



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO DE EUTROFICACION EN EL LAGO  
DE TEQUESQUITENGO, MOR.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

B I O L O G A

P R E S E N T A:

CRISTINA RIVERO GARDUO



MEXICO D.F. 1991

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

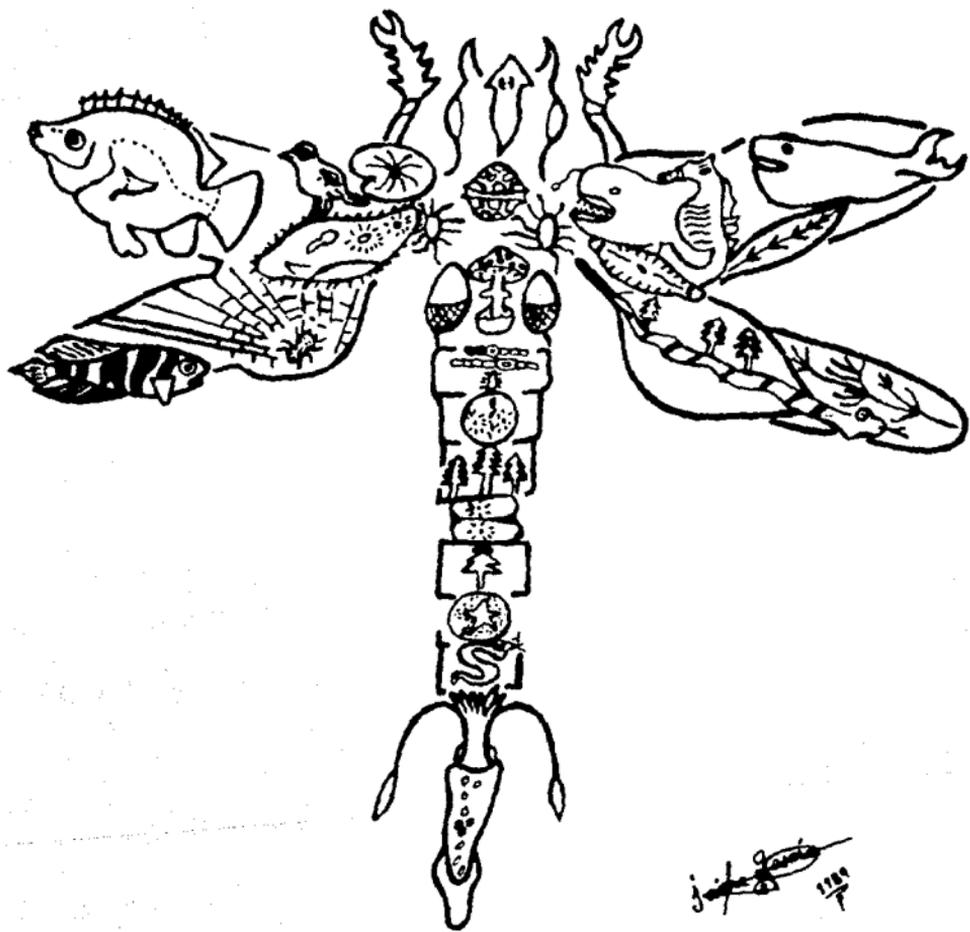


## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



*John G. ...*  
1989

HIG/CRM.

El camino algunas veces se hizo estrecho y difícil de andar. . .  
caí. . . . . no lo puedo negar, pero me tenía que levantar  
y . . . . aquí estoy . . . . .  
sintiendo que es el fin de un camino. . . . y . . . . .  
el principio de otro.

A mis padres

Fausto y Esperanza

A quienes confiaron en que saldría adelante, . . . . .  
quienes me consintieron y apoyaron en todo momento.

A quienes ahora y siempre . . . . .  
ofreceré la cima de todos mis esfuerzos . . . . . y . . . . .  
a quienes debo la vida por más de una vez.

Me enseñaron que el camino no siempre es fácil de andar  
y me equiparon con fuerza y voluntad para empezar a volar.

G R A C I A S.

A Pat

Porque siempre me recordaste que no necesitaba ser muy fuerte  
para salir adelante, mostrándome . . . con tu propio esfuerzo  
el camino.

A Fausto

Porque me enseñaste que la vida no es un sueño y que al vivirla  
. . . . . la experiencia la adquiere uno solo.

A Hugo

Nuestros caminos nacieron juntos . . . . .  
pero con el tiempo se tuvieron que separar . . . . .  
entonces aprendí . . . . .  
crecí . . y ahora siento orgullo de quien y como eres . . . . .

A Miguel

De tí he aprendido a ser tenaz . . . . .  
he aprendido a vivir con sentido . . . . .  
he aprendido . . . . .  
que para que el esfuerzo fructifique debe ser constante . . . . .

Tica

A ti te debo apoyo . . . y . . . consideración . . . . .  
a ti te admiro . . . porque has entendido que debes empezar  
a volar de verdad.

A Adriana

La vida nos puso a prueba navegando en sentido contrario . . .  
pero poco a poco el tiempo ha hecho lo suyo . . . . .  
ahora, hemos tomado caminos distintos aunque ambos conduzcan a  
la meta.

A Antonio

Amigo . . . . . hermano . . . . . y compañero  
a quien ahora y en especial, ofrezco el esfuerzo que de  
alguna manera me ha llevado a concluir una de tantas metas  
que como seres humanos nos forjamos.

Estas en ventaja, lo que tú tienes ahora, ninguno de nosotros  
lo tuvo . . . . . aprovechalo por tí mismo y nunca te olvides  
de nuestros padres, quienes han vivido para nosotros.

Cuando pienses tan solo en detenerte . . . . . si no estoy contigo  
. . . . . recuérdame . . . . . siempre sueña con un futuro mejor.

A Daniel

A pesar de todos los obstáculos que nos separaron siempre . . .  
siempre . . . . . has estado ahí para apoyarme.

Fuente de vida y esperanza en el terreno árido y hostil de mi  
vida.

A mi abuelita

Porque siempre confiaste en que saldría adelante..... no  
pude .....ni pueda ofrecerte más que mi esfuerzo.

A Graciela, Yolanda, Alicia, Fabiola, Alan, Fausto, Mariana y  
Ricardo.

Al M. en C. Victor Olivera Viacón

quien con dedicación y esmero  
sembró amistad, comprensión y conocimiento . . .

Ahora le debo más que amistad . . . . .

le debo . . . . lo que soy,

poco o mucho . . . . no lo sé . . . .

GRACIAS.

Los amigos se generan con el tiempo. . . . .  
no pululan . . . . . casi especie extinta,  
anhelada, codiciada y reñida por el hombre.

A esa especie extinta . . . . . sin un orden de importancia  
ofrezco mi esfuerzo y agradezco su preocupación

Arturo Ergellio Vargas Pérez

H. Fabian Rodríguez Delgado

Rocío Tamayo

Jaqueline Brown

Estela Avila Gloria

Ma. Elena Barrón y Familia

Javier Orozco

Enrique Fuentes

Jorge Best

Prof. Cesar D. Arantes Menjíe.

Rosalba Cisneros

Alfredo Ramírez

Armando Cruz Maya

Luis Bravo Inclán

Alicia Salinas Miranda

Gabriel del Razo

Felipe López

Cristina Flores

Tomas Cordero

Agradezco al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,  
Coordinación de Investigación,  
Subcoordinación de Calidad del Agua,  
el haber permitido la realización de el presente trabajo  
dentro del proyecto Control de la Eutroficación y  
Malezas Acuáticas.

## INDICE

RESUMEN . . . . .	I
PREFACIO . . . . .	II
INDICE DE LAMINAS . . . . .	IV
INDICE DE CUADROS . . . . .	V
SIMBOLOGIA . . . . .	VI
1 INTRODUCCION . . . . .	1
1.1 Antecedentes . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	11
2 DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO . . . . .	12
2.1 Generalidades . . . . .	12
2.2 Localización . . . . .	15
2.3 Morfometría . . . . .	15
2.4 Hidrología . . . . .	15
3 METODOLOGIA . . . . .	19
3.1 Muestreo en el lago . . . . .	19
3.2 Muestreo en el tributario . . . . .	22
3.3 Muestreo de Clorofila <i>a</i> . . . . .	23
3.4 Muestreo Bacteriológico . . . . .	24
3.5 Calidad del agua . . . . .	24
3.6 Balance hidráulico del lago . . . . .	24
3.7 Clasificación trófica del lago . . . . .	29
3.7.1 Indices de estado trófico (IET) . . . . .	29
3.7.2 Modelo Simplificado . . . . .	29
4 RESULTADOS . . . . .	33
4.1 Análisis físicoquímicos . . . . .	33
4.2 Comportamiento de los análisis físicoquímicos . . . . .	45
4.3 Análisis de Clorofila <i>a</i> . . . . .	46
4.4 Análisis bacteriológicos . . . . .	49
4.5 Calidad del agua . . . . .	51
4.6 Balance hidráulico . . . . .	53
4.7 Clasificación Trófica del lago . . . . .	53
4.7.1 Aplicación de índices de estado trófico . . . . .	53
4.7.2 Aplicación del modelo simplificado . . . . .	54
5 DISCUSION . . . . .	59

6	CONCLUSIONES . . . . .	63
7	RECOMENDACIONES . . . . .	64
8	BIBLIOGRAFIA . . . . .	65
9	ANEXO . . . . .	70

## RESUMEN

Se han propuesto numerosas formas para evaluar el grado trófico en el que se encuentran los lagos.

En el lago de Tequesquitengo ubicado en el estado de Morelos, entre los municipios de Jojutla y Puente de Ixtla, se realizó el análisis tanto por Índices de Estado Trófico (IET) como por el modelo propuesto por Vollenweider y modificado para su aplicación en lagos cálidos (Salas y Limón, 1986). Los resultados de su aplicación indican que ambas formas de evaluación han sido construidas para cuerpos de agua con características específicas, por lo que su aplicación en el lago presentó algunos inconvenientes.

Sin embargo, los resultados de la aplicación del IET que involucra a la concentración de clorofila  $a$ , muestra que en tan sólo 10 años, el lago a pasado de un estado mesotrófico a eutrófico.

Aunado a la aplicación de métodos para la evaluación trófica, se observó la calidad de las aguas del lago. Resultó sumamente interesante detectar la influencia particular de los compuestos básicos como amortiguadores del estado trófico del lago.

El lago, con una extensión de 800 hectáreas y carente de afluente, recibe aportaciones antropogénicas tanto por el poblado de Tequesquitengo, como por su tributario Barranca Honda, que aunque cuenta con poco cauce ( $1.45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ), influye principalmente en la calidad bacteriológica del lago.

Los análisis mostraron que las fuentes principales de aportación de nutrientes (particularmente fósforo) están representadas por los usos del suelo ( $310\ 500.0 \text{ kg/año}$ ), tanto agrícola como urbano, así como por seres vivos ( $2\ 057.71 \text{ kg/año}$ ), siendo su vía de acceso  $1.215 \times 10^6 \text{ m}^3$  de agua que ingresan por escurrimiento durante un año.

Para mejorar las condiciones del lago, es necesario entre otras cosas reforestar la microcuenca y dar prioridad al sistema drenaje del poblado Tequesquitengo.

## PREFACIO

El acelerado deterioro de los recursos naturales como el aire, la tierra y el agua, actualmente ha sido atendido debido a la preocupacion por el mejoramiento de la vida en el planeta.

Las condiciones inusitadas generadas por la inconciencia humana han sido contempladas por numerosas instituciones, dentro de las que se encuentra el Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua (IMTA), realizando analisis interdisciplinarios (Biólogos, Ingenieros, Químicos, etc.), con la finalidad de dar propuestas de conservacion y/o mejoramiento particularmente del recurso hidraulico.

La presente investigacion nace del interés generado por la conservacion de los recursos hidraulicos del pais, contando con la colaboracion de numerosas personas e instituciones a quienes deseo expresar mi mas sincero agradecimiento:

A la Universidad Nacional Autonoma de Mexico (UNAM) por permitir el libre acceso al conocimiento.

A las autoridades del I.M.T.A. y a la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidraulicos (SARH), por haber autorizado el acceso tanto a investigadores, bibliotecas y a la informacion misma.

Al Subcoordinador de Calidad del Agua (CIECCA), Ing. Francisco Romero Luna por haberme otorgado el acceso tanto a la institucion como a cursos de capacitacion.

Al jefe del proyecto Control de Eutrofication y Malezas Acuaticas, Biol. Guillermo Diaz Ivaleta por acceder a tenerme como tesista y prestadora de servicio social.

Al personal del laboratorio de CIECCA por los analisis fisicos y quimicos realizados.

Al Ing. Agronomo Jose Colli Misset por su apoyo en el procesamiento de los datos para la obtencion del escurrimiento.

A todo el personal de la Institucion que colaboró para la realizacion del trabajo desde 1985.

Al Arq. Juvenal Garcia Lison del municipio de Jojutla por su valiosa informacion.

Al Biol. Luis Bravo Inclan por su ayuda tanto en el manejo de la informacion como para su procesamiento en la microcomputadora.

Al Dr. Ruben Sanchez Silva por sus valiosas intervenciones.

Al Sr. Francisco Sanchez Suarez por su excelente trabajo en la elaboracion de laminas y cuadros.

A todas aquellas personas que se preocuparon por la terminación de la presente tesis y que haya omitido.

Al M. en C. Victor Olivera Viascán por acceder a fungir como director de la tesis, además de realizar muestreos y procesar muestras e información.

A los profesores que colaboraron como sinodales:

Biól. Jaime Saavedra Sola  
M. en C. Alfonso Guillermo Banderas Tarabay  
Biól. Jesús García Cabrera  
Biól. Guillermo Díaz Zavaleta

por sus valiosas observaciones.

## INDICE DE LAMINAS

- Lámina 1. Localización de el lago de Tequesquitengo, Mor.
- Lámina 2. Ejidos colindantes al lago de Tequesquitengo, Mor.
- Lámina 3. Batimetría de el lago de Tequesquitengo, Mor.
- Lámina 4. Metodología de muestreo con los requerimientos mínimos para estudios de eutroficación.\*
- Lámina 5. Localización de estaciones de muestreo en el lago de Tequesquitengo, Mor.
- Lámina 6. Metodología de evaluación del gasto en el tributario barranca honda.
- Lámina 7. Limite de la cuenca y área de escurrimiento directo al lago de Tequesquitengo, Mor.
- Lámina 8. Perfiles de Temperatura en el lago de Tequesquitengo, Mor.
- Lámina 9. Perfiles de oxígeno disuelto en el lago de Tequesquitengo.
- Lámina 10. Comportamiento mensual de parámetros fisicoquímicos en el lago de Tequesquitengo, Mor.
- Lámina 11. Comportamiento mensual de los análisis fisicoquímicos en el tributario Barranca Honda.
- Lámina 12. Clasificación trófica del lago de Tequesquitengo, Mor., con  $L(p)/z = 2.44 \text{ g/m}^3/\text{año}$ .
- Lámina 13. Área de la microcuenca de escurrimiento del lago de Tequesquitengo, Mor.

## INDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Valores establecidos para la protección de la vida acuática (aguas dulces).\*
- Cuadro 2. Valores establecidos para la clasificación Trófica de lagos. \*
- Cuadro 3. Promedios anuales de los parámetros fisicoquímicos del lago y su tributario Barranca Honda.
- Cuadro 4. Promedios de los parámetros fisicoquímicos por estación de muestreo en el lago de Tequesquitengo.
- Cuadro 5. Resultados de las concentraciones de clorofila  $a$  ( $mg/m^3$ ) para el lago de Tequesquitengo y su tributario.
- Cuadro 6. Promedios mensuales de los análisis Bacteriológicos (NMP/100 ml).
- Cuadro 7. Comparación de los análisis fisicoquímicos y biológicos de los estudios más recientes realizados en el lago de Tequesquitengo, Mor.
- Cuadro 8. Precipitación pluvial promedio en el lago de Tequesquitengo, Mor. (mm)
- Cuadro 9. Temperatura ambiental en el lago de Tequesquitengo, Mor. ( $^{\circ}C$ )
- Cuadro 10. Factor de corrección "FC" por latitud (latitud norte). \*

## SIMBOLOGIA

A	=	Area transversal del cauce (m <sup>2</sup> )
A <sub>m</sub>	=	Area de la microcuenca (m <sup>2</sup> )
A <sub>r</sub>	=	Aguas residuales (m <sup>3</sup> )
A <sub>s</sub>	=	Aporte total de fósforo por seres vivos (g/m <sup>3</sup> )
A <sub>t</sub>	=	Aporte total de fósforo por la microcuenca (g/m <sup>3</sup> )
A <sub>u</sub>	=	Aporte total de fósforo por usos del suelo (g/m <sup>3</sup> )
B <sub>h</sub>	=	Balace hidráulico (m <sup>3</sup> )
Ce(p)	=	Carga por exportación total de fósforo (g/año)
CF	=	Coliformes fecales (NMP/100 ml)
CI	=	Cálculo de ingresos totales de agua al lago (m <sup>3</sup> /año)
Cl <sub>a</sub>	=	Concentración de clorofila <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )
CT	=	Coliformes totales (NMP/100 ml)
DA	=	Demasia de agua (cm)
DAA	=	Demasia anual de agua (cm)
DAC	=	Demasia de agua en el suelo, del mes en curso (cm)
DAN	=	Demasia de agua en el suelo, del mes anterior (cm)
DBOS	=	Demanda bioquímica de oxígeno (mg/l)
DE	=	Deficiencia de agua (cm)
DEA	=	Deficiencia anual de agua (cm)
DQO	=	Demanda química de oxígeno (mg/l)
DS	=	Transparencia del disco Secchi (m)
E	=	Coefficiente de extinción vertical de luz del lago (1/m)
EF	=	Estreptococos fecales (NMP/100 ml)
E	=	Escurrimiento (m)
E <sub>m</sub>	=	Escurrimiento total de la microcuenca del lago (m <sup>3</sup> )
ETP	=	Evapotranspiración potencial mensual corregida (cm)
ETR	=	Cálculo de la evapotranspiración real (cm)
EV	=	Evapotranspiración potencial mensual sin corregir (cm)
FC	=	Factor de corrección por latitud
HA	=	Cálculo de la humedad almacenada en el suelo (cm)
ICA	=	Índice Calórico Anual
ICM	=	Índice Calórico Mensual
IET	=	Índice de estado trófico
K <sub>s</sub>	=	Coefficiente de sedimentación
L(p)	=	Carga superficial de fósforo (mg/m <sup>2</sup> /año)
MH	=	Movimiento de humedad en el suelo (cm)
MP	=	Muestras de profundidad
MS	=	Muestras superficiales
N	=	Número de revoluciones / s
NMP	=	Número más probable
Norg	=	Nitrógeno orgánico (mg/l)
OD	=	Oxígeno disuelto (mg/l)
P <sub>a</sub>	=	Concentración esperada de fósforo en el lago (mg/m <sup>3</sup> )
Pr	=	Precipitación pluvial directa sobre el lago (m <sup>3</sup> )
Pm	=	Precipitación media mensual (cm)
Pt	=	Concentración promedio de fósforo en el tributario (g/m <sup>3</sup> )
Ptotal	=	Concentración de fósforo total (mg/l)
Qa	=	Gasto por el tributario Barranca Honda (m <sup>3</sup> )
Qe	=	Agua que egresa por evaporación (m <sup>3</sup> /año)
S	=	Superficie del lago (m <sup>2</sup> )
SSF	=	Sólidos suspendidos fijos (mg/l)
SSV	=	Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)

- Ta = Temperatura ambiental media mensual (°C)  
 Tw = Tiempo de residencia hidráulica (años)  
 Tw<sub>1</sub> = Tiempo de residencia hidráulica en base a la cantidad de agua que egresa por evaporación (años)  
 Tw<sub>2</sub> = Tiempo de residencia hidráulica en base al total de agua que ingresa al lago (años)  
 V = Volumen del lago (m<sup>3</sup>)  
 Ve = Volumen epilimnético (m<sup>3</sup>)  
 Vh = Volumen hipolimnético (m<sup>3</sup>)  
 Vn = Velocidad de la corriente (m/s)  
 Z = Profundidad media (m)  
 Ze = Profundidad del epilimnion (m)  
 Zeu = Profundidad eufótica (m)  
 Zm = Profundidad máxima (m)  
 Z̄ = Profundidad máxima/profundidad media

#### INICIALES DE INSTITUCIONES

OECD: Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo

SRH: Secretaría de Recursos Hidráulicos

SARH: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos

APHA: American Public Health Association

WPCF: Water Pollution Control Federation

AWWA: American Water Works Association

EPA: Environmental Protection Agency

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente

SPP: Secretaría de Programación y Presupuesto

OPS: Organización Panamericana de la Salud

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

## ..INTRODUCCION..

### I INTRODUCCION

Desde hace algún tiempo, el deterioro de la calidad del agua en ríos, embalses, lagos y mares, ha ido acentuándose debido, principalmente, a la presión demográfica, esto es, a la suma o combinación de la biología de las poblaciones humanas con la producción y consumo tecnológicos (Margalef, 1903).

Cuando tal deterioro se nota por la acumulación progresiva de sustancias como nitrógeno, fósforo o materia orgánica, debido a que sobrepasan la cantidad que puede ser oxidada por respiración o descomposición bacteriana, es cuando se le llama proceso de eutroficación (Piña, 1975; Margalef, 1982; Revnoso, 1984).

Tal proceso puede acelerarse por el escurrimiento de fertilizantes aplicados a la tierra, así como por la descarga de detergentes que provocan que en tan sólo algunos años se modifiquen las características de los cuerpos de agua (Edmonson *et al.*, 1958; Forsberg, 1981).

