media. Academic Press. New York. Vol. 1
- Jackson, J.D., 1975. Classical Electrodynamics. J. Wiley & Sons. New York, Cap. 7
- Jerlov, N.G., 1968. Optical oceanography. Elsevier, Amsterdam.
- Jerlov, N.G., 1974. Significant relationships between optical properties of the sea. Optical aspects of oceanography. Academic Press, New York. pp. 77-94
- Jerlov, N.G., 1976. Marine optics. 2nd. Edition. Elsevier - - Scientific. New York.

Judd, D.B., 1967. Terms, definitions and symbols in reflectometry. J. Op. Soc. 57 (4). pp. 445-452.

López, F., 1986. Caracterización hidrológica para evaluar la calidad de la laguna de Coyuca de Benítez, Gro., durante un ciclo anual Otoño 1983 - Verano 1984 y la aplicación de técnicas de Percepción Remota. Tesis profesional. Facultad de Ciencias. U.N.A.M.

Margalef, R., 1983. Limnología. Ed. Omega. 1040 p.

Möller, H., 1973. México desconocido. INJUVE. (La desconocida Coyuca).

Monreal, A. 1987. Evaluación de la concentración de clorofila a fitoplanctónica en la laguna de Coyuca de Benítez, Gro. durante el ciclo estacional Verano 1983-Verano 1984 y su relación con técnicas de percepción remota. Tesis profesional. Facultad de Ciencias. U.N.A.M. (en preparación).

Morel, A., 1974. Optical properties of pure water and pure sea water. Optical aspects of oceanography. Edited by N.G. Jerlov & E. Steeman Nielsen. Academic press. London.

Morrison, R., 1970. Experimental studies of the optical properties of the sea water. J. Geoph. Res. 75 (3). pp. -- 612 - 628.

Nassau, K., 1983. The physics and chemistry of color wiley interscience

Pérez, A., 1986. Productividad primaria fitoplanctónica de la laguna de Coyuca de Benítez, Gro., en el periodo de Vera no 1983-Verano 1984 y su posible detección por Percepción Remota. Tesis profesional Facultad de Ciencias. U.N.A.M.

Preisendorfer, R., 1960. Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea. Light in the sea.- Edited by J.E. Tyler. Dowden, Hutchinson & Ross.

Reitz, J. & Milford, F., 1969. Fundamentos de la teoría - - electromagnética. U.T.E.H.A. pp 320-358.

Ruiz, P. and Lemus, L., 1978. Spectral characteristics in - UV-VIS-IR of materials in Requena and La Esperanza dams and their detection by Remote Sensing. Proceedings of the - - - twelfth International Symposium on Remote Sensing of Environ ment: 1937 - 1946.

Ruiz, P., De la Lanza, G., Vega F., 1983. Hidrología de cuerpos de agua y Percepción Remota. Memorias del seminario sobre la Percepción Remota en México. Laboratorio Interdisciplinario, Facultad de Ciencias, U.N.A.M.: 167-181.

Ruiz, P., Segarra, M.P., Pérez, A.M. 1983. Limnological -- study of the coastal lagoon "Coyuca de Benítez, Gro." during an annual cycle (Summer 1981-Spring 1982). Presented in the seventeenth International Symposium on Remote Sensing of -- Environment. Ann Harbor, Mich. 423-432.

Ruiz, P., 1985. Detecting hidrobiological parameters with - Landsat-3; Summer 1981 data. Presented at nineteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, Mich.

Smith, R., and Tyler, J., 1967. Optical properties of clear - natural waters. J. Op. Soc. 57 (5). pp. 589-595.

Snell, J., 1978. Handbook of Optics; Radiometry and Photometry Sponsored by Op, Soc. Am. pp. 1.1-1.2.

Strickland. J.D.H., 1958. Solar radiation penetrating in the - ocean. J. Fish. Res. Bd. Can. 15, 453-493.

Strother. W., 1980. Física aplicada a las ciencias de la salud. Mc. Graw-Hill. New York.

- Spiegel, M., 1963. Statistics. Mc.Graw-Hill. (serie Schaums).
- Sverdrup et all., 1942. The Oceans: Their Physics, Chemistry and Biology. Prentice-Hall, Englewood cliffs, N.J. 1087 p.
- Tyler, J.W., 1961, Scattering properties of distilled and natural waters. Limn. & Ocean. 6. pp. 451-456.
- Tyler, J.E. 1968. The Secchi disk. Limn. & Ocean. 13 (1)
- Tyler, J.E., 1978-1979. Optical properties of water. Handbook of optics. Sponsored by Op. Soc. Am. pp. 15.1-15.37.
- Vershinski, 1980. El libro sobre el mar. Ed. MIR. Moscú.
- Wetzel, R.G., 1975. Limnology. W.B. Saunders Co. Philadelphia.
- Wolfe, W., 1980. Radiometry. Applied optics and optical - - - engineering. Ed. by Shannon & Wyant. Vol. 3. Academic Press.
- Yañez-Arancibia, A., 1977. Taxonomía, ecología y estructura de las comunidades de peces en lagunas costeras con bocas afímeras del pacífico de México. Anales del I.C.M. y L. U.N.A.M.
- Yañez-Arancibia, A. 1978. Patrones ecológicos y variaciones - cíclicas de la estructura de las comunidades nectónicas en las lagunas costeras del pacífico, México. Anales del I.C.M. y L., U.N.A.M.