Otras actividades que pueden contribuir al proceso, aunque en distinta medida, son las industriales, recreativas y domésticas (Shannon y Brezonik, 1972).

En general, el conjunto de signos que indican que el proceso se está sucediendo son; aumento en la fertilidad del agua, incremento en la productividad primaria y particularmente en lagos cálidos, el desarrollo de macrofitas acuáticas (Salas y Limón, 1986).

En el caso específico de la productividad primaria, es posible que se produzcan florecimientos "Blooms" algales, que al morir, precipitar y descomponerse, ocasionen que el oxígeno disuelto del hipolimnion disminuya, provocando progresivamente el reemplazamiento o muerte de numerosas especies de organismos (Owens y Wood, 1968).

Todas las causas y consecuencias del proceso de eutroficación pueden tener amplias repercusiones económicas, principalmente en lo que se refiere a la disminución de los usos de un cuerpo de agua y a la acumulación de microorganismos patógenos (coliformes y estreptococos), generando así, un posible foco de infección para las poblaciones humanas que los circunden (García, 1985).

Con tales repercusiones del proceso, fue necesario proponer métodos para su evaluación, tomándose como base la tipificación de los lagos que Naumann y Thienemann realizaron fundamentados en su distribución zonal (sistema tradicional). Así, los cuerpos de agua fueron clasificados en los siguientes niveles tróficos; oligotrófico, mesotrófico y eutrófico (Bachmann, 1980; Margalef, 1982).

## ..INTRODUCCION..

Estos niveles tróficos se encuentran ubicados dentro de un eje de variación lineal y continua, siendo el nivel de mejor calidad el oligotrófico, mientras que en el extremo contrario encontramos al eutrófico (de pobre calidad), e intermedio a ambos el mesotrófico (Olvera, 1987).

Dentro de este eje de variación continua, se ha detectado que los cambios de uno a otro nivel se deben a la influencia de las concentraciones de fósforo y nitrógeno porque limitan el desarrollo de la productividad (Dillon, 1975).

Por su parte, Arrignon, Mc Neely, Alabaster y la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) (entre otros) han propuesto límites en las concentraciones de compuestos que puedan alterar la vida acuática (en Huerto, 1988). Sin embargo, la preocupación no radica solo en que se propongan límites en las concentraciones de tales sustancias, sino en mostrar el nivel en que se encuentre el proceso en cada cuerpo de agua, por lo que se han puesto a consideración Índices de Estado Trófico (IET); (Shannon y Bresonik (1972) y Carlson (1977)), un modelo simplificado propuestos por Vollenweider (Castagnino, 1982) y por último, modelos complejos como el de EPAECO (Olvera, 1987).

Resulta particularmente interesante el desarrollo y evolución que han tenido tales formas de exponer el grado de eutroficación, desde tomar por separado a cada uno de los compuestos como lo muestran los índices de Carlson (*op. cit.*), hasta los modelos complejos que involucran a una gran variedad de parámetros indicadores (Olvera, 1988).

Dada la importancia de la eutroficación y debido a que algunas de las formas de evaluación fueron desarrolladas para la caracterización de diversos lagos en climas templados o fríos, fue necesario examinar sus fundamentos con la finalidad de aplicar las modificaciones pertinentes para su empleo en cuerpos de agua de climas cálidos, tal es el caso del modelo propuesto en 1968 por Vollenweider (Olvera, *op. cit.*; Castagnino, 1982).

Tal modelo fue simplificado para ser usado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) OPS/OMS en el "Proyecto Regional en Latinoamérica y el Caribe para el Desarrollo de Metodologías Simplificadas para Analizar la Eutroficación en Lagos Cálidos (tropicales y subtropicales)" (Castagnino, *op. cit.*).

Todos los estudios mencionados han considerado únicamente las secuelas del avance de la eutroficación, sin embargo, también se ha evaluado la posibilidad de que el proceso retroceda (Bachmann, 1980) en base a medidas de conservación y/o corrección.

Con esta finalidad Welch (1977) menciona que se han aplicado compuestos como clorhidrato de hierro (iron chloride) y nitrato de calcio (calcium nitrate) para evitar el reciclado del fósforo

a partir de los sedimentos, además de que se han agregado compuestos como tetracloruro de zirconio (zirconium tetrachloride) para inactivar al fósforo que se encuentre dentro de los lagos.

Considerando la posibilidad de dar medidas de conservación y/o corrección para el lago de Tequesquitengo, el presente estudio pretende aplicar, como uno de sus objetivos, algunas de las formas de representación del proceso, con herramientas metodológicas en las que se relacione su eutroficación y su calidad del agua, considerando así mismo, sus cambios en el tiempo y el comportamiento de parámetros fisicoquímicos y biológicos en un ciclo anual.

### 1.1 Antecedentes

Los ecosistemas acuáticos lenticos epicontinentales, han sido foco de atención del ser humano, de tal forma que los ha clasificado con base en diversos criterios.

Una de estas clasificaciones fue fundamentada en su origen, ya que puede influir en la calidad de sus aguas. Basados en este criterio, se les diferencia en lagos volcánicos, cársticos y salobres (Margalef, 1983).

En el medio geográfico, los primeros ocupan antiguas calderas o cráteres y sus aguas se caracterizan por contener elevadas concentraciones de Si, K, P y metales.

Los lagos cársticos se localizan en las periferias de montañas calizas. Sus aguas presentan altas concentraciones de calcio a consecuencia del cual, la cantidad de fósforo es mínima y por lo tanto existe muy baja productividad primaria. En este tipo de lagos pueden ser abundantes compuestos como el bicarbonato cálcico y los sulfatos.

Por último, los lagos salobres son aquellos que captan aguas que han atravesado materiales particularmente solubles, por lo que la naturaleza del agua dulce desvía su composición. Las aguas de este tipo de lagos pueden concentrar compuestos de sulfato y magnesio.

Otro criterio de ordenamiento, se basa en la frecuencia con que se interrumpe la distribución o estratificación vertical de la temperatura a través de un gradiente de mayor (superficie) a menor (fondo), confundiendo epilimnion e hipolimnion.

Con base en este criterio, se distinguen los siguientes tipos: amictico, monomictico, dimictico y polimictico (Limón, 1982; Margalef, 1983).

## ..INTRODUCCION..

Los lagos **amícticos** son aquellos que nunca pierden su distribución vertical de temperatura. Los lagos **monomícticos** se caracterizan por presentar la mayor parte del año una perfecta estratificación, excepto durante el invierno.

Los lagos denominados **dimícticos** son aquellos que presentan dos periodos de mezcla vertical de sus aguas. Por su parte, los de tipo **polimíctico** no presentan estratificación duradera por lo que la circulación es frecuente o continua.

Una tercera clasificación de los lagos, es la propuesta a principios de siglo por Naumann y Thienemann, separándolos primero en base a su distribución geográfica y después con referencia a múltiples variables, exponiendo así, la complejidad del proceso. Tal clasificación distingue a los siguientes tipos: **oligotrófico** y **eutrófico** (Margalef, 1983; Mason, 1984).

Las características asignadas a estos por los primeros limnólogos fueron;

### a) Lagos oligotróficos

Excavados en rocas poco solubles, de aguas transparentes y bien oxigenadas durante el verano, pobres en plancton y en elementos químicos como el fósforo y el nitrógeno.

### b) Lagos eutróficos

Estos son excavados en llanuras cubiertas de sedimentos, por lo que son relativamente ricos en materiales solubles. Son abundantes en plancton y en elementos químicos como el fósforo y el nitrógeno, sus aguas son poco transparentes y presentan en el fondo, agotamiento del oxígeno a fines del verano.

Dentro de esta clasificación se ha distinguido un tercer tipo, que es el **mesotrófico**, el cual caracteriza a aquellos lagos con particularidades intermedias entre oligotróficos y eutróficos (Bachmann, 1980; Olivera, 1987).

Debido a que esta clasificación es la que ha tenido la mayor aceptación, se han realizado numerosos estudios con el objeto de ampliar las características que distinguen a los distintos cuerpos de agua como oligotróficos, mesotróficos o eutróficos.

Como resultado de tales investigaciones, se determinó que los cuerpos de agua oligotróficos y eutróficos representan los extremos de un eje de variación lineal y continua, en donde al conjunto de cambios que se dan de nivel a nivel, se les ha denominado **proceso de eutroficación**, siendo los términos oligo-meso y eutrófico, **estados o niveles** tróficos de tal proceso (Olivera, 1987).

## ..INTRODUCCION..

No obstante que son las categorías más usuales y debido a que no se encuentran perfectamente delimitadas, algunos autores han optado por usar estados tróficos fuera o intermedios a ellos; tal es el caso de los cuerpos de agua hipereutróficos, ultraoligotróficos y mesoeutróficos (Shannon y Brezonik, 1972).

El objetivo primordial al estudiar y ampliar la caracterización tanto del proceso de eutroficación como de sus niveles, radica principalmente en los efectos y consecuencias debidas a la forma de ir progresivamente a través de él, ya sea natural o artificialmente.

La eutroficación natural tarda cientos de años en sucederse, mientras que la eutroficación artificial acontece en tan sólo algunas décadas a consecuencia de la influencia que ejercen las actividades humanas sobre los cuerpos de agua (Salas y Limón, 1986; Olivera, 1987).

Dentro de las actividades humanas que en muchas ocasiones han contribuido al proceso, podemos mencionar al vertido de residuos industriales, agrícolas y orgánicos, provocando que se presenten en mucho menos tiempo del completado en un proceso natural, las etapas sucesionales de la eutroficación (Olivera, op. cit.).

Con tales causas, las consecuencias pueden ser diversas, entre otras podemos mencionar a la disminución de la diversidad de especies o su reemplazamiento, incremento de la biomasa animal y vegetal, anoxia, elevación de la turbiedad, aumento del grado de sedimentación y el envejecimiento del cuerpo de agua (Edmonson, et al. 1958 ; Reckhow y Simpson, 1980).

Por todo lo anterior, el uso que se les puede dar a los cuerpos de agua eutróficos es muy limitado, en particular si se les destinara para abastecimiento de agua potable, el tratamiento resultaría difícil y costoso, además de que el agua puede presentar olor y sabor desagradables, probablemente hasta ser perjudicial para la salud.

Las aguas con este tipo de problemas deterioran su valor recreativo debido al desarrollo de plantas vasculares acuáticas, que en ocasiones llegan a interrumpir el flujo, la navegación y las actividades deportivo-recreativas provocando la desaparición de especies importantes desde el punto de vista comercial.

Debido a la preocupación por las consecuencias del proceso, Arrignon y Mc Neely, entre otros (en Huerto, 1988), propusieron límites en las concentraciones de algunas sustancias que pueden alterar el desarrollo de la vida acuática (Cuadro I).

Sin embargo, no sólo se han propuesto concentraciones límite para la protección de la vida acuática, sino también modelos fundamentados en el uso de parámetros fisicoquímicos. A tales parámetros se les ha considerado como indicadores del estado

Cuadro 1. Valores establecidos para la protección de la vida  
vida acuática (agua dulce).<sup>4</sup>

Parámetro	Límite permisible	Referencia	
OD	4.0	mg/l	Mc Neely <u>et al.</u> , 1979
pH	6.5-9.0	mg/l	Mc Neely <u>et al.</u> , 1979
DBO5	6.0	mg/l	Arrignon, 1979
DQO	6.0	mg/l	Arrignon, 1979
PO4 total	0.01	mg/l	SARH (1975)
Ptotal	0.1	mg/l	Mc Neely <u>et al.</u> , 1979
SO4	250 *	mg/l	Mc Neely <u>et al.</u> , 1979
Conduc.	750-2000	µmhos/cm	SARH (1975)
Dureza total CaCO3	150	mg/l	Arrignon, 1979
Sólidos suspend.	25.0	mg/l	Mc Neely <u>et al.</u> , 1979
N org	10.0	mg/l	SARH (1975)
NH3 NO IONIZADO	0.025	mg/l	Alabaster y Lloyd, 1980
NO3	0-11	mg/l	Arrignon, 1979
NO2	1.0	mg/l	Arrignon, 1979
CT	100 *	NMP/100 ml	Mc Neely <u>et al.</u> , 1979
CF	10 *	NMP/100 ml	Mc Neely <u>et al.</u> , 1979
EF	1 *	NMP/100 ml	Mc Neely <u>et al.</u> , 1979

<sup>4</sup> Tomado parcialmente de Huerto (1988). Macroinvertebrados  
Bentónicos como indicadores de la calidad del agua del Río  
Cuautla, Edo. de Morelos.

\* límite de potabilidad

..INTRODUCCION..

tráfico, entre los que podemos mencionar a la transparencia del disco Secchi, biomasa fitoplanctónica medida como clorofila *a*, oxígeno disuelto y productividad primaria.

Además de estos parámetros, se ha dado mucha importancia a los estudios enfocados al comportamiento del fósforo y el nitrógeno, debido a que se ha demostrado que son nutrientes limitantes para el desarrollo del plancton y plantas acuáticas.

En 1974 la organización EPA-NES realizó un estudio mostrando que para algunos cuerpos de agua el nutriente limitante es el fósforo, mientras que para otros lo es el nitrógeno, notándose una alta incidencia de cuerpos de agua dulce influenciados por el primero, mientras que el nitrógeno lo es para el agua de mar (Reynoso, 1984; Welch, 1977; Olivera, 1987).

También se han propuesto modelos matemáticos basados en la relación existente entre la concentración relativa de los nutrientes en la materia viva con respecto al exterior. Cuanto más cercanas sean tales concentraciones, más relevancia tendrá en las adaptaciones fisiológicas de los organismos, por lo que su importancia será mayor como limitante en el desarrollo de las especies (Tapp, 1978; Margalef, 1983).

Con estos antecedentes se concluyó que los cuerpos de agua no compartían las mismas características, por lo que Vollenweider hace incipiente en que se propongan formas realistas, generales y precisas para evaluar el nivel al que se encuentre el proceso de eutroficación (Mason, 1984). Con esta finalidad Carlson (1977) propone índices de estado trófico (IET) en los que considera por separado a parámetros o indicadores como son transparencia del disco de Secchi, concentración de fósforo total y clorofila *a*.

Carlson (*op. cit.*) propone una escala de 0 a 100 para la clasificación de los lagos incluyendo a los tres parámetros mencionados de la siguiente manera:

IET	DISCO SECCHI (m)	FÓSFORO SUPERFICIAL (mg/m <sup>3</sup> )	CLOROFILA SUPERFICIAL (mg/m <sup>3</sup> )
0	64	0.75	0.04
10	32	1.5	0.12
20	16	3	0.34
30	8	6	0.94
40	4	12	2.6
50	2	24	6.4
60	1	48	20.0
70	0.5	96	56.0
80	0.25	192	154.0
90	0.12	384	427.0
100	0.062	768	1183.0

Índice de Estado Trófico de Carlson (1977).

## ..INTRODUCCION..

Sin embargo, ya anteriormente Shannon y Brezonik (1972) habian propuesto que se considerara la naturaleza multidimensional del proceso y por consiguiente proponen que una aproximación para cuantificarlo seria combinando los indicadores dentro de un indice cuantitativo confiable. Tal indice se basa en matrices de correlacion de 7 indicadores tróficos entre los que se encuentran: la transparencia del disco Secchi, conductividad especifica, nitrogeno organico total, fósforo total, productividad primaria, clorofila  $a$  y la relacion de cationes  $(Ca + Mg)/(Na + K)$ .

Desde luego que la mejor aproximación para mostrar las interacciones que ocurren en un lago, las representan los modelos complejos, en este caso, debe reunirse una cantidad masiva de datos sobre el cuerpo de agua, por lo que es una investigacion no costeable desde el punto de vista económico. Un ejemplo de estos modelos lo desarrolló EPA en Estados Unidos, conocido como EPAECO. Las variables consideradas incluyen temperatura, DBO5, peces, bentos, zooplancton, algas, detritus, sedimentos orgánicos, fósforo, carbono inorgánico total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitritos y nitratos, oxígeno disuelto, coliformes, sólidos disueltos totales, alcalinidad, pH y dióxido de carbono (Vollenweider, 1981; Olivera, 1987).

Otro modelo se basa en la relación existente entre la carga o cantidad de nutrientes aportados por unidad de area en una unidad de tiempo (Dillon, 1975) y la morfometria, partiendo del balance de masas en relación con la concentracion de nutrientes suministrados por afluentes y que permanecen en el cuerpo de agua.

Estos modelos juegan un papel intermedio de complejidad entre los IET y los modelos complejos, como ejemplo tenemos al desarrollado por Vollenweider y modificado por Dillon en 1975 (Jones y Lea, 1985; Olivera, 1988).

Con los metodos de evaluación mencionados, algunos autores propusieron limites en las concentraciones de algunos compuestos que indicaran el estado trófico de un cuerpo de agua (Cuadro, 2), sin embargo, se presentaba un problema, debido a que la limnología empezó a desarrollarse en países de clima templado, los modelos propuestos no eran aplicables a cuerpos de agua de clima cálido (Galas y Limon, 1986), siendo las particularidades que los distinguen (Olivera, 1988);

a) Temperatura mínima de 10°C en condiciones normales y un promedio anual mínimo de 15°C;

b) Las estaciones del ciclo anual se limitan a época de lluvias y secas.

Cuadro 2. Valores establecidos para la clasificación trófica de lagos.

Parámetro Nivel Trófico	Fosforo Total mg/m <sup>3</sup>	Clorofila a mg/m <sup>3</sup>	Transparencia Disco Secchi m	% de saturación de O <sub>2</sub> en hipolimnion	Referencia
Oligotrófico	< 10.0	< 7.0	> 3.7	> 80.0	EPH-NES, 1974
	0.75 - 6.0	0.04 - 0.04	8.0 - 64.0		CARLSON, 1977
		0.3 - 2.5			SAKAMOTO, 1986
		< 4.0			NAS, 1972
		< 4.3			DOBSON, 1974
	< 10.0	$\bar{x}$ max 2.5 < 8.0	$\bar{x}$ min > 8.0 > 3.0		VOLLENWEIDER 1983
Mesotrófico	10.0 - 20.0	7.0 - 12.0	2.0 - 3.7	10.0 - 80.0	EPH-NES, 1974
	12.0 - 24.0	2.6 - 6.4	2.0 - 4.0		CARLSON, 1977
		1.0 - 1.5			SAKAMOTO, 1986
		4.0 - 10.0			NAS, 1972
		4.3 - 8.8			DOBSON, 1974
	10.0 - 35.0	$\bar{x}$ max 2.5-3.0 8.0-25.0	$\bar{x}$ min 3.0-4.0 1.5-3.0		VOLLENWEIDER 1983
Eutrofico	> 12.0	> 12.0	< 2.0	< 10.0	EPH-NES, 1974
	48.0 - 768.0	20.0 - 1,183.0	0.062 - 1.0		CARLSON, 1977
		5.0 - 140.0			SAKAMOTO, 1986
		> 10.0			NAS, 1972
		> 8.8			DOBSON, 1974
	> 35.0 - 100.0	$\bar{x}$ max	$\bar{x}$ min		VOLLENWEIDER 1983

\* Tomado de Otero, J. V. (1990) Estudio de la Eutrofización del Embalse Valle de Bravo, Méx.

## ..INTRODUCCION..

c) Los procesos biológicos son más acelerados por las altas temperaturas;

d) La presencia de macrofitas es más característica de lagos cálidos, llegando a ser más importantes que las algas en cuanto a productividad primaria del sistema;

e) Posibles diferencias en los regímenes de mezcla y estratificación;

f) Además del fósforo, el nitrógeno puede ser limitante por su acelerado metabolismo en lagos cálidos, así como el carbono;

g) La tasa de evaporación y/o precipitación es más alta.

Debido a la importancia de la eutroficación y a la imposibilidad de aplicar sin modificaciones en lagos cálidos, modelos y metodologías desarrolladas para lagos templados, en Sao Paulo, Brasil en 1981, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), propuso un proyecto regional para el desarrollo de metodologías simplificadas para el análisis de eutroficación en lagos cálidos, basada en el modelo desarrollado por Vollenweider en lagos templados (Castagnino, 1982).

Este proyecto tomó tal importancia que para 1987 ya se contaba con estudios de 40 cuerpos de agua de la participación de 15 países, entre lagos y embalses (Salas y Martino, 1988).

Con la finalidad de participar en el proyecto propuesto por CEPIS, México por primera vez aplica la metodología en el lago de Tequesquitengo, Mor. (Divera y Diaz, 1986); lago para el que ya se habían realizado algunos estudios en cuanto a la calidad del agua con base en parámetros fisicoquímicos y biológicos (SRH, 1976; SARH, 1980; Carreón, 1987).

## ..INTRODUCCION.

### 1.2 Objetivos

a).-Caracterizar la calidad del agua del lago de Tequesquitengo, Mor., de acuerdo al análisis de factores fisicoquímicos y biológicos.

b).-Mostrar los cambios de calidad del agua que se han dado en el lago temporalmente por comparación con estudios anteriores.

c).-Determinar el estado trófico del lago de Tequesquitengo, Mor., aplicando un índice de estado trófico y un modelo simplificado desarrollado para lagos cálidos.

d).-Evaluar posibles alternativas de mejoramiento y/o conservación del nivel trófico del lago.

## 2 DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 Generalidades

El poblado de Tequesquitengo se funda en 1850 por el asentamiento de comunidades indígenas en una zona rica en tequesquite, producto que se utilizaba para la fabricación de jabón y purgas para ganado.

Según Rodríguez (1864), el poblado se encontraba aledaño a una lagunilla (ahora lago de Tequesquitengo) ubicada en el terreno occidental de Jojutla. La lagunilla tenía 13 km de contorno, 80 m de profundidad en el centro y la longitud de su eje mayor era de 3700 m. Las actividades principales de los pobladores eran la caza de patos, la pesca, así como la siembra de maíz y ajonjolí.

Actualmente el lago pertenece en su mayor parte al municipio de Jojutla, siendo el poblado del ejido de Tequesquitengo el que se encuentra más cercano a él.

En 1988 Tequesquitengo contaba con una población fija de 5,000 personas (Valle, 1989) y una población flotante de entre 7,000 y 15,000 individuos, que de alguna forma han contribuido al deterioro de la calidad del agua en el lago (Carreón, 1987).

Los usos principales a que se destinan las aguas del lago incluyen el doméstico, el recreativo y la pesca a pequeña escala; aunque también se usan, para el lavado de ropa y abrevadero de ganado (SRH, 1976), siendo el ganado bovino el grupo más representativo.

Según el censo ganadero de 1966, realizado por las oficinas regionales de la SARH del municipio de Jojutla (Valle, op. cit.) en la zona aledaña al lago de Tequesquitengo, existen;

TIPO	CANTIDAD UNITARIA
BOVINOS.....	425
CAPRINOS.....	400
PORCINOS.....	100
EQUINOS.....	15
AVES TRASPATIO.....	200
FERROS.....	300

Sin embargo, la actividad más relevante de la zona no es la ganadería, sino la agricultura. De acuerdo a Carreón (1987) que se consiguieron asciende a 285 ha., de temporal y 156 ha., de riego (Valle, 1989).

La población económicamente activa en el área agropecuario-forestal es de 2,100 personas, de las cuales 107 se dedican a la agricultura, siendo 57 las enfocadas a riego y 50 a

## ..DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO..

la siembra de temporal, aenas de 5 personas dedicadas a la ganadería. Los principales productos agrícolas son; sorgo, maíz, arroz y caña de azúcar.

Después de la agricultura, la actividad que más beneficios ofrece a los lugareños es el turismo (Carreón, 1987; Valle, 1989).

Por otra parte, la vegetación natural de la zona pertenece al tipo de selva baja caducifolia (vegetación secundaria) y pastizal inducido (Olvera y Díaz, 1986), siendo las especies más frecuentes; Huamuchil, Huizache, Tehuixtle, Pochote, Cubata y Uña de gato (Valle, op. cit.).

El lago de Tequesquitengo presenta una profundidad libre de 25 m y una profundidad a la roca madre de 36 m, los 11 metros de diferencia se encuentran cubiertos por depósitos de limo, arcilla y caliza; que en su conjunto provocan que el agua se encuentre sulfatada (Carreón, 1987).

El suelo en donde se encuentra, está clasificado como de tipo Feozem háplico de textura media, con una pendiente de 12 a 20 % y una profundidad de 10 a 20 cm. La cuenca lacustre se encuentra en una zona con clima de tipo cálido subhúmedo con lluvias en invierno menores a 5 % AWO(Wi), siendo su precipitación media anual de 1,265 mm; con evaporación de 1,783.8 mm y temperatura de 24.4°C (En SPP, 1975; Olvera y Díaz, 1986).

Acorde con los datos publicados por la Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP, 1981) el lago de Tequesquitengo se ubica dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, la cual abarca la porción central y suroeste del estado de Morelos y limita al norte y oriente con el Eje Neovolcánico de rocas sedimentarias clásticas. Dentro de esta provincia, el lago se encuentra en la subprovincia Sierra y Valles Guerrerenses.

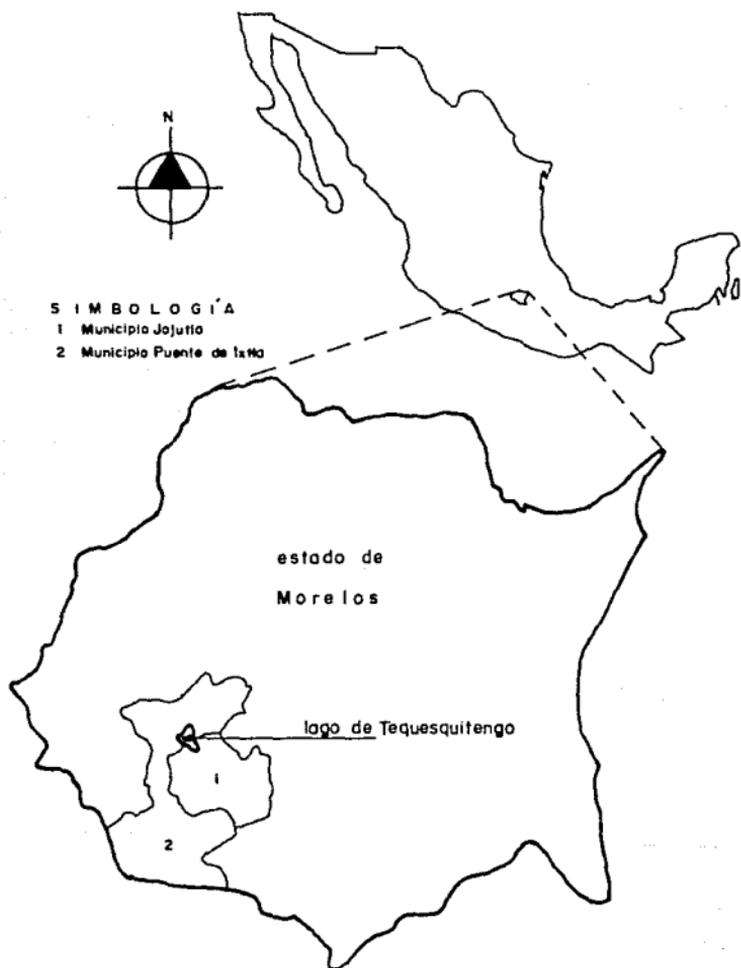
Cronológicamente hablando, Olvera y Díaz (1986) mencionan que la cuenca del lago de Tequesquitengo corresponde al período terciario, de roca altamente permeable.

Geológicamente hablando, el lago se forma por la disolución de rocas carbonatadas, en épocas inmediatas al inicio del Pleistoceno, por esta razón su constitución geológica es más reciente que la Formación Cuernavaca.

### 2.2 Localización

Según la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) (1971) y Limón (1989) el lago de Tequesquitengo está localizado a 18° 37' 15" latitud norte y 99° 16' 15" longitud oeste, entre los municipios de Jojutla y Puente de Ixtla a 48 km al sur del valle de Cuernavaca y a 120 km de la ciudad de México, dentro del estado de Morelos (Lámina 1).

Lámina 1. Localización de el lago de Tequesquitengo, Mor.



## ..DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO..

Se encuentra dentro de una cuenca cerrada, correspondiente a la depresión del Río Balsas a una altitud de 900 m s n m (Olvera y Díaz, 1986) y ubicada al sur del Trópico de Cáncer, por lo que está comprendido en la zona tropical del país (SARH, 1980).

El lago se encuentra dentro de la cuenca del Río Amacuzac, que pertenece a la Región Hidrológica No. 18, la cual abarca casi la totalidad del estado de Morelos, quedando comprendidas dentro de esta cuenca las planicies de Coatepec Harinas, Llano Grande y Almoloya de Alquisiras en el estado de México y los Valles de Yautepac y Coatlan (SARH, op. cit.).

El lago de Tequesquitengo se encuentra rodeado por los ejidos de Tequesquitengo, Xoxocotla, San José Vista Hermosa y Tehuixtla (Lámina 2).

El acceso al lago se logra partiendo de la ciudad de Cuernavaca, por la carretera Cuernavaca-Amacuzac, a la altura de la población de Alpuyea se desvía hacia el este, hasta llegar al lago (SRH, 1971).

### 2.3 Morfometría

Con lo que respecta a su morfometría, el lago de Tequesquitengo con un volumen de 128,000,000 m<sup>3</sup> y carente de efluente ocupa una superficie de 8,000,000 m<sup>2</sup> (800 hectáreas) teniendo como medidas máximas, largo de 4.4 km y ancho 3.3 km. En cuanto a su batimetría, presenta profundidades media y máxima de 16 m y 25 m, respectivamente (Olvera y Díaz, 1986) Lámina 3).

### 2.4 Hidrología

El lago de Tequesquitengo se encuentra dentro de la región hidrológica Num. 18 (cuenca del Río Amacuzac) (SARH, 1980), recibiendo aportes de agua del Distrito de Riego Num. 016 por medio de su único tributario denominado Barranca Honda (SRH, 1971).

Sin embargo, las aportaciones de agua que recibe el lago, no únicamente están representadas por su tributario, sino que también contribuyen aguas residuales, precipitación pluvial, escurrimiento tanto de la microcuenca como por las derivaciones de la SARH a la zona de riego con agua proveniente de las Estación de Bombeo de las filtraciones de los pozos artesianos, letrinas de los pobladores (Carreón, 1987; Samano, 1989).

Lámina 2. Ejidos colindantes al lago de Tequesquitengo, Mor.

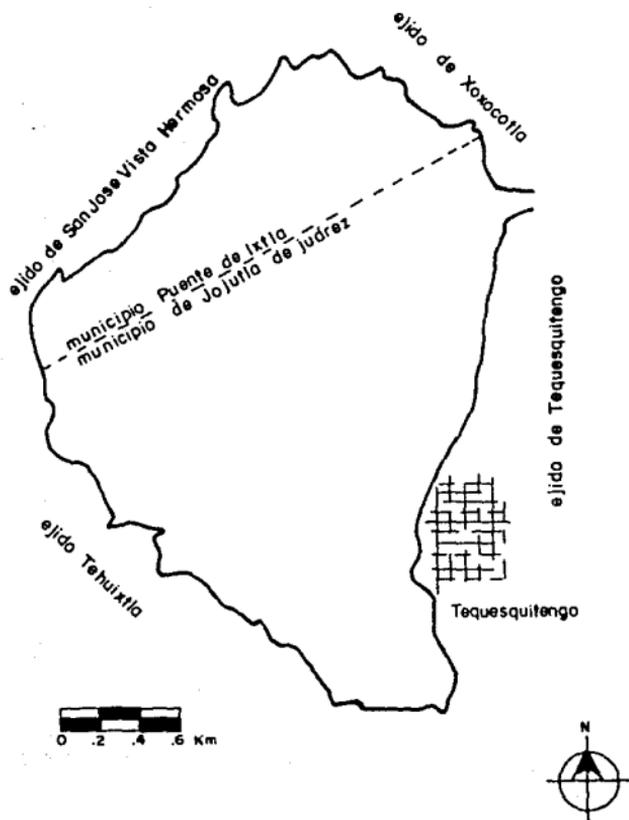
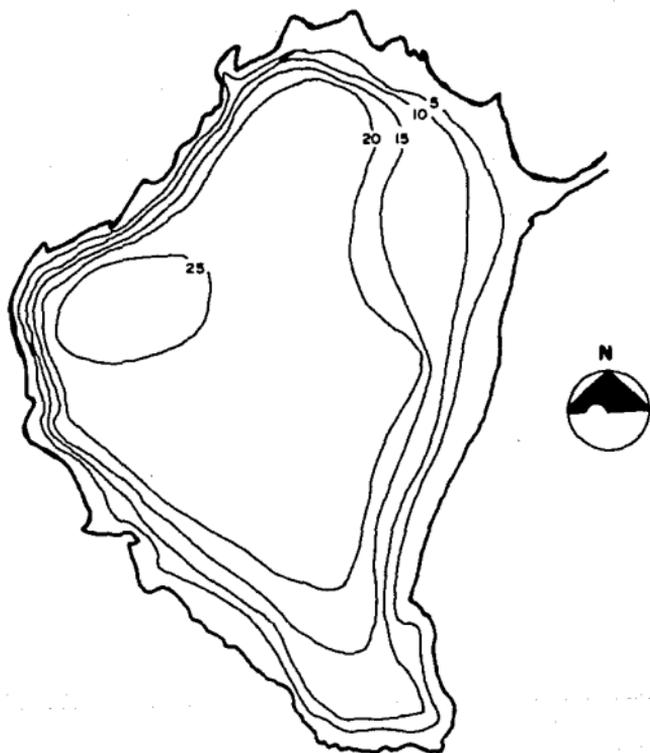


Lámina 3. Batimetría de el lago de Tequesquitengo, Mor



Tomado de Corraón, B.R. (1967) Modelo de autoperificación para el lago de Tequesquitengo y determinación de eficiencia y rem.

## ..DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO..

Carreón (op. cit.), calculó los aportes de aguas residuales al lago en 34 l/s tanto para la población fija como flotante en el año de 1985. Aunado a esto, informó que existe un manantial cercano al Club Náutico y florecimientos internos no cuantificados de aguas sulfurosas.

Las salidas de agua del lago están representadas por las excedencias, extracciones y evaporación.

Para controlar las excedencias, se construyó el túnel de desfogue, con una longitud de 1.5 km (Carreón, 1987), ubicado en el flanco occidental del lago, en las proximidades del sitio denominado El Hoyanco, con objeto de conducir las excedencias a través de una cañada como dren natural, recorriendo 2.5 km hasta verter su caudal al Río Coatlán, 0.7 km aguas arriba de su confluencia al Río Amacuzac (SRH, 1971), sin embargo, el túnel tiene ya varios años sin funcionar.

Las extracciones no han sido cuantificadas debido a que se realizan con fines domésticos mediante la succión con bombas eléctricas.

El hecho de que no haya intercambio de la masa de agua debido a la ausencia de un efluente como tal, hace considerar al lago de Tequesquitengo como una cuenca de sedimentación, tanto de la materia orgánica como inorgánica que en él se depositan a través de sus diferentes fuentes de ingreso.

La variación del espejo de agua es de aproximadamente 1 m entre el estiaje y la época de avenidas (Carreón, 1987).

Por otra parte, el poblado es abastecido de agua potable por medio de un pozo construido por el Fideicomiso del lago de Tequesquitengo. El pozo se localiza al oriente del poblado a 3.5 km sobre el camino que comunica al lago con Jojutla vía Tlaltenchi. El volumen de agua que abastece asciende a 2,592,000 l/día (Samano, 1987).

Su hidrología subterránea indica que los suelos son de alta permeabilidad y se considera como zona de veda elástica o sea, una zona en donde puede incrementarse la explotación de agua subterránea para cualquier uso (SFP, 1981).

### 3 METODOLOGIA

La metodología seguida para los muestreos y análisis de muestras fue la propuesta por Castagnino (1982) y completada por SARH (1985) para lagos calidos y sintetizada por Olivera y Díaz (1986) en la Lámina 4, en donde se dan los lineamientos de muestreo y análisis mínimos para estudios de eutroficación.

Para la aplicación de esta metodología se llevó a cabo el reconocimiento preliminar de la zona de estudio con la finalidad de establecer estaciones de muestreo, siguiendo criterios como; puntos cuyo promedio de conductividad estuviera por encima de 50  $\mu\text{mhos/cm}$  y su batimetría.

Bajo estos lineamientos se establecieron un total de siete estaciones de muestreo: seis dentro del lago y una en su tributario Barranca Honda (Lámina 5).

Los muestreos se llevaron a cabo con una frecuencia mensual, empezando en febrero y finalizando en noviembre de 1986, a excepción de julio y septiembre, en donde se muestreo quincenalmente para obtener datos más representativos de la época de avenidas.

#### 3.1 Muestreo en el lago

Durante todos los muestreos y en cada una de las estaciones, se determinó la temperatura superficial del agua por medio de un termómetro graduado de 0 a 100°C integrado a una botella Van Dorn, la cual se introdujo a 0.5 m de la superficie.

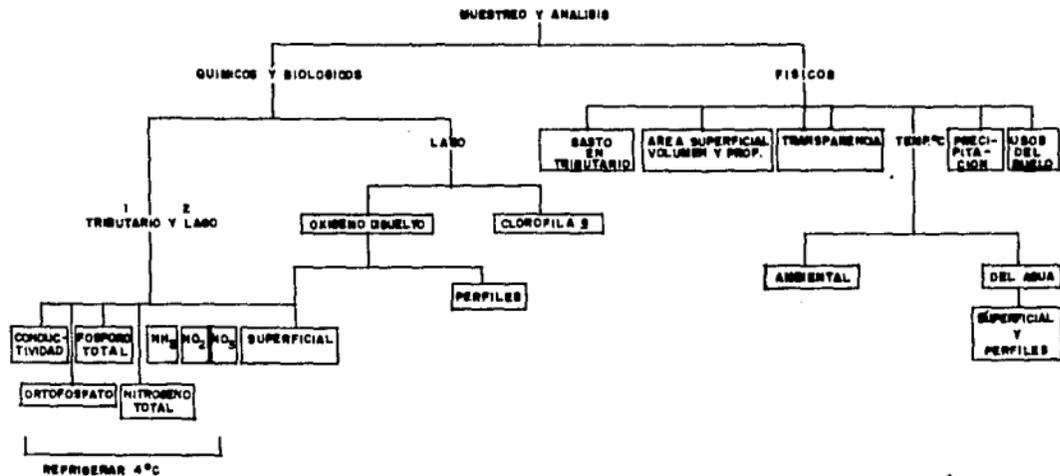
Con el mismo muestreador se tomó el perfil o distribución vertical de la temperatura en las estaciones 1, 4 y 6. Los perfiles consisten en registrar cada 2 m de profundidad la temperatura del agua, empezando a 0.5 m por debajo de la superficie hasta llegar a 0.5 m antes del fondo.

Para cada estación de muestreo se determinó la profundidad de visión del disco Secchi (DS) con base en dos lecturas; una en la que al sumergirlo se pierde a la visibilidad y otra en la que al extraerlo reaparece. El promedio de ambas lecturas es la DS.

Con la finalidad de cuantificar el oxígeno disuelto (OD), se tomaron muestras de 300 ml de agua en botellas de DO5 por medio del muestreador Winkler, el cual se sumergió a 0.5 m de la superficie.

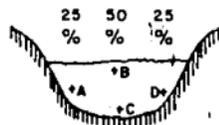
Al igual que para la temperatura, se tomó la distribución vertical del oxígeno disuelto (perfiles) para las estaciones 1, 4 y 6.

Lámina 4. Metodología de muestreo con los requerimientos mínimos para estudios de eutroficación



20

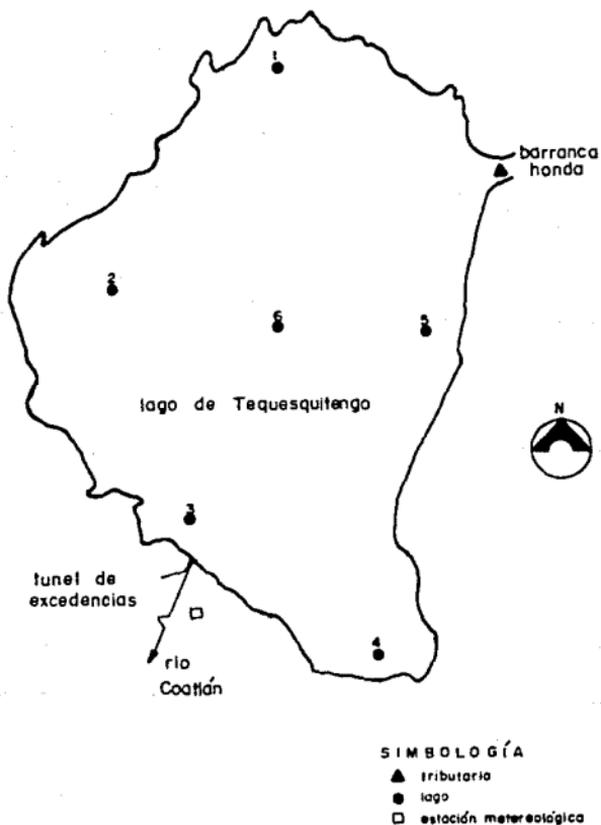
1) Toma de muestras dentro del tributario



- 2) MS: Metado de manguera al doble de la profundidad del disco secchi  
 MP: Muestreador VAN DORN

\* Modificado de Olvera, V.V. y Diaz, Z.G. (1985). Diagnostico del estado trófico del lago de Tequesquite, Jalisco.

Lámina 5. Localización de estaciones de muestreo en el lago de Tequesquitengo, Mor.



A todas las muestras de OD se agregaron 2 ml de sulfato manganoso ( $MnSO_4$ ) y 2 ml de acido yoduro, mezclando perfectamente para fijar y poder transportar al laboratorio para su analisis por el método Winkler (APHA, et al., 1980).

El resto de las muestras para analisis fisicoquímicos se colectaron en recipientes previamente enjuagados con una pequeña porción del agua a muestrear. Estas muestras fueron extraídas a dos profundidades, unas denominadas "MS" o muestras superficiales y las otras "MP" o muestras de profundidad.

Las muestras "MS" se extrajeron por el método de maguera que consiste en introducir una manguera de plastico transparente de dos pulgadas de diámetro y graduada cada 10 cm, al doble de la profundidad del disco Secchi (Castagnro, 1982).

Las muestras "MP" se colectaron 1 m sobre el fondo, en la interface agua-sedimento con el auxilio de la botella Van Dorn.

Para ambos tipos de muestra se realizaron los siguientes análisis;

Se tomaron muestras en recipientes de 3 litros para la obtención de; pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total (Ptotal), sulfatos ( $SO_4$ ), conductividad, dureza, sólidos suspendidos fijos (SSF) y sólidos suspendidos volátiles (SSV). Estos recipientes fueron trasladados al laboratorio a 4°C.

También se tomaron muestras en recipientes de 1 litro para la cuantificación de nitrógeno orgánico (Norg), nitrógeno amoniacal ( $NH_3$ ), nitratos ( $NO_3$ ) y nitritos ( $NO_2$ ), a las que se agregó 1 ml de  $H_2SO_4$  para preservarlas a  $pH < 2$ . Estas muestras se transportaron al laboratorio en refrigeración.

### 3.2 Muestreo en el tributario

En el tributario Barranca Honda se midió la temperatura superficial del agua, sumergiendo manualmente el termómetro.

Las muestras para analisis de oxígeno disuelto, se tomaron en botellas de DBO de 300 ml, llevándose a cabo de dos formas;

la primera, cuando la profundidad lo permitió, se introdujo el muestreador Winkler hasta poco antes del fondo para evitar mezclar el agua con los sedimentos.

La segunda, cuando el tributario llevaba poco cauce, se colocó la botella Winkler en la superficie del agua, de tal forma que esta resbalara por las paredes sin formar burbujas, hasta llenar el recipiente.

## ..METODOLOGIA..

A las muestras se agregaron 2 ml de sulfato manganoso y 2 ml de azida yoduro, mezclando perfectamente para fijar el CO<sub>2</sub> y transportarlas al laboratorio para su análisis por el método Winkler (APHA, *et al.*, 1980).

Para los análisis fisicoquímicos se tomaron muestras de tipo compuesto, lo que significa tomar volúmenes de igual proporción de 4 puntos dentro del tributario (Lámina 4). En cada uno de los puntos marcados como A, B, C y D se colectó manualmente un 25 % de la muestra total, con la finalidad de que ésta fuera lo más representativa posible de las condiciones en que se aporta el agua al lago. Los parámetros fisicoquímicos y biológicos analizados para el tributario fueron los mismos realizados en el lago, siendo las muestras de los mismos volúmenes.

Las técnicas empleadas para los análisis fisicoquímicos se enlistan a continuación;

### PARAMETRO

### TECNICA DE ANALISIS

Temperatura del agua.....	Termómetro
pH.....	Potenciométrico
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> ).....	EDTA Eriocromo Negro T
Oxígeno disuelto (OD).....	Iodométrico ó Winkler
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	Modificado de Winkler
Demanda química de oxígeno (DQO).....	Dicromato de potasio
Nitrogeno amoniacal (NH <sub>3</sub> ).....	Kjeldhal
Nitrogeno orgánico (Norg).....	Kjeldhal
Nitrato (NO <sub>3</sub> ).....	Sulfato de brucina
Nitrito (NO <sub>2</sub> ).....	Diazotación
Fósforo total (Ptotal).....	Cloruro estanoso
Ortofosfatos (PO <sub>4</sub> ).....	Cloruro estanoso
Sulfatos (SO <sub>4</sub> ).....	Turbidimétrico
Conductividad.....	Conductimétrico
Sólidos suspendidos fijos (SSF).....	Gravimétrico
Sólidos suspendidos volátiles (SSV).....	Gravimétrico
Transparencia.....	Disco Secchi

### 3.3 Muestreo de Clorofila *a*

Para determinar la cantidad de clorofila *a* se tomaron las muestras en recipientes de 1 litro previamente enjuagados con el agua a muestrear, éstas se extrajeron por el método de manguera ("MS"). A los recipientes se agregaron 0.5 ml de solución de carbonato de magnesio (MgCO<sub>3</sub>) para evitar su acidificación y se sometieron a refrigeración.

Una parte del análisis se llevó a cabo en el campo, tomando 0.5 litros de la muestra, para hacerlos pasar a través de filtros con abertura de malla de 0.45  $\mu$  por medio del equipo millipore.

## ..METODOLOGIA..

Los filtros obtenidos se depositaron en tubos de ensayo con tapon, siendo trasladados en obscuridad y en refrigeración para su análisis por el método de Lorenzen (1967). Las muestras de agua obtenidas de la filtración se conservaron para el análisis de ortofosfatos (PO<sub>4</sub>).

### 3.4 Muestreo Bacteriológico

Los análisis bacteriológicos se colectaron en frascos esterilizados de 300 ml para el análisis de Coliformes totales (CT), Coliformes fecales (CF) y *Streptococos fecales* (EF). Estas muestras se colectaron sumergiendo el recipiente tapado y destapándolo por debajo del agua hasta que el contenido de agua en la botella fuese de 3/4 partes de su volumen total. Estas muestras fueron trasladadas al laboratorio para su análisis en refrigeración.

### 3.5 Calidad del agua

Con el objeto de visualizar el comportamiento de la calidad del agua del lago de Tequesquitengo a través del tiempo, se compararon los resultados de los análisis fisicoquímicos y biológicos por lo menos en dos de los tres estudios llevados a cabo en la zona: SRH (1976), Carreón (1987) y el presente.

Entre los parámetros considerados se encuentran:

Oxígeno disuelto, pH, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, ortofosfatos, fósforo total, sulfatos, conductividad, dureza, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos, clorofila *a*, coliformes totales, coliformes fecales y *Streptococos fecales*.

### 3.6 Balance hidráulico del lago

Con la finalidad de clasificar tróficamente al lago de Tequesquitengo, fue necesario actualizar los datos del balance hidráulico registrados por Olivera y Díaz (1986) o sea, actualizar la relación existente entre las entradas y las salidas de agua.

Para realizar un balance hidráulico más completo, en el presente estudio se consideraron:

-Agua residual (Ar)

Debido a que el poblado de Tequesquitengo carece de drenaje, sus aportes de agua residual hacia el lago fueron cuantificados por Carreón (1987), dato empleado en el presente estudio.

**Precipitación pluvial directa sobre el lago ( Pr )**

En este rubro se consideraron los datos registrados por la estación meteorológica "División Salinas y Pacífico, Municipio de Juchitán, edo. de Morelos, Tequesquitengo", ubicada a una latitud de 18°37'00" y longitud de 99°17'00".

Los datos empleados consideran desde el mes de enero de 1976 hasta diciembre de 1985, calculándose los promedios mensuales y la media de los diez años.

Con el valor promedio de precipitación pluvial de los 10 años, multiplicada por el área del lago, se obtuvo el aporte de agua de precipitación pluvial directa sobre el lago.

**-Gasto por el tributario Barranca Honda ( Ga )**

En este caso se consideró el gasto o volumen de agua aportado por el Distrito de Riego No. Cto a través del tributario hacia el lago en un año. Para medir el gasto se empleó el método del molinete contrastado que incluye la medición del área transversal de la corriente y la velocidad del agua (Lámina 5).

La medición del área transversal (A) del cauce se determinó por sondeo de tipo vadeo, el cual consiste en tender un cable a lo ancho del tributario en sentido perpendicular al de la corriente. Se marcan sobre el cable las margenes de la corriente y se mide el ancho del cauce etiquetando al mismo tiempo cada 10 cm para dividirlo en secciones. En cada uno de los puntos marcados se midió la profundidad de la corriente con la varilla del molinete. Con estos datos se calcularon las áreas parciales de las secciones.

La velocidad de la corriente (Vn) se midió con el molinete, el cual está provisto de una hélice que accionada por el agua nos proporcionó el número de revoluciones por unidad de tiempo:

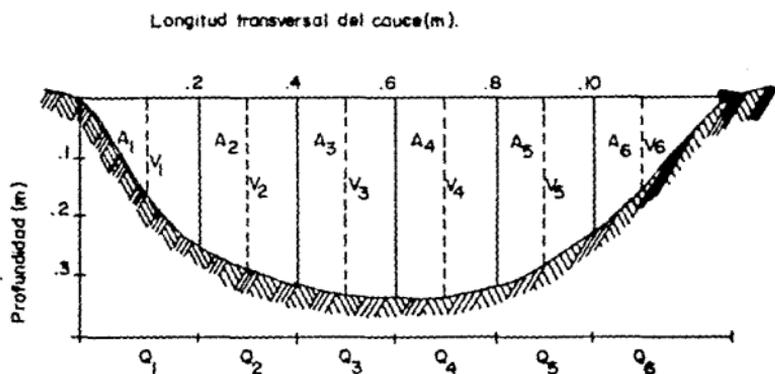
$$N = \# \text{ revoluciones } / s$$

La hélice se colocó sobre la varilla del molinete a los 5/10 de la profundidad a partir de la superficie. El área transversal se dividió en secciones de 20 cm, colocándose el molinete en el centro de cada una de ellas (línea punteada), calculando así, la velocidad de la corriente (m/s):

$$Vn = 0.690904 (N) + 0.014894$$

Con el cálculo del área y la velocidad de la corriente se obtuvieron los gastos para cada sección y para obtener el volumen de agua que penetra al lago por el tributario en un segundo se sumaron los gastos de todas las secciones.

Lámina 6. Metodología de evaluación del gasto en el tributario barranca honda.



$$Q_i = A_i (V_i)$$

$A_n$  = Area de cada seccion transversal (m)

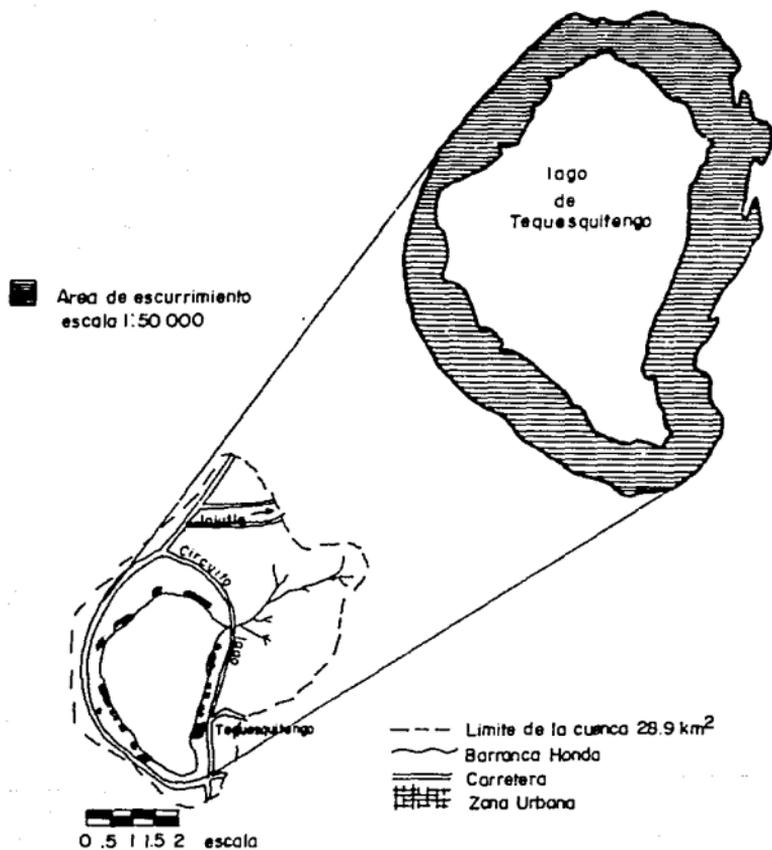
$V_n$  = Velocidad de la corriente de cada seccion transversal m/seg.

$Q_n$  = Gasto de cada seccion transversal m<sup>3</sup>/seg

$Q_T$  = Gasto de todas las secciones m<sup>3</sup>/seg.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

Lámina 7. Límite de la cuenca y área de escurrimiento directo al lago de Tequesquifengo, Mor.



### 3.7 Clasificación trófica del lago

Para llevar a cabo la clasificación trófica del lago de Tequesquitengo se emplearon 2 formas de evaluación; Índices de estado trófico y un modelo simplificado.

#### 3.7.1 Índices de estado trófico (IET)

Para el cálculo del estado trófico de los cuerpos de agua Carlson (1977) propuso escalas tróficas con base en índices numéricos que contemplan a los parámetros individualmente, en especial la transparencia del disco de Secchi (DS), la concentración de clorofila  $a$  (C $_{la}$ ) y fósforo total (P $_{total}$ ).

Las ecuaciones propuestas son:

$$IET (DS) = 10 (6 - \frac{\ln (DS)}{\ln 2}) \quad (3)$$

en donde;

DS = Transparencia del disco Secchi en números enteros ( m )

$$IET (C_{la}) = 10 (6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln (C_{la})}{\ln 2}) \quad (4)$$

en donde;

C $_{la}$  = Concentración de clorofila  $a$  ( mg/m $^3$  )

$$IET (P_{total}) = 10 (6 - \frac{\ln \frac{48}{(P_{total})}}{\ln 2}) \quad (5)$$

en donde;

P $_{total}$  = Concentración de fósforo total ( mg/m $^3$  )

#### 3.7.2 Modelo Simplificado

Para el análisis del estado trófico por medio del modelo simplificado se tiene un nivel de significancia del 95 % (Salds y Martino, 1986).

El modelo es el siguiente;

$$P_{\lambda} = \frac{L(p)}{Z} + \frac{Tw}{3} \quad (0,8) \quad (6)$$

en donde;

$P_{\lambda}$  = Concentración de fósforo en el lago (mg/ m<sup>3</sup>)

$L(p)$  = Carga superficial de fósforo (mg/m<sup>2</sup>/año)

$Z$  = Profundidad media ( m )

$T_w$  = Tiempo de residencia hidráulica ( años )

-Carga superficial de fósforo (  $L(p)$  )

Para calcular la carga superficial de fósforo se tomaron en consideración dos fuentes de ingreso:

Aporte de fósforo por la microcuenca (  $A_t$  )

i) Aporte de fósforo por seres vivos (  $A_s$  )

Este cálculo se refiere a la cantidad de fósforo que por seres vivos se deposita en la microcuenca y que por escurrimiento puede llegar al lago. En este caso se evaluó la población humana, además de la cantidad y tipo de ganado que la habita, conociendo la aportación de cada individuo en toneladas por año.

Para calcular la exportación de fósforo por seres vivos se asume que la carga de nutrientes es proporcional a la cantidad de escurrimiento (Castagnino, 1982).

ii) Aporte de fósforo por uso del suelo (  $A_u$  )

En este rubro, también se utilizaron los datos obtenidos de cartas de uso del suelo e información proporcionada por Valle, (1989) y Carredón (1987).

El método de evaluación de la carga de nutrimentos debido al uso del suelo ( $A_u$ ) se basó en coeficientes de exportación para fósforo como lo indica Castagnino (1982).

Con los datos anteriores se calculó el aporte de fósforo por la microcuenca, de la siguiente forma;

$$A_t = A_s + A_u \quad (7)$$

en donde;

$A_t$  = Aporte de fósforo por la microcuenca ( g/m<sup>3</sup> )

$A_s$  = Aporte de fósforo por seres vivos ( g/m<sup>3</sup> )

$A_u$  = Aporte de fósforo por uso del suelo ( g/m<sup>3</sup> )

- Carga por exportación total de fósforo (  $C_e(p)$  )

En este caso se consideró la concentración promedio de fósforo en el tributario (Pt).

Considerando a la carga de fósforo aportada por seres vivos (As) y a la carga por exportación, se calculó la exportación total de fósforo (  $C_e(p)$  ).

$$C_e(p) = Q_a(P_t) + A_t \quad (8)$$

en donde;

$Q_a$  = Gasto por el tributario Barranca Honda (  $m^3$  )  
 $P_t$  = Concentración promedio de fósforo en el tributario (  $g/m^3$  )  
 $A_t$  = Aporte de fósforo por la microcuenca (  $g/m^3$  )  
 $C_e(p)$  = Carga por exportación total de fósforo (  $g$  )

Utilizando estos datos, la carga superficial de fósforo, es;

$$L(p) = \frac{C_e(p)}{S} \quad (9)$$

en donde;

$C_e(p)$  = Carga por exportación total de fósforo (  $g$  )  
 $S$  = Superficie del lago (  $m^2$  )  
 $L(p)$  = Carga superficial de fósforo (  $g/m^2$  )

-Tiempo de residencia hidráulica (  $T_w$  )

Para calcular el tiempo que tarda en renovarse toda el agua del lago se tomaron las siguientes ecuaciones;

$$T_w = \frac{V}{I \cdot Q_a} \quad (10)$$

$$T_w = \frac{V}{2 \cdot CI} \quad (11)$$

..METODOLOGIA..

en donde;

V = Volumen del lago ( m<sup>3</sup> )

Qe = Agua que egresa por evaporación ( m<sup>3</sup>/año )

CI = Cálculo de ingresos totales de agua al lago ( m<sup>3</sup>/año )

Tw = Tiempo de residencia hidráulica en base a la cantidad de  
1 agua que egresa por evaporación (años).

Tw = Tiempo de residencia hidráulica en base al total de agua  
2 que ingreso al lago (años).

-Profundidad media ( Z )

Para conocer la profundidad media del lago tenemos:

$$Z = \frac{V}{S} \quad (12)$$

en donde;

V = Volumen del lago ( m<sup>3</sup> )

S = Superficie del lago ( m<sup>2</sup> )

Z = Profundidad media ( m )

## ..RESULTADOS..

### 4 RESULTADOS

Durante el establecimiento de estaciones de muestreo, se observó que el lago de Tequesquitengo no presenta afluentes, por lo que podemos decir que se encuentra acorde a lo que Margalef (1983) denomina como cuenca cerrada.

Tanto en las 6 estaciones de muestreo situadas dentro del lago como en el tributario Barranca Honda se realizaron 12 muestreos, comprendidos entre los meses de febrero y noviembre de 1986.

#### 4.1 Análisis fisicoquímicos

En el cuadro (3) se presentan los resultados anuales de los análisis fisicoquímicos tanto en la superficie (muestras "MS") como en el fondo (muestras "MP"), así como su promedio  $(MS + MP/2)$ .

Se observó que la temperatura del agua en el lago fue de 26,3 °C siendo mayor con respecto a la del tributario (23,5 °C), datos que indican que el agua de Barranca Honda penetra al lago distribuyéndose probablemente por debajo de la superficie debido a su mayor densidad.

En la estación de muestreo No. 6 se resume la distribución vertical de la temperatura en el lago, notándose una estratificación bien definida durante la mayor parte del año, con la formación de una termoclina aproximadamente a los 8 m de profundidad (Lámina 8).

El valor promedio de la transparencia medida con el disco Secchi, fue de 2.2 m con un rango de variación de aproximadamente 1 m.

El oxígeno disuelto (OD) en el lago tiene un promedio de 8.7 mg/l; 2.2 mg/l arriba de la concentración encontrada en el tributario.

En cuanto a la distribución vertical del OD (Lámina, 9), se observa que durante la segunda mitad del año (junio- noviembre) se presenta anoxia en el fondo, sucediendo el proceso contrario en la superficie, esto es, aumento en su concentración, además de que se nota claramente la formación de lo que Hutchinson (1975) llama oxiclina o clinograda de oxígeno a la misma profundidad que la termoclina.

Debido a la perfecta estratificación del lago mostrada durante la mayor parte del año por los perfiles de temperatura y oxígeno, excepto en la época de invierno, el lago de Tequesquitengo se puede caracterizar como monomictico.

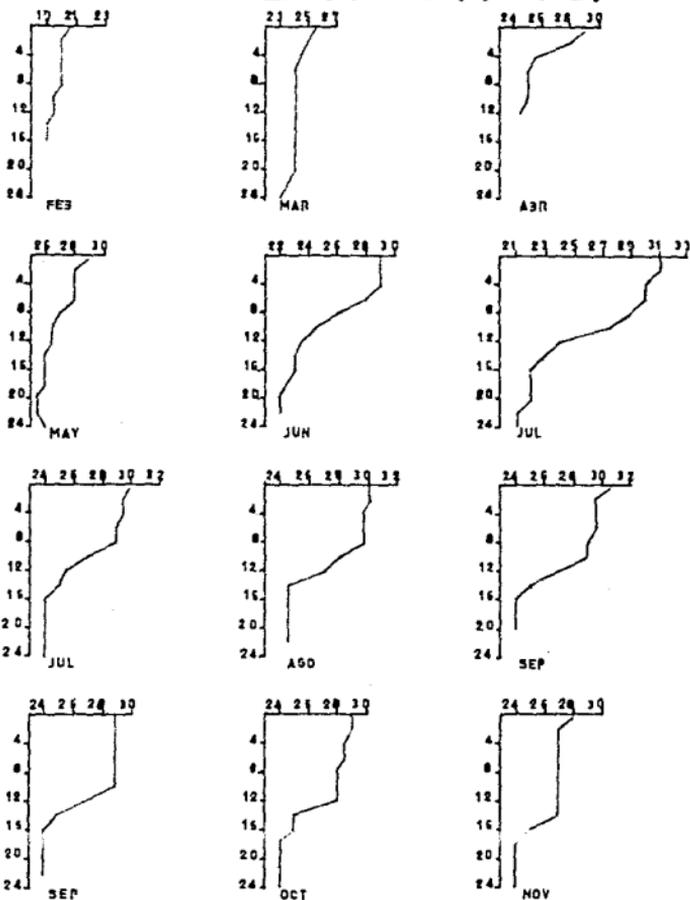
Cuadro 3. Promedios anuales de los parámetros fisicoquímicos del lago y su tributario Barranca Honda.

Variante Parámetro	Muestras (MS)		LAGO				TRIBUTARIO Barranca Honda	
	Promedio	Ambito	Promedio	Ambito	MS+MP/2	Ambito	Promedio	Ambito
Temp. del agua °C	28.3	20.5-31.0	-----	-----	-----	-----	23.5	20.0-28.0
Transp. u	2.2	1.21-3.5	-----	-----	-----	-----	-----	-----
OD mg/l	8.7	3.0-14.0	-----	-----	-----	-----	6.5	7.9-14.2
pH	8.3	7.0-9.2	7.9	7.0-9.8	8.1	7.0-9.8	7.8	7.0-8.4
DBO mg/l	1.0	<1.0-13.0	2.0	<1.0-15.0	1.5	<1.0-15.0	1.0	<1.0-3.0
DQO mg/l	21.0	<1.0-100.0	24.0	<1.0-65.0	23.0	<1.0-100.0	11.0	<1.0-30.0
Porto mg/l	<0.01	0	<0.01	0	<0.01	0	0.01	<0.01-0.07
Ptotal mg/l	<0.01	<0.01-0.159	<0.01	<0.01-0.09	<0.01	<0.01-0.159	0.05	<0.01-0.16
SO4 mg/l	2685	1272-3531	2716	1657-3436	2701	1272-3531	1615	770-3038
Conduc. µmhos/cm	3076	1783-3420	3090	2527-3260	3083	1783-3420	1817	1108-3151
Dureza CaCO3 mg/l	1566	675-2002	1618	1056-3103	1592	675-3103	1264	816-1755
SSF mg/l	8	1-71	12	1-118	10	1-118	36	4-130
SSV mg/l	11	1-115	5	1-28	8	1-115	11	2-23
Norg mg/l	0.85	0.082-1.89	0.79	0.04-2.32	0.82	0.04-2.32	0.5	0.08-1.01
NH3 mg/l	0.12	<0.05-1.45	1.18	<0.05-5.15	0.648	<0.05-5.15	0.44	<0.05-1.68
NO3 mg/l	<0.001	0	<0.001	0	<0.001	0	0.27	<0.001-0.939
NO2 mg/l	<0.001	0	<0.001	0	<0.001	0	<0.001	<0.001-0.02

LAMINA 8. PERFILES DE TEMPERATURA EN EL LAGO DE TEQUESQUITENGO, MOR.

## TEMPERATURA (°C)

PROFUNDIDAD (m)

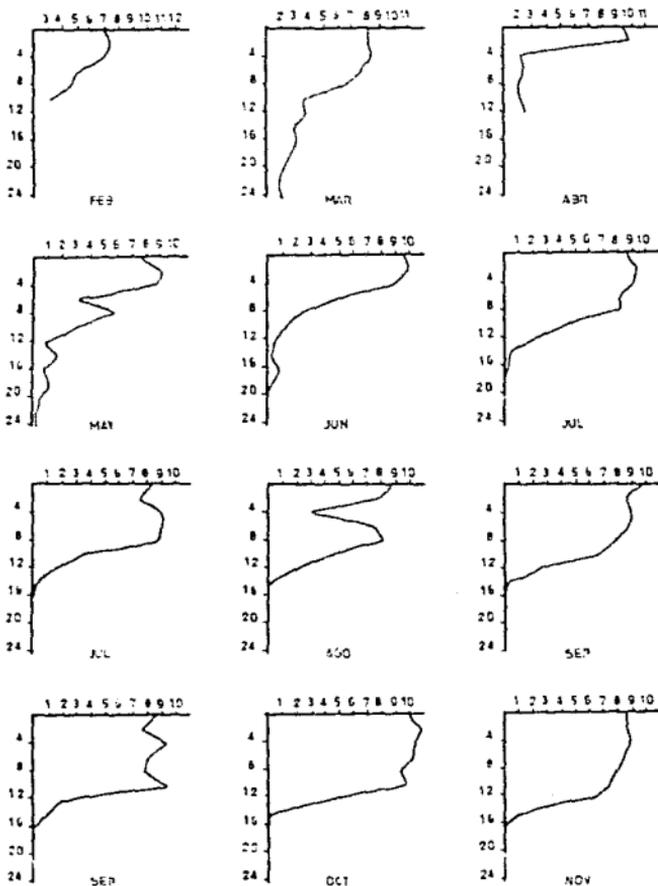


LAMINA 9.- PERFILES DE OXIGENO DISUELTO EN EL LAGO DE TEQUESQUITENGO.

OXIGENO DISUELTO mg/l.

PROFUNDIDAD

(m)



## ..RESULTADOS..

Tanto la oxiclina como la termoclina se extienden hasta los 12 m de profundidad, permitiendo diferenciar a las aguas del lago en epilimnion (0 a 12 m) e hipolimnion (incluyendo al metalimnion) de 12 m en adelante, según las consideraciones de Olivera (1990).

Con el objeto de saber el volumen de agua que representa tanto al epilimnion como al hipolimnion se emplea la ecuación propuesta por Vollenweider en 1986 (Olivera, op. cit.), dando por resultado:

$$V_e = V \left( 1 - \left( 1 - \frac{Z_e}{Z_m} \right)^\delta \right)$$

en donde

S = Superficie del lago =  $8.0 \times 10^6 \text{ m}^2$   
V = Volumen total del lago =  $128 \times 10^6 \text{ m}^3$   
V<sub>h</sub> = Volumen hipolimnético  
V<sub>e</sub> = Volumen epilimnético  
Z = Profundidad media =  $V/S = 16 \text{ m}$   
Z<sub>e</sub> = Profundidad del epilimnion = 12 m  
Z<sub>m</sub> = Profundidad máxima = 25 m  
 $\delta = Z_m/Z = 1.5625 \text{ m}$

$$V_e = 82.0 \times 10^6 \text{ m}^3$$
$$V_h = V - V_e = 46.0 \times 10^6 \text{ m}^3$$

En donde el epilimnion representa el 64.06 % del volumen total del lago.

Por su parte el pH en el lago promedió 8.1, encontrándose ligeramente por encima del presentado por el tributario (7.8). Entre la superficie y el fondo del lago no se presentaron grandes fluctuaciones, aunque se mostró menor el pH del fondo.

En el caso de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) que es la forma de medir la cantidad de materia orgánica existente en los sistemas, en el lago promedió 1.5 mg/l, mientras que en el tributario no se notó demanda de oxígeno, por lo que podemos decir que prácticamente no hay materia orgánica susceptible de ser biodegradada aportada por éste. La DBO<sub>5</sub> en las muestras "MP" resultó ser dos veces mayor con respecto a la de la superficie (2 mg/l).

Por lo que respecta a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) que representa al oxígeno requerido para la oxidación de compuestos orgánicos, en el lago obtuvo un promedio de 23 mg/l con fluctuaciones que van desde < 1.0 mg/l hasta 100 mg/l, siendo considerablemente mayor con respecto al tributario (11 mg/l). Las muestras de superficie y fondo no presentan variaciones considerables de DQO, aunque en las muestras "MP" se nota una demanda ligeramente mayor.

## ..RESULTADOS..

El análisis de las concentraciones de ortofosfatos (PO<sub>4</sub>) y fósforo total (P<sub>total</sub>) registraron prácticamente en todos los análisis dentro del lago, valores por debajo de 0.01 mg/l, mientras que en el tributario Barranca Honda se obtuvieron concentraciones mínima de 0.01 mg/l y máxima de 0.05 mg/l respectivamente.

En promedio la concentración de sulfatos (SO<sub>4</sub>) en el lago fue de 2701 mg/l, estando muy por encima de la concentración encontrada en el tributario (1615 mg/l).

En este caso, se detectaron marcadas diferencias entre muestras "MS" y "MP", siendo mayor la concentración para las segundas, pudiendo deberse al florecimiento de manantiales sulfurosos subacuáticos, además de la formación geológica de tipo calizo en la que se encuentra el lago (Carrasco, 1957).

La cantidad de movimiento de iones presentes en el medio, medida como conductividad eléctrica, presentó para el lago un promedio de 3093 umhos/cm mientras que en el tributario fue considerablemente menor (1817 umhos/cm); en el caso de las muestras "MS" y "MP" los valores obtenidos mostraron los siguientes promedios, 3076 y 3090 umhos/cm, respectivamente.

El valor promedio de la dureza medida como Carbonato de Calcio fue de 1592 mg/l estando por encima de la concentración de Barranca Honda (1264 mg/l). Entre la superficie y el fondo, la diferencia asciende a 52 mg/l, notándose su inclinación hacia las muestras "MP".

Los materiales que permanecen como residuo después de evaporar y secar una muestra de agua en ciertas condiciones (SRH, S/A) fueron cuantificados en su forma suspendida, tanto fijos como volátiles.

Los sólidos suspendidos fijos (SSF) presentaron en el lago valor promedio anual de 10 mg/l, llegando a ser más de tres veces menor del presentado por el tributario.

Por lo que respecta a sólidos suspendidos volátiles (SSV) el valor promedio en el lago fue de 8 mg/l, estando al igual que los SSF por debajo de la concentración del tributario. Los resultados muestran que mientras los SSF se concentran más en el fondo, sucede a la inversa con los SSV.

El nitrógeno orgánico (N<sub>org</sub>), presentó en el lago promedio de 0.82 mg/l, valor que se encuentra por encima del detectado en Barranca Honda (0.2 mg/l). Se observó que su concentración en la superficie, registrando valores de 0.85 y 0.79 mg/l, para las muestras "MS" y "MP", respectivamente.

El nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>) en el lago fue de 0.648 mg/l, siendo menor en el tributario (0.44 mg/l).

## ..RESULTADOS..

A diferencia del nitrógeno orgánico, el  $\text{NH}_3$  es considerablemente mayor en el fondo (muestras "MP"), con un promedio de 1.18 mg/l, como consecuencia probablemente de la reducción del nitrógeno por la anoxia del fondo.

En cuanto a nitratos y nitritos en el lago sus concentraciones están por debajo de 0.001 mg/l, variando los primeros únicamente en el caso del tributario con un promedio de 0.27 mg/l.

El comportamiento de los promedios de las muestras MS y MP de las variables analizadas por estaciones de muestreo se presentan en el cuadro 4; además de que en las láminas 10 y 11 se pueden apreciar sus fluctuaciones durante el año.

En primer término, se tiene a la temperatura superficial del agua, la cual no presentó variaciones importantes entre estaciones de muestreo, aunque las fluctuaciones a lo largo del año ascendieron a más de 9°C, con el valor mínimo para el mes de febrero (21°C) y el máximo por encima de 30°C durante septiembre.

En cuanto a la transparencia del disco de Secchi, la máxima variación entre estaciones de muestreo, asciende tan solo a 15 cm, presentándose los valores mínimo y máximo en las estaciones 1 y 2, respectivamente.

Al finalizar los muestreos, se notó que entre la transparencia y el tiempo la relación es directamente proporcional, dándose valores para el mes de febrero por debajo de 1.6 m y para noviembre por encima de 2.7 m.

Sin embargo, en general las bajas transparencias indican que existen niveles altos de sustancias y partículas tanto en suspensión como en solución (incluyendo al plancton) y que según Carlson, EPA-NES y Vollenweider (Cuadro 2) podría clasificar al lago como mesotrófico.

En el caso de la distribución superficial del oxígeno disuelto (OD), su mínima concentración se presentó en la estación 4 con 8.1 mg/l y la máxima en la estación 1 con 9.3 mg/l.

A lo largo del año en el lago, la mínima concentración de OD se presenta durante el mes de febrero (6.6 mg/l) y en el caso del tributario durante el mes de agosto (3.15 mg/l).

Realizando un análisis de los resultados anteriores en el lago se puede notar que tanto para el OD como para la transparencia y la profundidad a la que aparecen la termoclina y la oxiclina, presentan un patrón de comportamiento similar, mostrando sus valores menores al inicio del año, resultados que probablemente enmarquen la reaparición de la estratificación después de haberse llevado a cabo la mezcla invernal de sus aguas.

Cuadro 4. Promedios de los parámetros fisicoquímicos por estación de muestreo en el lago de Tequesquitengo.

ESTACION	HOTEL 1	CASA 2	PALAPA 3	BOYA 4	MOROCO 5	ARBOLES 6
PARAMETRO	TEQUES.	BLANCA	FARRISO	CUPULA		TEQUES.
TEMP. °C DEL GUA	28.3±2.4	28.3±2.5	28.4±2.6	28.4±2.6	28.1±2.8	28.4±2.8
TRANSP. a DISCO SECCHI	2.14±0.47	2.29±0.52	2.25±0.58	2.25±0.59	2.28±0.49	2.2±0.44
OD mg/l	9.3± 1.82	8.9±0.99	8.8±1.1	8.1±1.8	8.±1.8	8.7±0.85
pH	8.1±0.5	8.1±0.6	8.1±0.7	8.1±0.6	8.3±0.5	8.2±0.6
DBO5 mg/l	2.0±2.0	3.0±4.0	2.0±3.0	1.0±1.0	1.0±1.0	2.0±4.0
DDO mg/l	28.0±12.0	23.0±15.0	18.0±12.0	21.0±11.0	24.0±13.0	21.0±16.0
Porto mg/l	<0.01±0.0	<0.01±0.0	<0.01±0.0	<0.01±0.0	<0.01±0.0	<0.01±0.0
Ptotal mg/l	<0.01±0.0	<0.01±0.0	<0.01±0.0	<0.01±0.0	<0.01±0.0	0.02±0.04
SO4 mg/l	2591±331	2713±274	2698±363	2698±382	2707±280	2777±305
CONDUCT. µmhos/cm	3060±219	3125±109	3088±133	3027±145	3077±103	3110±115
DUREIA TOT. CaCO3 mg/l	1558±206	1625±238	1640±372	1581±224	1583±201	1574±242
SSF mg/l	8.0±8.0	7.0±12.0	8.0±12.0	10.0±16.0	14.0±27.0	12.0±20.0
SSV mg/l	10.0±9.0	6.0±11.0	6.0±8.0	10.0±24.0	10.0±13.8	6.0±7.0
N org mg/l	1.0±0.547	0.92±0.51	0.66±0.4	0.8±0.394	0.71±0.31	0.81±0.38
NH3 mg/l	0.92±0.62	1.03±1.51	0.52±0.6	0.49±0.65	0.27±0.45	0.65±0.92
NO3 mg/l	<0.001±0	<0.001±0	<0.001±0	<0.001±0	<0.001±0	<0.001±0
NO2 mg/l	<0.001±0	<0.001±0	<0.001±0	<0.001±0	<0.001±0	<0.001±0

Lámina 10. Comportamiento mensual de parámetros fisicoquímicos en el lago de Tequesquitengo, Mor.

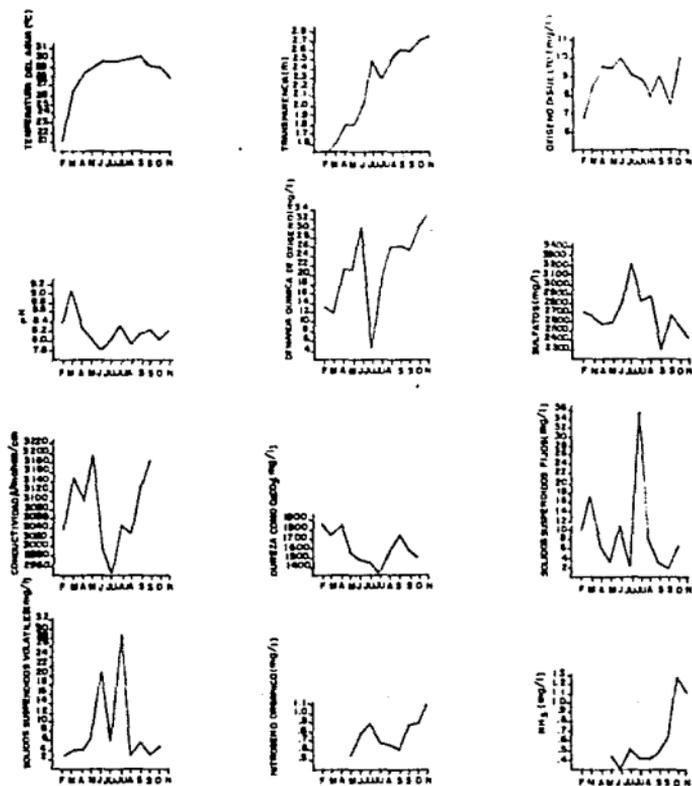
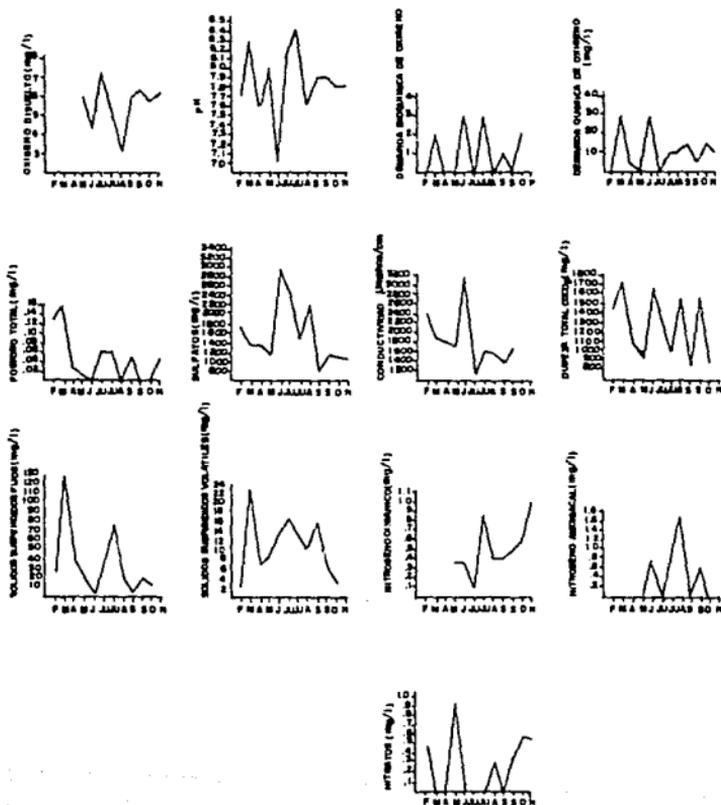


Lámina II. Comportamiento mensual de los análisis físicoquímicos en el tributario Barranca Honda



## ..RESULTADOS..

Por su parte, en la distribución del potencial hidrógeno (pH) no hubo fluctuaciones de mayor importancia, aunque su comportamiento mensual indica un considerable ascenso durante el mes de marzo (9.1), a diferencia de junio, en donde se presenta el pH menor (7.8).

El rango de variación del pH en Barranca Honda prácticamente fue el mismo que en el lago, aunque sus valores fueron más tendientes a la neutralidad, con un valor mínimo de 7 para junio y máximo de 8.4 para el mes de julio.

En relación a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), la estación No. 2 con respecto al resto, fue la que requirió más oxígeno (3 mg/l). A lo largo del año, en algunos meses prácticamente hubo ausencia de demanda, aunque durante septiembre la DBO5 llegó hasta 6 mg/l. En el caso del tributario Barranca Honda fue en los meses de junio y julio cuando se mostró la máxima DBO5 (3 mg/l).

En el caso de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la estación de muestreo No. 1 requirió de una mayor concentración de oxígeno, presentando un promedio de 28 mg/l, encontrándose en el extremo opuesto la estación No. 3 con una concentración de 18 mg/l. Las demandas más altas durante el año fueron: una en junio de 30 mg/l y la otra en noviembre de 33 mg/l, notándose también un marcado descenso durante julio (4 mg/l).

Para el tributario los meses de marzo y junio se presentan DQO de 30 mg/l, mientras que para mayo y julio su demanda es menor de 1 mg/l.

Considerando los resultados tanto para la DBO5 como para la DQO la mayor parte de la materia orgánica que se encuentra dentro del lago y en el tributario está en proceso de oxidación química (nitrificación) ya que la demanda química llega a ser más de 10 veces mayor que la demanda bioquímica.

El fósforo en forma de ortofosfatos (PO<sub>4</sub>) no presentó concentraciones detectables por la técnica de análisis en el caso del lago, sin embargo, para el tributario a pesar de que en la mayoría de los meses no se presentaron concentraciones detectables, para marzo hubo una concentración hasta de 0.07 mg/l.

Los análisis de fósforo total (Ptotal) muestran que se concentra en el centro del lago (estación 6) con un promedio de 0.02 mg/l, aunque prácticamente en los promedios mensuales su concentración fue menor de 0.01 mg/l.

Para Barranca Honda se detectó una mayor concentración durante el mes de febrero (0.16 mg/l).

## ..RESULTADOS..

Al igual que para el fósforo total, la mayor concentración de los sulfatos ( $SO_4$ ) se presentó en el centro del lago (estación 6) con un promedio de 2777 mg/l, con su mínima concentración para la estación No. 1 (2591 mg/l).

El comportamiento de los sulfatos durante el año de muestreo, indica niveles elevados durante julio con una concentración de 3245 mg/l, dándose el efecto contrario durante septiembre con 2289 mg/l.

Las concentraciones de sulfatos encontradas en Barranca Honda indican que transporta 3038 mg/l como concentración máxima para el mes de junio, mientras que para septiembre, al igual que en el lago, se presenta la menor concentración (770 mg/l), siendo el rango de variación por lo menos dos veces mayor que en el lago.

En el caso de la conductividad la estación de muestreo No. 2 presenta el promedio más elevado, siendo éste de 3125  $\mu$ nhos/cm, notándose a través del año 2 picos de concentración, uno durante el mes de mayo (3196  $\mu$ nhos/cm) y otro en septiembre (3186  $\mu$ nhos/cm).

Para Barranca Honda se presentan concentraciones seguidas máxima y mínimas de 3151  $\mu$ nhos/cm en junio y 1108  $\mu$ nhos/cm para julio, respectivamente.

Observando el comportamiento horizontal de la dureza, la estación No. 3, localizada frente al tune de excedencias, presentó el promedio más elevado con 1640 mg/l y la No. 1 su valor mínimo, siendo éste de 1558 mg/l.

Para el tributario se nota una diferencia entre las concentraciones mínima y máxima a lo largo del año muy cercana a los 1000 mg/l, mostrando un patrón de comportamiento muy irregular. Durante el mes de febrero se presenta su máxima concentración de 1755 mg/l y la mínima durante el mes de septiembre de 816 mg/l.

En el caso del lago, la dureza y la conductividad guardan una estrecha relación, que se puede notar en que su comportamiento a lo largo del año fue similar.

En cuanto a sólidos suspendidos fijos se presentó su concentración más alta en la estación No. 5 cercana al ejido de Tequesquitengo, con 14 mg/l y a lo largo del año, fue durante julio que en el lago se presentaron concentraciones hasta de 36 mg/l, siendo sobrepasada por la concentración transportada por el tributario (130 mg/l).

Los valores promedio de sólidos suspendidos volátiles (SSV) dentro del lago hacen resaltar a las estaciones 1, 4 y 5 como las que obtuvieron los niveles más altos, con 10 mg/l.

## ..RESULTADOS..

Observando el comportamiento de los SSV a lo largo del año, se presentaron picos de concentración durante junio y julio, con 21 y 29 mg/l, respectivamente.

En Barranca Honda los SSV mostraron el mayor descenso durante febrero con una concentración de 2 mg/l, seguida por el máximo pico del año (durante marzo) con 23 mg/l.

En el caso del nitrógeno orgánico se obtuvieron sus mayores y menores concentraciones en las estaciones 1 y 3, con promedios de 1 mg/l y 0.66 mg/l, respectivamente. Tanto para el tributario como para el lago las mayores concentraciones de Norg se presentan al finalizar el año.

El nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>) presentó algunas diferencias entre estaciones de muestreo en donde la 1 y 2 muestran altos niveles con 0.92 mg/l y 1.03 mg/l, respectivamente.

Es notorio que mientras para el lago durante los últimos meses del año se incrementa el NH<sub>3</sub>, para el tributario la mayor concentración fue de 1.68 mg/l durante el mes de agosto.

El comportamiento del nitrógeno amoniacal puede deberse a que como lo menciona Hutchinson (1975), su concentración aumenta en la superficie de los cuerpos de agua cuando se presenta el período de circulación.

Tanto para el nitrógeno en forma de nitratos como de nitritos, no se presentaron variaciones entre estaciones de muestreo, siendo sus concentraciones para el lago, menores de 0.001 mg/l y para el tributario, únicamente variaron las concentraciones de nitratos enmarcándose para marzo un pico de 0.939 mg/l.

### 4.2 Comportamiento de los análisis fisicoquímicos

En este rubro haremos resaltar con base en el cuadro (2), los parámetros que en su comportamiento representen un peligro para el desarrollo de la vida acuática y que de alguna manera puedan perjudicar y limitar los usos a que se destina el agua del lago de Tequesquitengo.

En el caso del oxígeno disuelto, Mc Neely *et al.*, (1979) proponen como concentración mínima 4 mg/l, siendo únicamente para el tributario durante el mes de agosto cuando se presentan concentraciones por debajo del límite (3.15 mg/l).

Es notorio que mientras el oxígeno requerido para la oxidación de materia orgánica por descomposición aerobia microbiana (DBOS) se mantiene dentro de los límites, el oxígeno requerido para la oxidación química (DQO) tanto en el lago como en el tributario se encuentra rebasando los límites, por 17 y 5 mg/l, respectivamente.

## ..RESULTADOS..

El fósforo total únicamente en el tributario llega a excederse durante febrero y marzo con concentraciones por encima de 0.1 mg/l, con promedio de 0.13 y 0.16 mg/l, respectivamente.

Para los sulfatos Mc Neely *et al.*, (op. cit.) propone una concentración de 250 mg/l límite para aguas destinadas a consumo humano, sobrepasándolo tanto en el lago como en el tributario por más de 5 veces.

En el caso de la conductividad únicamente durante febrero (2394  $\mu$ hos/cm) y junio (3151  $\mu$ hos/cm) para el tributario se sobrepasan los 2000  $\mu$ hos/cm propuesto como límite máximo.

Realizando un análisis de los resultados en cuanto a las distintas formas de nitrógeno cuantificadas, únicamente el amoniacal sobrepasa el límite para la protección de la vida acuática propuesto por Alabaster y Lloyd (Cuadro 1) tanto en el tributario como para el lago, llegando a ser más de 16 veces mayor a la concentración propuesta, siendo esta de 0.025 mg/l.

### 4.3 Análisis de Clorofila *a*

Los resultados de los análisis de clorofila por estaciones de muestreo y por mes se muestran en el cuadro (5); los cuales obtuvieron un promedio dentro del lago de 19.55 mg/m<sup>3</sup> con un rango de variación que va desde 1.0 mg/m<sup>3</sup> para la estación No. 2 durante el mes de agosto, hasta 50.5 mg/m<sup>3</sup> para septiembre en la estación No. 5.

En su distribución por estaciones de muestreo, se observa su mayor desarrollo en las estaciones 3 y 5, con promedios de 21.3 y 22.6 mg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

A lo largo del año, su mayor concentración se presentó durante el mes de mayo, con un promedio de 30.4 mg/m<sup>3</sup>.

Considerando estos resultados, y con base en la clasificación trófica propuesta por Vollenweider (Cuadro, 2) el lago se puede considerar eutrófico.

Utilizando los resultados de las concentraciones media y máxima de clorofila *a*, se calcularon las profundidades media y mínima de la zona eufótica, según las ecuaciones propuestas por Salas y Limón (1986);

$$Z_{eu} = \frac{\ln 100}{\epsilon}$$

en donde

$Z_{eu}$  = profundidad eufótica

$\epsilon$  = coeficiente de extinción vertical de luz del lago m<sup>-1</sup>

Cuadro 5. Resultados de las concentraciones de clorofila  $a$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para el lago de Toquesquitongo y su tributario.

Estación	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	PRON.	DM
FEB	13.00	10.10	6.00	---	3.00	11.20	8.00	---
MAR	17.20	14.20	43.40	1.90	39.30	27.30	23.90	34.40
ABR	14.60	24.70	48.60	16.50	29.90	34.10	28.10	15.30
MAY	31.00	42.30	29.90	31.10	21.30	26.20	30.40	19.00
JUN	18.70	21.70	18.00	17.60	32.90	15.00	20.70	24.00
JUL	19.50	16.00	9.00	7.20	2.30	5.40	10.00	23.20
AUG	---	17.60	21.00	11.60	16.00	18.70	17.10	17.60
AGO	19.10	1.00	19.10	22.40	21.30	5.70	14.00	12.60
SEP	28.40	6.20	13.10	11.20	50.50	24.30	22.30	7.90
SEP	32.20	17.90	15.00	34.00	3.40	34.30	23.30	6.40
OCT	7.30	13.90	10.00	12.00	19.30	25.50	14.70	10.10
NOV	14.60	24.70	22.50	14.00	30.70	1.00	18.90	37.40
PRON.	19.75	17.60	21.30	16.45	22.60	19.50	19.95	19.00

..RESULTADOS..

Cálculo de  $\epsilon$

$$\epsilon = 0.3 \text{ m}^{-1} - 0.02 (Cl_a \text{ media})$$

$$\epsilon = 0.3 \text{ m}^{-1} + 0.02 (Cl_a \text{ máxima})$$

con  $Cl_a \text{ media} = 19.55 \text{ mg/m}^3$  y  $Cl_a \text{ máxima} = 50.5 \text{ mg/m}^3$

-Profundidad eufótica media

$$\epsilon = 0.3 \text{ m}^{-1} + 0.02 (19.55) \text{ m}^{-1} = 0.69 \text{ m}^{-1}$$

$$Z_{eu} = \frac{\ln 100}{0.69/\text{m}} = 6.67 \text{ m}$$

-Profundidad eufótica mínima

$$\epsilon = 0.3 \text{ m}^{-1} + 0.02 (50.5) \text{ m}^{-1} = 1.31 \text{ m}^{-1}$$

$$Z_{eu} = \frac{\ln 100}{1.31/\text{m}} = 3.52 \text{ m}$$

Comparando a la profundidad media del epilimnion (12 m) con la profundidad eufótica mínima, tenemos que

$$\frac{3.52 \text{ m}}{12 \text{ m}} = 29 \%$$

Con estos datos podemos asumir que la luz juega un papel importante como limitante para el desarrollo de la productividad primaria, ya que de  $82 \times 10^6 \text{ m}^3$  que representan al epilimnion en promedio solo fotosintetizan el 56 % llegando a reducirse hasta el 29 %.

..RESULTADOS..

#### 4.4 Análisis bacteriológicos

Es importante determinar si el lago de Tequesquitengo es apto para que sus aguas se destinen a usos recreativo y doméstico, como es el caso, por lo que es estrictamente necesario conocer su calidad bacteriológica e identificar si hay contaminación y su procedencia.

La ausencia principalmente de Coliformes totales (CT), Coliformes fecales (CF) y *Streptococcus fecales* (EF) mostraría la buena calidad del agua, puesto que se encuentra libre de organismos productores de enfermedades.

En este rubro, los resultados se muestran en el cuadro (6), observando promedios anuales en el lago para CF, CT y EF de 38.5, 53.0 y 6.0 NMP/100 ml, respectivamente.

En su distribución a lo largo del año, sus mayores densidades se presentaron durante el mes de marzo. En cuanto a su comportamiento espacial, fue en el centro del lago (estación 6) en donde se dan las mayores densidades, como se muestra a continuación:

TIPO	COLIFORMES		ESTREPTOCOCOS
	TOTALES NMP/100ml	FECALIS NMP/100ml	FECALIS NMP/100ml
ESTACION			
1	78.6	67.0	<3.0
2	28.4	24.0	4.1
3	34.6	40.6	<3.0
4	108.0	173.0	4.1
5	10.0	10.0	<3.0
6	283.0	228.0	25.3

En el caso del tributario, sus promedios para los tres grupos de bacterias evaluados, se encuentran muy por encima de los presentados por el lago, siendo estos; CT de 17 900 NMP/100 ml, CF de 10 750 NMP/100 ml y EF de 1 531 NMP/100 ml, para los dos primeros tipos su mayor densidad se presentó en julio, mientras que para *Streptococcus fecales* fue en los meses de septiembre y octubre.

Mc Neely et al., (op. cit.) proponen niveles de CT, CF y EF permitidos para la protección de la vida acuática:

COLIFORMES	COLIFORMES	ESTREPTOCOCOS
TOTALES NMP/100 ml	FECALIS NMP/100 ml	FECALIS NMP/100 ml
100	10	1

Cuadro 6. Promedios mensuales de los análisis bacteriológicos (NMP/ 100 ml).

TIPO	LAGO			TRIBUTARIO		
	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES	ESTREPTOCOCOS FECALES	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES	ESTREPTOCOCOS FECALES
MES						
FEB	< 3.0	< 3.0	< 3.0	23 000.0	9 000.0	900.0
MAR	230.2	190.2	44.5	1 100.0	1 100.0	240.0
ABR	208.5	94.3	8.2	1 100.0	1 100.0	460.0
MAY	20.7	18.5	6.8	2 400.0	2 400.0	2 400.0
JUN						
JUL	89.8	74.5	< 3.0	14 200.0	9 300.0	377.0
JUL	7.6	4.0	< 3.0	81 000.0	49 700.0	2 600.0
AGO	< 3.0	< 3.0	< 3.0	12 500.0	< 3.0	< 3.0
SEP	3.6	< 3.0	< 3.0	39 000.0	12 500.0	596.0
SEP	3.0	< 3.0	< 3.0	< 3.0	11 200.0	3 170.0
OCT	3.3	< 3.0	< 3.0	4 700.0	11 200.0	3 870.0
PROM.	56.70	38.20	6.0	17 900.0	10 750.0	1 531.3

Cuadro 6. Promedios mensuales de los análisis bacteriológicos (NMP/ 100 ml).

TIPO	LAGO			TRIBUTARIO		
	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES	ESTREPTOCOCOS FECALES	COLIFORMES TOTALES	COLIFORMES FECALES	ESTREPTOCOCOS FECALES
MES						
FEB	< 3.0	< 3.0	< 3.0	23 000.0	9 000.0	900.0
MAR	230.2	190.2	44.5	1 100.0	1 100.0	240.0
ABR	208.5	94.3	8.2	1 100.0	1 100.0	460.0
MAY	20.7	18.5	6.8	2 400.0	2 400.0	2 400.0
JUN	-----	-----	-----	-----	-----	-----
JUL	89.8	74.5	< 3.0	14 200.0	9 300.0	377.0
JUL	7.6	4.0	< 3.0	81 000.0	49 700.0	2 600.0
AGO	< 3.0	< 3.0	< 3.0	12 500.0	< 3.0	< 3.0
SEP	3.6	< 3.0	< 3.0	39 000.0	12 500.0	596.0
SEP	3.0	< 3.0	< 3.0	< 3.0	11 200.0	3 970.0
OCT	3.3	< 3.0	< 3.0	4 700.0	11 200.0	3 870.0
PROM.	56.70	38.20	6.0	17 900.0	10 750.0	1 531.3

## ..RESULTADOS..

Realizando un análisis de los resultados bacteriológicos tanto en el lago como en el tributario, en el caso de coliformes totales, las estaciones 4 y 6, además del tributario sobrepasan estos niveles.

En el caso de los coliformes fecales prácticamente tanto para el lago como para el tributario, sobrepasaron los límites permitidos, exceptuando a la estación de muestreo No. 5.

Los estreptococos fecales fueron menos abundantes que los tipos anteriores y aunque la técnica de análisis en este caso no fue muy precisa, se puede asumir que en las estaciones 2, 4 y 6, además del tributario se concentran este tipo de bacterias.

Se ha reportado que si la relación CF/EF da como resultado 1.0 indica que la contaminación bacteriológica es debida únicamente a animales domésticos, pero si su valor excede a 4.0 la contaminación procede de seres humanos (SARH, 1981).

En el presente estudio la relación fue de 6.4, por lo que se confirma que existen descargas de aguas residuales del poblado debido a la ausencia de drenaje. Sin embargo, tales resultados pueden considerarse solo con la salvedad de que debieron haberse realizado por corrida doble las pruebas para cada muestra.

### 4.5 Calidad del agua

En el cuadro (7) se muestran los resultados de los tres estudios realizados en el lago de Tequesquitengo desde 1976.

La dinámica que se ha presentado en el lago a través del tiempo marca aumentos en OD, pH, SD<sub>4</sub>, conductividad, dureza, NH<sub>3</sub> y Cl<sub>2</sub>, mismos que indican un deterioro de la calidad del agua excepto por las concentraciones de oxígeno disuelto.

En particular la concentración de clorofila a relacionada con el cuadro 2, para 1976 indicaba que el lago era mesotrófico y en el presente estudio lo marca como eutrófico.

Resulta de interés prioritario hacer notar que mientras para 1976 existía fósforo en estado libre, a tal grado que pudiera enmarcar al lago como eutrófico, actualmente no exista, pudiendo deberse a que la demanda se ha incrementado o la velocidad de precipitación o asimilación por el sistema es mayor.

En el resto de los parámetros no se presentaron variaciones considerables.

Cuadro 7. Comparación de los análisis fisicoquímicos y biológicos de los estudios más recientes realizados en el lago de Tequesquitengo, Mor.

FECHA PARAMETRO	1976	1987	ACTUAL
OD mg/l	6-7.4	7	8.70
pH	7.90	----	8.20
DBO5 mg/l	0.6-3.3	0.6-3.3	1.74
DQO mg/l	18-23	18-23	21.65
PO4 mg/l	----	0.01-0.62	<0.01
Ptotal mg/l	0.04-0.13	----	<0.01
SO4 mg/l	2012	1798	2697
CONDUCT. $\mu$ mhos/cm	2799	----	3081
DUREIA CaCO3 mg/l	628-701	644	1594
Norg mg/l	0.61-2.89	0.05-1.3	.78
NH3 mg/l	<0.05	<0.05	.62
NO3 mg/l	0.38-7.6	0.01-1.95	<0.001
COLIF. TOTALES NMP/100 ml	25-335	----	53
COLIF. FECALES NMP/100 ml	19-281	----	38.50
ESTREPTO. FECALES NMP	7-32	----	6.02
Cl <sub>2</sub> mg/l	5.62 $\times 10^{-3}$	----	.02
NIVEL TROPICO	MESO-EUTROPICO	----	EUTROPICO

## ..RESULTADOS..

### 4.6 Balance hidráulico

Como se mencionó en la metodología, para llevar a cabo el balance hidráulico se consideraron los siguientes aportes de agua al lago:

$$\begin{aligned}A_r &= 1.35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} \\P_r &= 7.19 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} \\G_a &= 1.45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} \\E_{m\#} &= 1.215 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}\end{aligned}$$

# Su cálculo se muestra en el anexo.

El ingreso total de agua al lago fue según la ecuación (1)

$$C_I = 11.205 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

La cantidad de agua que egresa del lago fue únicamente por evaporación:

$$Q_e = 16.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

Basándose en los datos de ingresos y egresos de agua al lago en el año, según la ecuación (2) sería:

$$B_h = - 4.995 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

Debido a la ausencia de cambios en el volumen del lago, se puede asumir que el déficit que se presenta en el balance hidráulico es agua aportada por manantiales además de escurrimientos de la zona de riego adyacente al lago, no cuantificados.

### 4.7 Clasificación Trófica del lago

En este rubro se consideraron tanto los Índices de Estado Trófico propuestos por Carlson (1977) como el modelo simplificado para lagos cálidos (Castagnino, 1982; Salas, 1983; Salas y Limón, 1985).

#### 4.7.1 Aplicación de Índices de estado trófico

Considerando a la transparencia del disco Secchi (2.2 m) y substituyéndolo en la ecuación (3);

$$IET (DS) = 50$$

En el caso de la ecuación (4) que fue propuesta para ubicar a los cuerpos de agua en algún nivel del proceso de eutroficación con base en las concentraciones de clorofila  $a$  (19.6 mg/m<sup>3</sup>) se tiene que:

$$IET (Cl_2) = 59,74$$

Por último, considerando la concentración de fósforo total y con la particularidad de que únicamente se presentaron concentraciones para los meses de abril (10 mg/m<sup>3</sup>) y julio (20 mg/m<sup>3</sup>) se llevaron a cabo las dos sustituciones en la ecuación (5), se tiene:

$$IET (P_{total})_{abr} = 37,4$$

$$IET (P_{total})_{jul} = 47,4$$

Con base en la escala propuesta por Carlson (1977), en donde el extremo inferior representa al estado oligotrófico y el superior al eutrófico, en niveles que van de 0 a 100, apoyándonos en la transparencia del disco Secchi, el lago se encontraría a la mitad de la escala; considerando a la clorofila *a* está tendiente al estado eutrófico y por la concentración de fósforo total el lago se encuentra por debajo de la mitad de la escala.

#### 4.7.2 Aplicación del modelo simplificado

Para la aplicación del modelo simplificado fue necesario observar cual era el nutriente limitante del crecimiento para el lago Tequesquitengo, encontrándose que mientras el nitrógeno se presentaba tanto en forma orgánica (820 mg/m<sup>3</sup>) como amoniacal (648 mg/m<sup>3</sup>), el fósforo no sobrepasa los 10 mg/m<sup>3</sup> enmarcándolo como elemento limitante del crecimiento.

Considerando tales resultados, para la aplicación del modelo simplificado se empleó el fósforo aportado tanto por escurrimiento de la microcuenca (carga superficial) como por el tributario Barranca Honda.

#### Cálculo de la carga superficial de fósforo

Para calcular la aportación total de fósforo por la microcuenca, se consideraron las excretas de seres vivos y los usos a que se destina el suelo.

##### a) Aportación por seres vivos (As)

El cálculo del aporte de fósforo por seres vivos se llevó a cabo empleando las cargas unitarias propuestas por Castagnino (op. cit.), quedando de la siguiente manera;

..RESULTADOS..

TIPO	No. de individuos.	Carga unitaria de P /año	Producción de P/año
Bovinos	425	7,000.0 gr	2,975.0 kg
Caprinos *	400	3,000.0 gr	1,200.0 kg
Porcinos	100	3,000.0 gr	300.0 kg
Equinos	15	4,500.0 gr	67.0 kg
Aves	200	300.0 gr	60.0 kg
Humanos +	5,000	1,000.0 gr	<u>5,000.0 kg</u>

TOTAL As = 9,602.5 kg

\* Para la carga unitaria de fósforo fue considerada la de ganado lanar, asumiendo que también existen perros, de los cuales no fue evaluado su aporte.

+ Considerando la falta de alcantarillado.

Para evaluar la fracción de fósforo aportada al lago por seres vivos se asume que es en la misma proporción que el volumen de escurrimiento, esto es, el volumen de agua que precipita en un año es de 0.8989 m y que lo que escurre es de únicamente 0.192625 m (anexo) estando en una proporción de 21.4289 % del total, por lo que 2,057.71 Kg de AS corresponden al mismo porcentaje de Ptotal.

**b) Aporte por usos del suelo (Au)**

Para considerar dentro de la carga superficial de fósforo el aporte por usos del suelo se tomaron en cuenta las áreas agrícolas y urbanas que se encuentran dentro de la microcuenca (6.31 X 10 exp 6 m<sup>2</sup>), además de los coeficientes de aportación propuestos por Castagnino (1982).

Para este cálculo se tienen los siguientes datos;

USO DEL SUELO	m <sup>2</sup>	Coef. de P.	Fósforo en Kg/año
Area agrícola	4,410,000.0	0.05	220,500.0
Area urbana	900,000.0	0.1	<u>90,000.0</u>
TOTAL Au =			310,500.0 Kg/año

Aplicando la ecuación (7) tenemos que

At = 312,557.7 Kg/año

..RESULTADOS..

c) Aporte de fósforo por el tributario

En este rubro se considera a la concentración promedio de fósforo aportada por el tributario (0.05 g / m<sup>3</sup>) por el volumen que ingresa al lago en un año, quedando 72.5 Kg/año.

Aplicando estos datos a la ecuación (8) tenemos que la carga por exportación total de fósforo es:

$$C_e(p) = 312, 630, 200.0 \text{ gr/año}$$

en donde el aporte de fósforo por el tributario representa únicamente el 0.023 %.

Utilizando estos datos y aplicando la ecuación (9), la carga superficial de fósforo considerando una  $S = 8.0 \times 10^6 \text{ m}^2$  es:

$$L(p) = 39,079 \text{ gr/m}^2$$

- Tiempo de retención hidráulica

Considerando el volumen de agua que egresa del lago y aplicando la ecuación (10);

$$T_w = 7.9 \text{ años}$$

1

y empleando la ecuación (11) basándose en el volumen aportado al lago;

$$T_w = 11.4 \text{ años}$$

2

- Profundidad media

La profundidad media del lago se obtuvo considerando un volumen de  $128 \times 10^6 \text{ m}^3$  y una superficie de  $8.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ ;

$$Z = 16 \text{ m}$$

Compilando todos los datos para la aplicación del modelo simplificado (6) y tomando en cuenta los dos resultados de tiempo de residencia hidráulica, con una  $L(p) = 39,079.0 \text{ mg/m}^2$  y para  $T_w$  ;

1

$$P_{\lambda} = 4 \text{ 254.06 mg P / m}^3$$

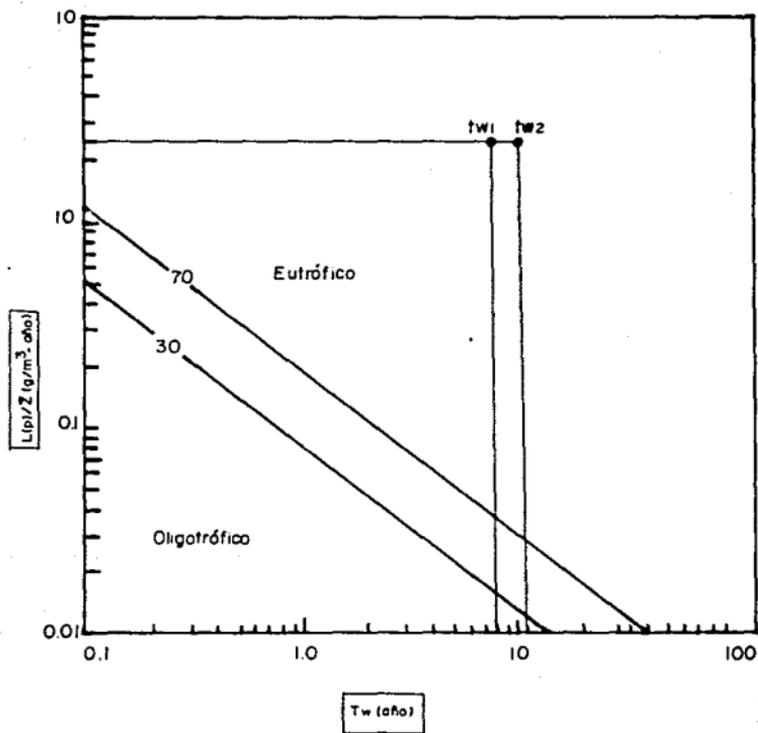
..RESULTADOS..

para  $T_w$  :  
2

$$P_a = 5\,704.6 \text{ mg P / m}^3$$

Observando las concentraciones estimada (mediante el análisis de las concentraciones en el lago) y esperada (mediante la ecuación propuesta por el CEPIS) de fósforo en el lago, se nota que difieren totalmente, ya que se obtuvieron valores de < 0.01 mg/l (estimada) y 4.25 mg/l ó 5.7 mg/l (esperadas).

Lámina 12. Clasificación trófica del lago de Tequesquitengo, Mor con  $L(p)/Z = 2.44 \text{ g/m}^3\text{año}$



## 5 DISCUSION

Es evidente con los resultados que se presentan, que el lago de Tequesquitengo sirve como reservorio de la materia tanto orgánica como inorgánica que se aporta por escurrimiento de la microcuenca, el tributario Barranca Honda y aguas residuales del poblado Tequesquitengo.

En el caso del balance hidráulico todas las fuentes de aporte de agua cuantificadas no llegan a equilibrar a lo que se pierde por evaporación ( $16.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ).

Sin embargo, al no variar el nivel del agua y siendo el volumen de las aportaciones de  $11.204 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  podemos asumir que  $4.995 \times 10^6 \text{ m}^3$  de agua son aportados por manantiales subacuáticos y por las derivaciones de la SARH para la zona de riego con aguas provenientes de las Estacas.

De los  $128 \times 10^6 \text{ m}^3$  que representan el volumen total del lago, unicamente  $82 \times 10^6 \text{ m}^3$  representan al epilimnion, el cual solo fotosintetiza entre un 29% y 56%.

Por otra parte, observando que existe la formación de termoclina, podría pensarse que en sentido vertical se presentan distintas condiciones de equilibrio termodinámico.

Según Margalef (1983) esto lleva a considerar un gradiente redox de las sustancias en el agua, en donde el epilimnion concentra compuestos en forma oxidada y el hipolimnion en forma reducida; sin embargo, tal distribución no se observó claramente debido a la ausencia de compuestos como  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{PO}_4$  en solución, aunque en el caso de los  $\text{SO}_4$ , su concentración fue más elevada en el fondo, apoyando fuertemente la teoría de la existencia de manantiales sulfurosos subacuáticos, puesto que el azufre no debiera encontrarse en forma oxidada.

Si se observan los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) que son más o menos homogéneos entre las muestras MS y MP, podemos asumir que el requerimiento para las primeras es surtido por las altas concentraciones de Oxígeno Disuelto (OD), pero para las segundas, en donde la mayor parte del año el fondo es anóxico, la DQO es satisfecha probablemente como lo menciona Hutchinson (1975) por la reducción del ion sulfato a sulfuro de hidrógeno bajo condiciones anaerobias, fungiendo como donador de OD cuando como en este caso no están presentes los nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y el oxígeno para reacciones de oxidación.

Este posible comportamiento de los sulfatos es apoyado porque durante la mixis el lago despierta olor a sulfuro de hidrógeno (Valle, 1989).

El comportamiento de la DBO5 y la DQO indican que la materia orgánica que penetra al lago se encuentra en proceso de oxidación química y por lo tanto el nitrógeno en proceso de nitrificación.

## ..DISCUSION..

Sin embargo, el nitrógeno no es uno de los elementos que incrementa la DQO puesto que se nota que la amonificación es el proceso dominante.

Por otra parte si se observan los resultados de los perfiles de oxígeno disuelto y temperatura, podemos decir que al mismo tiempo que se va perdiendo la termoclina sucede lo mismo con la oxiclina, por lo que se asume que en el lapso de tiempo que comprende la época de invierno, existe tanto intercambio de temperatura como de oxígeno disuelto entre el hipolimnion y el epilimnion.

Cuando esto ocurre, los lodos bentales son arrastrados hacia la superficie produciendo la resuspensión de materia orgánica en descomposición que abate el oxígeno disuelto; efectos que junto con el comportamiento de los sulfatos producen mortalidad en la fauna acuática (Owens y Wood, 1968; Carreón, 1987; Sámano, 1989).

Sin embargo, si se atiende únicamente a la concentración de OD en la superficie, éste le confiere al lago características de excelente calidad para la vida acuática.

Observando el déficit de oxígeno hipolimnético, éste se acentúa a partir del mes de junio, lo cual puede deberse al ingreso por precipitación y escurrimiento de materia orgánica en suspensión o en solución susceptible de ser oxidada.

Los resultados de la DBO5 muestran que su demanda es similar en todo el lago (epilimnion e hipolimnion), lo cual indica que la materia orgánica al entrar al sistema se difunde homogéneamente.

En cuanto a la calidad del agua aportada por el tributario se encontró que no tiene gran influencia en las condiciones del lago, debido a:

- 1.- El agua que aporta el tributario tiene temperatura menor que la del lago, por lo que su densidad ayuda a que su distribución sea por debajo de la superficie, al igual que todas las sustancias que acarrea.
- 2.- En el caso del fósforo que penetra por este medio, se encontró que representa únicamente el 0.0232 % del total.
- 3.- El volumen de agua aportado por éste, es apenas de  $1.45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  que representan el 12.94 % de las aportaciones.

Los diversos estudios realizados en el lago (Carreón, 1987; SRH, 1976) comparados con el presente, muestran que ha habido incremento en algunos de los parámetros de calidad del agua, de éstos, el aumento más importante ha sido el de la concentración

de clorofila *a* como indicador, que mediante la aplicación de los IET de Carlson (1977) muestra que de un estado mesotrófico para 1976, el lago a pasado a ser eutrófico.

En cuanto a los análisis bacteriológicos, la simple presencia de coliformes fecales y totales, además de estreptococos fecales es evidencia de la no potabilidad del agua (SARH, 1983), sin embargo, aunque éste no sea uno de los usos del lago, se ven alteradas las condiciones que se desearían para emplearlo como un centro turístico.

En el caso de los coliformes fecales, se sabe que tienen un periodo de vida más corto que el de otros coliformes, por lo que los encontraríamos en altas densidades en el tributario durante todo el año, indica que la contaminación es constante (SARH, 1983).

La simple presencia de estreptococos fecales ya indica una contaminación peligrosa, dándose el mayor aporte de éstos por medio del tributario.

Dentro del lago se encontraron los máximos niveles de coliformes totales y fecales así como de estreptococos fecales, en las estaciones 4 y 5, con lo que podemos reafirmar que además del tributario, el poblado de Tequesquitengo desecha aguas residuales al lago.

Los resultados muestran que el fósforo y el nitrógeno son rápidamente asimilados tanto por los organismos como por el sistema.

Como se mencionó en los resultados, no se encuentra fósforo en forma de ortofosfatos ni tampoco fósforo total, aunque al año se aporten 312 630.2 kg, indicio de que factores como la dureza influyen en su precipitación (Hutchinson, 1975). Observando al nitrógeno, que solo se presenta en su forma amoniacal, podría pensarse que también la dureza influye en que no se encuentre en forma de NO<sub>3</sub> ni NO<sub>2</sub>, expulsándolo así hacia la atmósfera, comportándose como compuestos dentro de un "Sistema bajo Tensión" (Margalef, 1987).

En cuanto al nitrógeno en su forma amoniacal, se observó que se incrementa con la llegada del invierno, lo cual puede deberse a que durante el verano aumenta la amonificación, acumulándose paulatinamente hasta la estación invernal, resultado acorde con lo que expone Hutchinson, (1975) para lagos templados.

En base a la concentración de fósforo calculada mediante el modelo propuesto por Vollenweider (Castagnino, 1982) y a la cantidad real encontrada en las aguas del lago, podemos asumir que la mayoría de este se precipita, sin presentar en ningún momento resuspensión a partir de los sedimentos.

..DISCUSION..

Evans y Rigler (1980) al igual que otros investigadores, consideraron que la tasa de sedimentación de fósforo estaba en función de la profundidad del cuerpo de agua, notándose su acumulación conforme se incrementa la profundidad. Sin embargo, aunque en el presente estudio no se hayan hecho pruebas sobre la velocidad de sedimentación, se puede inferir que la profundidad no es el único factor que influencia a la sedimentación, ya que ni en la superficie ni en el fondo se encuentran concentraciones detectables por las técnicas de análisis empleadas, aun y cuando las concentraciones aportadas al lago son muy altas.

Considerando el modelo simplificado propuesto por El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), el lago se clasifica como eutrófico, sin embargo, las concentraciones esperadas de fósforo no coinciden con los resultados de los análisis realizados en este estudio, por lo que podemos decir, con base en toda la argumentación anterior, que el lago de Tequequitengo se sale de los patrones establecidos para la evaluación de lagos cálidos, debiéndose a:

A) la ausencia de fósforo en solución,

B) exceso de clorofila  $a$  y;

C) ausencia de un efluente.

Del volumen total de agua que llega al lago en un año, la precipitación representa el 64.17 %, el agua residual el 12.05 %, el tributario el 12.94 % y el escurrimiento el 10.84 %.

Sin embargo, aunque el escurrimiento representa poco más de la décima parte del volumen que ingresa al lago en un año, es la principal fuente de aporte de fósforo hacia el lago, transportando el 99.98 % del total.

De los 312, 557.7 kg/año transportados por escurrimiento, 221, 571.4 kg representan las contribuciones entre la población humana y el uso agrícola de la tierra.

## 6 CONCLUSIONES

El lago de Tequesquitengo se clasifica como cálido marginal monomictico con la formación de termoclina y oxiclina durante todo el año excepto en invierno.

El tributario Barranca Honda influye principalmente en la calidad bacteriológica del lago, aun cuando su volumen y concentración de sustancias químicas son amortiguadas por el sistema a través de dilución.

Para el lago de Tequesquitengo, la luz es el factor limitante para el desarrollo de la productividad primaria, razón por la que el epilimnion solo fotosintetiza entre el 29% y 56%.

La Demanda Química de Oxígeno en el fondo del lago es abastecida por los sulfatos provenientes de los manantiales sulfurosos subacuáticos.

Se confirma la influencia antropogénica mencionada por Carreón (1987) debido al vertido excesivo de aguas residuales al lago, además de su mala calidad bacteriológica, siendo ésta debida a contaminación humana.

Para el lago las principales fuentes de aporte de fósforo están representadas por el uso del suelo (urbano y agrícola) y por seres vivos aunque no se hizo la consideración de aporte por organismos acuáticos.

En cuanto a la aplicación de los IET a la concentración de clorofila, el lago ha pasado en tan solo 10 años de un estado mesotrófico a eutrófico.

La concentración de carbonatos y bicarbonatos particularmente para el lago de Tequesquitengo ha servido como amortiguador del nivel trófico del lago.

Debido a que el lago no se comporta como un lago cálido típico a los considerados para el desarrollo del modelo simplificado de CEPIS, no podemos confiar en el estado trófico que refleja su aplicación, aunque mediante el empleo de los índices de estado trófico propuestos por Carlson (1977) en particular, el que involucra a las concentraciones de clorofila, expone el mismo estado eutrófico.

## 7 RECOMENDACIONES

- 1.- *Trasladar al ganado fuera de la microcuenca.*
- 2.- *Reforestación de la microcuenca y alrededor de los terrenos de cultivo.*
- 3.- *Regeneración de la fauna acuática nativa.*
- 5.- *Dar prioridad al sistema drenaje de la microcuenca o en su defecto un mejor manejo de sus fosas sépticas o letrinas.*
- 6.- *Modificar el modelo propuesto por CEPIS contemplando:*
  - A los lagos cálidos marginales sin intercambio de nutrientes.*
  - A los procesos que influyen incrementando la  $K_d$  como las diferencias de temperatura del agua entre el lago y fuentes puntuales y no puntuales.*
  - A la ausencia de drenaje en poblaciones aledañas a los cuerpos de agua en donde se cuente con letrinas y fosas sépticas para deshacerse de sus aguas residuales, proponiendo coeficientes o tasas de aportación de nutrientes.*
  - Considerar en el Balance de nutrientes tiempos de retención infinitos como en este caso, sobre todo referidos a su exportación.*

..BIBLIOGRAFIA..

B BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWWA y WPCF. (1980). Standard Methods, For the Examination of Water and Wastewater. 15 Ed. Washington, DC. 1134 p.
- Bachmann, W. R. (1980, October). "The Role of Agricultural Sediments and Chemicals in Eutrophication". J. Wat. Pollut. Cont. Fed. 52 (10). 2425-2431.
- Carlson, R.E. (1977, March). "A trophic state index for Lakes". Limnol. and Oceanogr. 22 (2). 361-369.
- Carmak, E.C., Wiegand, R.C., Daley, R.J., Gray, C.B.J., Jasper, S. y Pharo C.H. (1986). Mechanisms influencing the circulation and distribution of water mass in a medium residence-time lake. Limnol. and Oceanogr. 31 (2) 249-265.
- Carreón, B. R. (1987). Modelo de autopurificación para el lago de Tequesquitengo y determinación de eficiencia y remoción. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, IMTA, Tesis de Lic. Químico Industrial, Cuernavaca, Morelos.
- Castagnino, W.A. (1982). Investigación de modelos simplificados de eutroficación en lagos tropicales. Informe Técnico. OMS/OPS/CEPIS. Lima, Perú. 27 p.
- Dillon, P. J. (1975). The Application of the Phosphorus-Loading Concept to Eutrophication Research. Scientific Series No. 46, Canada Center for Inland Waters, Burlington, Ontario, 1-14, p.
- Dobson, H.F.H., Gilbertson, M. y Sly, P.G. (1974). A Summary and Comparison of Nutrients and Related Water Quality in Lakes Erie, Ontario, Huron and Superior. J. Fish. Res. Board Can. 31 (5). 731-738.
- Edmondson, W.T., G.C. Anderson y D.R. Peterson. (1958). Artificial Eutrophication of Lake Washington. Limnol. and Oceanogr. 1 (1). 47-53.
- Evans, R. D. and F. H. Rigler. (1980). Measurement of whole lake sediment accumulation and phosphorus retention using lead-210 dating. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37: 817-822.
- Forsberg, C. (1981). Strategies and measures to protect waters from eutrophication in Scandinavia. Wat. Qual. Bull. 6 (3). Part 2.
- García C. J. (1985). Utilización del plancton como herramienta para el conocimiento de la calidad del agua en la cuenca del Alto Amacuzac, Edo. de Morelos. Tesis de Biol. UNAM, México, D.F.

..BIBLIOGRAFIA..

- Huerto D.R.I. (1988). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la calidad del agua del Río Cuautla, Edo. de Morelos. Tesis de Bidj. UNAM, México D.F.
- Hutchinson, G.E. (1975). The Nitrogen Cycle in Lake Waters. John Wiley and Sons (Ed.) A Treatise on Limnology. Geography and Physics of Lake. (1): Part. 1. 836- 877. New York.
- IMTA-SARH (1982). Manual de Técnicas de Muestreo de Aguas y Determinaciones en el Campo. IMTA-SARH, (4a. Ed.) México, 75 p.
- Jones, R. A. y G. F. Lee. (1986, April). Eutrophication modeling for water quality Management; and update of the Vollenweider-DECD model. Wat. Qual. Bull. 11 (2).
- Limón, G.J. (1989). Comunicación Personal. Presidencia Municipal de Jojutla. SARH, edo. de Morelos.
- Limón, M.J. G. (1982). Clasificación Trófica. En: SARH, "Manual de Limnología". Dir. Gral. de Usos del Agua y Prev. de la Cont. SARH, Guadalajara, Jal.
- Limón, M.J. G. (1986). Utilidad del modelo en la planeación de embalses futuros, el caso de la presa La Zurda, Memoria del Tercer Encuentro del Proyecto de Eutroficación en Lagos Cálidos. Guadalajara, Jal. México. 25 al 29 de noviembre de 1985; Versión Preliminar. OPS/CEPIS, SARH/CPNH/SARH, México.
- Lorenzen, G. J. (1967). "Determination of Chlorophyll and Pheo-Pigments: Spectrophotometric Equations". Limnol. and Oceanogr. 12. 343-346.
- Margalef, R. (1982). Biología de los Embalses. Investigación y Ciencia No. 11. 51-62.
- Margalef, R. (1983). Limnología. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, España.
- Margalef, R. (1987). "Los sistemas bajo tensión". En: ENEP - Iztacala. "Memoria del V curso y Simposio Internacional Sobre Biología de la Contaminación". AMICA, A. C. México D.F. 99- 105.
- Mason F.C. (1984). Contaminación. En: Biología de la Contaminación del Agua Dulce. Alhambra. España, Madrid, Cap. 2.
- McNeely, R. N., V. P. Neimanis y L. Dwyer. (1979). Water Quality Sourcebook. A Guide to Water Quality Parameters. Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Ottawa, Canada. 87 p.

- Olvera, V.V. y Diaz, Z.G. (1986). Diagnóstico del Estado Tráfico del Lago de Taquesquitengo, Morelos. Informe Técnico. CIECCA, IMTA, SARH, México, 32 p.
- Olvera, V.V. (1987). Metodología para evaluar la eutroficación en lagos cálidos. IMTA, SARH.
- Olvera, V.V. (1988). "Estudio de la eutroficación en la Presa Valle de Bravo, Mex. Memoria, VI Congreso Nacional, Saneamiento Ambiental, El Gran Reto, Queretaro, Gro., Agosto 10 al 13 de 1988, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C. México.
- Olvera, V.V. (1990). Estudio de la eutroficación del embalse Valle de Bravo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. UNAM, México, D.F.
- Owens, M. y Wood, G. (1968). Some Aspects of Eutrophication of Water. Water Research, Pergamon Press, 2, 151-159.
- Piña, P. A. (1975, Julio). La actividad agrícola como fuente de contaminación de aguas. División de Estudios Superiores de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Reckhow, K. H. y J. T. Simpson. (1980). A procedure using modeling and error analysis for the prediction of lake phosphorus concentration from land use information. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 37, 1439-1448.
- Reynoso, A. L. (1984). Factores que influyen en la formación de "Blooms" Algales. Informe Técnico, CIECCA, SARH.
- Rodríguez, M. (1864). Síntesis del documento original, "Tlaquiltenango", abril 15. Localizado con el Arquitecto Limón en el municipio de Jojutla de Juárez.
- Salas, H.J. (1983). Resumen del Segundo Encuentro del Proyecto de Eutroficación en Lagos Cálidos. Brasilia, Brasil. OPS/CEPIS, 1983.
- Salas, H.J. y Limón, J.G. (1986). Memorias del Tercer Encuentro del Proyecto Regional, Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales. Guadalajara, Jal. Méx., 25 al 29 de noviembre de 1985. Versión preliminar para revisión, OPS/CEPIS: SARH/CPNH.
- Salas, H.J. y Martino, P. (1988). Memoria del IV Encuentro del Proyecto Regional, "Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales". OMS/OPS. San Juan de Puerto Rico, CEPIS-JCA.

..BIBLIOGRAFIA..

- Samano, S.F. (1989). Comunicación Personal. Comisión de Agua Potable de Tequesquitengo, Ayuntamiento Municipal.
- SARH, (1978). Cálculo del Clima de Acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite. Pub. Num. 7, 2a. Ed. México, Septiembre.
- SARH, (1980). Clasificación de la cuenca del río Amacuzac, río Apatlaco, Yautepec y Cuautla. Subsecretaría de Planeación, Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica. Subdirección de Normas y Vigilancia. 106 p.
- SARH, (1981). Evaluación analítica de Resultados de Laboratorio en base a Teoría química. Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica, Contrato SP-81-C-26 Clave POE-81-26, División de Estudios de Posgrado, Fac. Ing. UNAM.
- SARH, (1983). Memoria del curso "Microbiología y Aplicaciones en los procesos biológicos de tratamiento de aguas". Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, Subdirección de Investigación y Entrenamiento, Departamento de Entrenamiento. México D.F.
- SARH, (1984). Manual de Técnicas de Análisis Físicoquímico para Aguas. 5a. ed. México.
- Shannon, E.E. y Brezonik, L.P. (1972, February). Eutrophication analysis; a multivariate approach. Journal of the Sanitary Engineering Division. 98 (FA 1). 37-57.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (1981). Síntesis Geográfica de Morelos. Coordinación General de Servicios Nacionales de Estudios de Geografía e Informática. México. 110 p.
- SRH, (1971). Región Hidrológica Núm. 18, parcial cuenca del río Amacuzac. Boletín hidrológico Núm. 47, Tomo II.
- SRH, (1976). Estudio de la calidad del agua del lago de Tequesquitengo. Dirección General de Planeación, Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación. Contrato No. SP-75-C-21. Proyectos, Ingeniería y Construcción, S.A.
- SRH, (S/A). Manual del Curso de Análisis de Aguas y Aguas de Desecho. Subsecretaría de Planeación, Dirección General de Usos del Agua y Prevención de la Contaminación, Centro de Investigación y Entrenamiento. Vol. 1.
- Tapp, S.J. (1978, March). Eutrophication analysis with simple and complex models. J. Wat. Pollut. Cont. Fed. 50 (3). 484-492.

..BIBLIOGRAFIA..

- Vallia, C.S. (1989). Comunicacion Personal. Presidencia Municipal de Jojutla de Juárez, SARH, edo. de Morelos.
- Vollenweider, R.A. (1981, July). Eutrophication; A Global Problem. Wat. Qual. Bull. 6 (3). Part. 1.
- Vollenweider, R.A. y Kerekes, J.J. (1981). Background and Summary Results of the OECD Cooperative Program on Eutrophication. Restoration of Lakes and Inland Water, EPA 440/ 5-81-010. Washington, D.C.
- Welch, E. B. (1977, June). Eutrophication. J. Wat. Pollut. Cont. Fed. 49 (6). 1218-1221.

## CALCULO DEL ESCURRIMIENTO

Con la finalidad de evaluar la cantidad de agua de precipitación pluvial que por exceder a la capacidad de almacenamiento de los suelos tiene que escurrir, fue necesario basarse en algunas de las ecuaciones propuestas para el "Cálculo del clima de acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite" (SARH, 1978). Tales ecuaciones se deben emplear sólo en aquellos casos en donde se desconocen las características del suelo en cuanto a su composición e infiltraciones.

Para calcular el escurrimiento, fue necesario estimar el área circundante al lago o cuerpo de agua, que en este caso es Tequesquitengo, ubicado en el estado de Morelos. Tal zona que rodea al lago fue denotada como de escurrimiento o área de la microcuenca (Am).

Además de Am, es necesario evaluar tanto la precipitación pluvial (Pm) como la temperatura ambiental (Ta) en la zona de estudio.

Área de la microcuenca ( Am )

Con la finalidad de calcular el área de aporte de agua al lago de Tequesquitengo por medio del escurrimiento, se empleó la carta de usos del suelo de CETENAL de Jojutla E - 14 - A - 69 a escala 1 : 50,000 de la Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP) de 1975.

El área fue delimitada con base en que la carretera que rodea y comunica al lago se encuentra separándolo del resto de la cuenca, formando una microcuenca, la cual fue reproducida en papel milimétrico para facilitar su cuantificación (Lamina, 13).

Precipitación media mensual ( Pm )

Para calcular la precipitación pluvial se tomaron los datos registrados por la estación meteorológica "División Balsas y Pacífico, Municipio de Jojutla, edo. de Morelos, Tequesquitengo", ubicada a una latitud de 18°37'00" y longitud de 99°17'00".

Los datos empleados consideran desde el mes de enero de 1976 hasta diciembre de 1985, calculándose los promedios mensuales.

Lámina 13. Área de la microcuenca de escurrimiento del lago de Tequesquitengo, Mor.



SIMBOLOGIA

 Área de la microcuenca  $6.31 \times 10^6 \text{ m}^2$

Sin embargo, para evaluar la precipitación anual no se tomaron los promedios mensuales, sino los datos mensuales de todos los años considerados.

Temperatura ambiental (  $T_a$  )

Al igual que para evaluar la precipitación pluvial, se consideraron los datos de temperatura ambiental de los 10 años, esto es, desde 1976 hasta 1985. De la misma forma, se obtuvieron los promedios tanto mensuales como anuales.

Escurrimiento total de la microcuenca del lago (  $E_m$  )

Para el análisis del escurrimiento, se considera mensualmente tanto a la precipitación (  $P_m$  ) como a la temperatura ambiental (  $T_a$  ).

Con la finalidad de cuantificar el escurrimiento y de mostrar el comportamiento del agua que llega a los suelos a través de la precipitación, se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$E_m = E ( A_m ) \quad (1)$$

en donde:

$E_m$  = Escurrimiento total de la microcuenca del lago (  $m^3$  )

$E$  = Escurrimiento (  $m$  )

$A_m$  = Área de la microcuenca (  $m^2$  )

Cálculo de  $E$

$$E = \frac{DAC}{2} + \frac{DAN}{4} \quad (2)$$

en donde:

$DAC$  = Demasía de agua en el suelo, del mes en curso (  $cm$  )

$DAN$  = Demasía de agua en el suelo, del mes anterior (  $cm$  )

Demasía de agua en el suelo, del mes en curso (  $DAC$  )

Se considera en forma general que la demasía está definida como el exceso o sobrante de agua en el suelo después de haber saturado teóricamente su capacidad de almacenamiento.

En el caso de DAC, se estima que las cuencas permiten escurrir el 50 % de las demasías en ese mes, por lo que para su cálculo se toma la demasia de agua en cm de cada mes, dividida por la mitad.

Demasia de agua en el suelo, del mes anterior ( DAN )

En este caso se considera el 50 % restante del cual la mitad escurrirá en el mes siguiente y la otra mitad se infiltrará o se evaporará, por lo que para evaluarla, se considera a la demasia de agua en cm del mes anterior, dividida entre 4.

Demasia de agua en cm ( DA )

La demasia de agua se considera que representa a la diferencia positiva que existe entre la precipitación de cada mes (Pm) y la evapotranspiración potencial mensual corregida del mismo mes (ETP), restando la cantidad de agua que pasa a formar parte de la reserva en el suelo, o sea el valor absoluto del movimiento de humedad (MH), en caso de que la humedad almacenada en el suelo (HA) no exceda su capacidad, que se considera que es de 10 cm. En caso contrario, la DA estará representada por el exceso de agua, esto es, por MH o parte proporcional de esta según como sobrepase a HA.

Si se desea saber cuál es la demasia anual de agua en el suelo (DAA) pueden sumarse los valores mensuales de la DA.

Evapotranspiración potencial mensual corregida en cm ( ETP )

Para la cuantificación de la evapotranspiración tenemos:

$$ETP = EV ( FC ) \quad (3)$$

en donde:

EV = Evapotranspiración potencial mensual sin corregir

FC = Factor de corrección por latitud

Movimiento de humedad en el suelo en cm ( MH )

El movimiento de humedad en el suelo se refiere a la cantidad de precipitación que pasa a formar parte de la reserva de agua en el suelo, o sea, representa a la humedad almacenada en el suelo.

Este cálculo debe iniciarse en el mes en que la precipitación (Pm) supere a la evapotranspiración potencial mensual corregida (ETP), con esta excepción, pueden presentarse los siguientes casos;

1.- Cuando no existe humedad almacenada en el suelo (HA) o sea, igual a cero y la precipitación (Pm) no sobrepase a lo que evapotranspira (ETP), entonces no hay movimiento de humedad;

$$HA = 0 \quad \text{y} \quad Pm < ETP \quad \text{entonces} \quad MH = 0$$

2.- Cuando haya humedad almacenada en el suelo pero sea menor al nivel de saturación (10 cm) y la precipitación supere a lo que se evapotranspira (ETP), entonces el movimiento de humedad será hacia el suelo; esto es, el valor de la precipitación menos la evapotranspiración potencial mensual corregida;

$$HA < 10 \quad \text{y} \quad Pm > ETP \quad \text{entonces} \quad MH = Pm - ETP$$

3.- Por último, en aquellos casos en donde exista humedad almacenada en el suelo (HA) pero que la precipitación (Pm) es inferior a la evapotranspiración (ETP), el movimiento de humedad no es hacia el suelo, sino que representa a una porción de la humedad almacenada (HA) que va hacia la atmósfera. Este tratamiento se sigue hasta que se acaba la humedad almacenada. En este caso, el movimiento de humedad será igual a la evapotranspiración mensual corregida menos la precipitación;

$$HA > 0 \quad \text{y} \quad Pm < ETP \quad \text{entonces} \quad MH = ETP - Pm$$

Evapotranspiración mensual sin corregir en cm ( EV )

Para calcular la evapotranspiración mensual sin corregir, se tiene que considerar tanto a la temperatura ambiental mensual como a el índice de calor anual, de la siguiente forma;

$$EV = 1.6 \frac{( 10 Ta )}{( ICA )} \quad \& \quad (4)$$

en donde;

Ta = Temperatura ambiental media mensual  
ICA = Índice de calor anual

$$\& = 6.75 \times 10^{-7} (ICA)^3 - 7.71 \times 10^{-5} (ICA)^2 + 1.792 \times 10^{-2} (ICA) + 0.49239$$

Factor de corrección por latitud ( FC )

Este factor se debe a los diferentes valores de iluminación que ocurren a diferentes latitudes, la cual influye en la evapotranspiración. Los factores de corrección se obtienen en las tablas registrados en el trabajo de SARH (1978).

Cálculo de la humedad almacenada en el suelo en cm ( HA )

Se refiere al contenido de agua en el suelo, después de considerar a la fracción que se mueve hacia la atmósfera, por lo que se realiza al final de cada mes.

HA se calcula tomando a la humedad almacenada en el suelo del mes anterior, mas la suma algebraica del movimiento de humedad del mes del que se trate.

Indice calórico mensual ( ICM )

El indice calórico está dado por la siguiente ecuación:

$$ICM = \frac{( Ta )^{1.514}}{( 5 )} \quad (5)$$

en donde:

ICM = Índice calórico mensual

Ta = Temperatura media mensual

La suma de los 12 valores mensuales (ICM) es el índice de calor anual (ICA).

Con la finalidad de mostrar el comportamiento del agua que llega al suelo por precipitación, puede calcularse la evapotranspiración real (ETR) y la deficiencia de agua en el suelo (DE).

Cálculo de la evapotranspiración real en cm ( ETR )

Se define como la evapotranspiración que se presenta en un área determinada en función del agua total disponible.

La ETR puede presentar los siguientes casos:

1) Cuando la precipitación es mayor o igual a la evapotranspiración potencial mensual corregida (ETP) no hay límite de agua y por lo tanto evapotranspira todo lo que señala la ETP;

Si  $P_m \geq ETP$  entonces  $ETR = ETP$

2) Cuando la precipitación (Pm) es menor que la evapotranspiración potencial mensual corregida (ETP), se evapotranspira sólo lo que aporta la lluvia más el movimiento de humedad en el suelo;

Si  $P_m < ETP$  entonces  $ETR = P_m + MH$   
valor absoluto  
Deficiencia de agua en cm ( DE )

Está en función directa de la evapotranspiración potencial mensual corregida (ETP) y la evapotranspiración real (ETR). La diferencia entre estos valores da la deficiencia y la suma de todos los valores mensuales es la deficiencia anual (DEA).

#### CALCULO DEL ESCURRIMIENTO EN EL LAGO DE TEQUESQUITENGO, MOR.

Con el objeto de facilitar el entendimiento de la secuencia de ecuaciones propuesta por Thornthwaite (SARH, 1978), proporcionaremos los datos con los que se evaluó la cantidad de precipitación que por escurrimiento llega al lago de Tequesquitengo en un año.

Area de la microcuenca ( Am )

Al copiar en papel milimétrico el área de escurrimiento cada milímetro representaría 50 000 milímetros, de tal forma, que en total el área delimitada por la carretera que rodea al lago, o sea, el área de escurrimiento, es de;

$$Am = 6.31 \times 10^6 \text{ m}^2$$

Precipitación media mensual ( Pm )

Los datos de precipitación pluvial se muestran en el cuadro (8), dando los promedios mensuales en cm.

Temperatura ambiental ( Ta )

De la misma forma que para la precipitación pluvial, se muestran los datos mensuales desde 1976 hasta 1985, con sus respectivos promedios mensuales de todos los datos en el cuadro (9).

Escurrimiento ( Em )

Realizando la sustitución en la ecuación ( 1 ), tenemos que:

$$Em = 0.192625 \text{ m} ( 6.31 \times 10^6 \text{ m}^2 )$$
$$Em = 1,215,463.8 \text{ m}^3$$

Cálculo de E

Para calcular E fue necesario conocer las demasías o excesos de agua en el terreno aledaño al lago. Con esta finalidad, el agua que llega al terreno por medio de la precipitación tiene 3 opciones de comportamiento:

- 1.- Regresar nuevamente a la atmósfera por medio de la evapotranspiración (ETP);
- 2.- Quedar almacenada en el suelo (HA), y;
- 3.- En caso de que las dos opciones anteriores se satisfagan y quede agua excedente (demasia) será igual al escorrimento (E), con las consideraciones que se plantean en la ecuación ( 2 ).

Recordemos que DAC es la demasia de agua del mes en curso y DAN es la del mes anterior. A continuación se muestran los datos que se emplearon para el cálculo de E en el lago de Tequesquitengo:

MES	DAC	DAN	E mensual
ENE	0	0	0
FEB	0	0	0
MAR	0	0	0
ABR	0	0	0
MAY	0	0	0
JUN	0.55/2	0	0.2750
JUL	8.13/2	0.55/4	4.2025
AGO	6.29/2	8.13/4	5.1800
SEP	8.90/2	6.29/4	6.0225
OCT	1.81/2	8.90/4	3.1300
NOV	0	1.81/4	0.4525
DIC	0	0	0

$$E = 19.2625 \text{ cm}$$

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Demasía de agua en cm ( DA )

En el apartado anterior se mostró el cálculo de E con base en las distintas condiciones en las que escurre la demasía en los terrenos. Tanto DAN como DAC no son más que la demasía mensual, considerando a la del mes del cálculo y a la del mes anterior.

La demasía para el lago de Tequesquitengo se obtuvo considerando:

DA = Pm - ETP - MH            cuando            HA < 10

DA = MH                            cuando            HA = 10

Los datos empleados para este cálculo se muestran a continuación, con la particularidad de que los datos mensuales de precipitación son promedios de los diez años:

MES	Pm	ETP	MH	DA
ENE	1.21	3.74	-1.89	0 <4
FEB	0.46	4.35	0	0
MAR	0.38	7.65	0	0   I
ABR	1.02	9.98	0	0
MAY	4.95	11.65	0	0 <4
JUN	21.39	10.84	10.00	0.55<4
JUL	17.80	9.67	0	8.13
AGO	15.34	9.05	0	6.29   II
SEP	17.12	8.22	0	8.90
OCT	9.08	7.27	0	1.81<4
NOV	0.59	5.28	- 4.69	0 <4
DIC	0.55	3.97	- 3.42	0 <4 III

DAA = 25.68

En el caso de los datos marcados con I no puede haber demasía de agua si la precipitación es menor que la evapotranspiración; en los datos marcados con II la precipitación excede a la evapotranspiración; y por último, en los datos marcados III la evapotranspiración excede a la precipitación, pero como hay humedad almacenada en el suelo, se evapotranspiran de HA los datos de MH.

Evapotranspiración potencial mensual corregida en cm ( ETP )

Los datos para calcular la ETP se muestran a continuación;

Evapotranspiración mensual sin corregir en cm ( EV )

Para el cálculo de ETP fue necesario el valor de EV, el cual se calculó con base en la ecuación (4), mostrándose los datos a continuación:

MES	Ta	Ta x 10	1.6 (Ta x 10/ ICA)	(2.08)
ENE	14.6	146	3.89	
FEB	16.2	162	4.84	
MAR	19.9	199	7.42	
ABR	22.4	224	9.50	
MAY	23.4	234	10.41	
JUN	22.8	228	9.86	
JUL	21.3	213	8.55	
AGO	20.9	209	8.22	
SEP	20.7	207	8.06	
OCT	19.7	197	7.27	
NOV	17.4	174	5.61	
DIC	15.1	151	4.18	

El valor obtenido de ICA = 95.26 y de  $\delta$  = 2.08, se empleó en la ecuación.

Factor de corrección por latitud ( FC )

En este caso se consideraron los datos de ubicación de la estación meteorológica de la cual se tomaron los datos tanto de precipitación como de temperatura ambiental:

Latitud                    18°37' 00"  
Longitud                    99°17' 00"

Los datos de FC pueden observarse en el cuadro (10).

Cálculo de la humedad almacenada en el suelo en cm ( HA )

Para saber si el movimiento de humedad es hacia el suelo, hacia la atmósfera o al escurrimiento, se tiene que considerar si la humedad almacenada en el suelo es como máximo de 10 cm. Cuando esto sucede, entonces  $MH = DA$ .

$HA$  (del mes anterior) +  $MH = HA$  hasta que  $HA = 10$  cm  
Los datos de  $HA$  se muestran a continuación:

MES	MH	HA	
ENE	- 1.89	0	<4
FEB	0	0	
MAR	0	0	1
ABR	0	0	
MAY	0	0	<4
JUN	10.0	10.0	<4
JUL	0	10.0	
AGO	0	10.0	2
SEP	0	10.0	
OCT	0	10.0	<4
NOV	- 4.69	5.31	<4
DIC	- 3.42	1.89	<4 3

en donde se observan 3 casos:

1.- Como se planteó ya anteriormente, en este caso no puede almacenarse agua porque el agua que precipita se evapotranspira inmediatamente.

2.- Meses en los que se satura HA con un máximo de 10 cm, dando pauta a que haya demasías.

3.- Datos en los que se está evapotranspirando parte de la humedad almacenada en los meses anteriores.

Indice de calor mensual ( ICM )

Con la finalidad de calcular el índice de calor anual, fue necesario conocer el índice de calor mensual, mostrándose los datos a continuación:

MES	Ta	$\frac{1.514}{(Ta / 5)}$	= ICM
ENE	14.6	5.07	
FEB	16.2	5.93	
MAR	19.9	8.10	
ABR	22.4	9.68	
MAY	23.4	10.35	
JUN	22.8	9.95	
JUL	21.3	8.97	
AGO	20.9	8.72	
SEP	20.7	8.59	
OCT	19.7	7.97	
NOV	17.4	6.61	
DIC	15.1	5.33	
		ICA	=95.26

Cuadro 10. Factor de Corrección "FC" por latitud (latitud norte).\*

°	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
1	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
2	1.04	.94	1.04	1.01	1.05	1.02	1.04	1.04	1.01	1.04	1.00	1.03
3	1.03	.94	1.03	1.01	1.05	1.02	1.05	1.04	1.01	1.04	1.00	1.03
4	1.03	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.05	1.05	1.01	1.03	1.00	1.02
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
6	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.04	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.01
7	1.01	.92	1.03	1.02	1.07	1.04	1.07	1.06	1.01	1.03	.99	1.01
8	1.01	.92	1.03	1.03	1.07	1.05	1.07	1.06	1.02	1.02	.98	1.00
9	1.00	.92	1.03	1.03	1.08	1.05	1.08	1.06	1.02	1.02	.98	1.00
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
11	.99	.91	1.03	1.03	1.09	1.06	1.09	1.07	1.02	1.02	.97	.99
12	.99	.91	1.03	1.04	1.09	1.07	1.10	1.07	1.02	1.01	.97	.98
13	.98	.91	1.03	1.04	1.10	1.07	1.10	1.08	1.02	1.01	.96	.98
14	.98	.91	1.03	1.04	1.10	1.08	1.11	1.08	1.02	1.01	.96	.97
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.96	.97
16	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.09	1.12	1.09	1.02	1.01	.95	.96
17	.96	.91	1.03	1.05	1.12	1.09	1.13	1.09	1.02	1.00	.94	.96
18	.96	.90	1.03	1.05	1.12	1.10	1.13	1.10	1.02	1.00	.94	.95
19	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.10	1.14	1.10	1.02	1.00	.93	.95
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94

\* Tomada parcialmente de SARN, 1978. "Cálculo del clima de acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite".