



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOBRE RECURSOS  
NATURALES**

**INIRENA – UMSNH**

**COORDINACIÓN DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS**

**“EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE  
NUTRIENTES DEL LAGO DE ZIRAHUÉN,  
MICHOACÁN, MÉXICO”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN LIMNOLOGÍA Y ACUICULTURA**

**PRESENTA**

**YOLANDA VERGARA DE PAZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M.C. MARTHA BEATRIZ RENDÓN LÓPEZ**

**MORELIA, MICHOACÁN  
MÉXICO  
FEBRERO 2006**

## CONTENIDO

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.   | INTRODUCCIÓN .....                       | 1  |
| II.  | HIPOTESIS .....                          | 5  |
| III. | OBJETIVOS.....                           | 5  |
|      | 3.1. Objetivo general .....              | 5  |
|      | 3.2. Objetivos particulares .....        | 5  |
| IV.  | ANTECEDENTES .....                       | 6  |
|      | 4.1. Marco teórico.....                  | 6  |
|      | 4.1.1 Nitrógeno .....                    | 7  |
|      | 4.1.2. Fósforo.....                      | 10 |
|      | 4.2. Estudios internacionales.....       | 12 |
|      | 4.3. Estudios nacionales .....           | 15 |
|      | 4.4. Estudios del lago de Zirahuén ..... | 16 |
| V.   | DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO .....    | 21 |
|      | 5.1. Localización geográfica.....        | 21 |
|      | 5.2. Morfometría del lago .....          | 22 |
|      | 5.3. Fisiografía .....                   | 23 |
|      | 5.4. Geografía .....                     | 23 |
|      | 5.5. Suelos .....                        | 24 |
|      | 5.6. Hidrología .....                    | 24 |
|      | 5.7. Clima .....                         | 25 |
|      | 5.8. Estratigrafía del lago.....         | 26 |
|      | 5.9. Vegetación .....                    | 27 |
|      | 5.10. Fauna.....                         | 29 |
|      | 5.11. Actividades productivas.....       | 29 |
|      | 5.12. Asentamientos humanos.....         | 30 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>MATERIAL Y METODOS .....</b>                            | <b>31</b> |
| <b>6.1. Sitios de muestreo .....</b>                       | <b>31</b> |
| <b>6.2 Descripción de las estaciones de muestreo .....</b> | <b>31</b> |
| <b>6.3 Muestreo .....</b>                                  | <b>33</b> |
| <b>6.3.1. Toma de muestra de agua .....</b>                | <b>33</b> |
| <b>6.3.2. Toma de muestra de sedimentos.....</b>           | <b>34</b> |
| <b>6.4. Registro de campo .....</b>                        | <b>35</b> |
| <b>6.5. Trabajo de laboratorio .....</b>                   | <b>36</b> |
| <b>6.5.1. Análisis químico del agua .....</b>              | <b>36</b> |
| <b>6.5.1.1. Nutrientes .....</b>                           | <b>37</b> |
| <b>6.5.1.2. Biomasa .....</b>                              | <b>38</b> |
| <b>6.6. Análisis químicos de sedimentos.....</b>           | <b>38</b> |
| <b>6.6.1 Nutrientes .....</b>                              | <b>39</b> |
| <b>6.7 Análisis estadístico.....</b>                       | <b>39</b> |
| <b>VII. RESULTADOS.....</b>                                | <b>40</b> |
| <b>7.1 Análisis de la columna de agua .....</b>            | <b>41</b> |
| <b>7.2 Nutrientes en la columna de agua .....</b>          | <b>42</b> |
| <b>7.3 Análisis estadístico .....</b>                      | <b>44</b> |
| <b>7.3.1 ANOVA nutrientes .....</b>                        | <b>44</b> |
| <b>7.4. Nutrientes limitante .....</b>                     | <b>45</b> |
| <b>7.5 Productividad Primaria .....</b>                    | <b>47</b> |
| <b>7.6 Análisis de sedimentos .....</b>                    | <b>48</b> |
| <b>7.7. Materia orgánica.....</b>                          | <b>49</b> |
| <b>7.8 Nutrientes en sedimentos.....</b>                   | <b>50</b> |
| <b>7.9 Modelo de la dinámica de nutrientes.....</b>        | <b>52</b> |
| <b>VIII. DISCUSIONES .....</b>                             | <b>53</b> |
| <b>IX CONCLUSIONES .....</b>                               | <b>56</b> |
| <b>X. LITERATURA CITADA. ....</b>                          | <b>57</b> |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Flujos de nutrientes en un sistema acuático .....  | 6  |
| 4.2 Ciclo de nitrógeno.....  | 8  |
| 4.3 Ciclo del Fósforo.....   | 11 |
| 5.1 Localización geográfica de la cuenca del lago de Zirahuén .....  | 20 |
| 5.2 Cuenca del lago de Zirahuén en el municipio de Villa Escalante .....   | 21 |
| 5.3 Corriente principal representada por el efluente río la Palma<br>y corrientes del segundo y tercer orden (INIRENA-2000)..... | 24 |
| 7.1 Perfil de oxígeno en la estación profunda .....  | 36 |
| 7.2 Diagrama de cluster en las estaciones en el lago de Zirahuén .....   | 39 |
| 7.3 Valores de fósforo en las etapas de estratificación y mezclado .....   | 42 |
| 7.4 Valores de nitrógeno en las etapas de estratificación y mezclado ....  | 43 |
| 7.5 La productividad primaria controlada por los sólidos suspendidos .   | 44 |
| 7.6 La productividad primaria controlada por la relación N:P .....   | 44 |
| 7.7 Triángulo de textura Shepard (1954) .....  | 45 |
| 7.8 Porcentaje de materia orgánica .....   | 46 |
| 7.9 Modelo de evaluación de la dinámica de nutrientes en el<br>lago de Zirahuén, Michoacán.....                                  | 48 |

## INDICE DE TABLAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.1 Clasificación general de estado trófico (Wetzel, 2001) .....</b>   | <b>12</b> |
| <b>6.1 Ubicación de los sitios de muestreo en coordenadas UTM .....</b>   | <b>28</b> |
| <b>6.2 Profundidades de muestreo en las estaciones de campo .....</b>   | <b>29</b> |
| <b>6.3 Registro de campo .....</b>  | <b>30</b> |
| <b>6.4 Análisis de laboratorio físico-químicos .....</b>  | <b>31</b> |
| <b>6.5 Determinaciones de nutrientes en agua .....</b>  | <b>32</b> |
| <b>6.6 Determinaciones de biomasa .....</b>   | <b>32</b> |
| <b>6.7 Determinaciones de variables para sedimentos .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>7.1 Resultados de las variables en la columna de agua en las<br/>estaciones de muestreo del lago de Zirahuén (2004-2005) .....</b> | <b>35</b> |
| <b>7.2 Clasificación de las aguas según su concentración de CaCO<sub>3</sub> .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>7.3 ANOVA entre las estaciones de muestreo en el lago de Zirahuén .....</b>  | <b>38</b> |
| <b>7.4 Resumen de varianza entre estaciones del lago de Zirahuén .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>7.5 ANOVA de las 23 variables en los dos periodos (estratificación<br/>y circulación en el lago de Zirahuén) .....</b>             | <b>40</b> |
| <b>7.6 Resultados de varianza entre las etapas para las 23 variables .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>7.7 ANOVA de los nutrientes entre las etapas de estratificación<br/>y circulación .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>7.8 Análisis de varianza para las etapas de circulación<br/>y estratificación .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>7.9 Nutrientes limitantes dentro de la comuna de agua .....</b>  | <b>41</b> |

**7.10 Nutrientes en sedimentos del lago de Zirahuén, Michoacán .....47**

## I. INTRODUCCIÓN

Los nutrientes como se ha demostrado en varios estudios a partir de Liebig en 1840 son un factor limitante para el crecimiento de la productividad primaria, junto con la penetración de luz. Generalmente un factor limitante se entiende como aquel que esta presente en bajas concentraciones y es requerido para el desarrollo del organismo.

Una de las variables en los cuerpos de agua más importantes en cuanto a productividad acuática son los nutrientes, ya que estos determinan el nivel trófico en el que se encuentran los ecosistemas acuáticos. Dentro de estos nutrientes los más importantes son: carbono, nitrógeno y fósforo, ya que son los nutrientes que se requieren en altas concentraciones para el crecimiento celular, los cuales los más significativos y estudiados en el mundo, estos elementos se encuentran en el medio ambiente en sus respectivos ciclos distribuidos en la atmósfera, hidrosfera, biosfera y geósfera en diferentes compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos (Agemian, 1997, Wetzel, 2001).

El concepto de nutriente limitante se define como ley del mínimo, hace referencia que es el nutriente que se encuentra menos disponible limitando la producción aún cuando los demás estén en cantidades suficientes (Liebig, 1840). Más tarde la ley del mínimo fue modificada por Bartholomew en 1958 como ley de los factores limitantes, actualmente el concepto de nutriente limitante se basa en la premisa que, dada una determinada estequiometría celular de las plantas acuáticas, aquel elemento que controla la máxima cantidad de biomasa vegetal y que primero alcanza un mínimo antes que otros relativos a tal estequiometría (Martino, 2001).

Por lo tanto, un nutrientes limitante se considera como tal cuando el crecimiento es limitado por un nutriente presente en baja concentración, el cual es requerido para la síntesis de componentes celulares (Dodds,2002). Es importante enfatizar que

tanto demasiado como demasiado poco de cualquier factor puede limitar el crecimiento.

En un medio acuático los nutrientes son distribuidos en el agua y la interfase agua-sedimentos en dos formas: disuelta y particulada, los nutrientes biodisponibles en éstos sistemas son absorbidos y metabolizados por los organismos acuáticos.

En los ecosistemas lacustres la abundancia del fitoplancton esta relacionada a la concentración de nutrientes, es decir la cantidad de clorofila esta dada por la concentración presente de fósforo, nitrógeno y en algunos casos de sílice. En un sistema acuático es importante que la dinámica de nutrientes de estos elementos en agua, sedimentos y biota logre un balance natural, ya que de esto depende la productividad de los cuerpos de agua.

La disponibilidad de estos elementos, dan lugar a cambios temporales y espaciales de diferentes comunidades del fitoplancton, por lo que es importante determinar el nutriente limitante en los sistemas acuáticos. La baja concentración de uno de estos nutrientes, ya sea de nitrógeno o de fósforo dentro de un sistema acuático afectan al fitoplancton, ya que puede ser limitada por los requerimientos específicos de dicha comunidad (Kopáček, 1995; Champion, 2000).

El nutriente de mayor abundancia en los sistema acuático es el nitrógeno y casi siempre existe en forma combinada como amonio ( $\text{NH}_4$ ), nitrito ( $\text{NO}_2$ ), nitrato ( $\text{NO}_3$ ), urea ( $\text{CO} [\text{NH}_2]_2$ ) y compuestos orgánicos disueltos. Los nitratos son usualmente los más importantes, ya que las células vivas contienen el 5% de nitrógeno total de varios compuestos nitrogenado como aminoácidos y proteínas, los cuales influyen en la abundancia y valor nutricional tanto en plantas como en animales acuáticos, los organismos vivos pueden obtener el nitrato a partir del proceso de nitrificación (Goldman, 1983; Atlas y Bartha, 1993).

Mientras que el fósforo es menos abundante que el nitrógeno, es absolutamente necesario para todos los organismos, ya que su función es la de almacenar y transferir energía a las células, indispensable en la química de ácidos nucleicos, y

generalmente es el nutriente limitante por su tendencia a precipitarse en presencia de metales divalentes y el ión férrico en medios alcalinos además de adsorberse a los sedimentos (Cole, 1983; Wetzel, 2001).

En un sistema acuático el fósforo presenta ocho formas diversas: fósforo orgánico o particulado como parte de ácidos nucleicos, proteínas, enzimas, vitaminas, adenosín difosfato (ADP) y Adenosín 5-trifosfato (ATP), y formas minerales en rocas y suelos o bien adsorbido en microorganismos y agregaciones macro-orgánicas (Wetzel, 1981; Cole, 1983).

Tanto el nitrógeno como el fósforo son elementos indispensables para la formación de clorofila “a” en el fitoplancton, así mismo la acumulación e incremento de las concentraciones de los nutrientes en agua y sedimentos provocan un proceso de fertilización o enriquecimiento algal en los lagos oligotróficos. Por tal motivo, la relación entre nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) en los sistemas acuáticos es importante, ya que es un indicador del estado trófico (Kopáček, 1995).

Sin embargo, la relación de nutrientes (N:P) aún no se determina para algunos de los cuerpos de agua del país, como es el caso del lago de Zirahuén, lago oligo-mesotrófico de aguas muy claras y transparentes (Chacón et. al. 2001). Este lago precisa de un mayor conocimiento sobre la relación del patrón de nutrientes, nutriente limitante, y su la dinámica en el ecosistema.

El lago de Zirahuén, cuenta con un afluente único, el arroyo de “La Palma”, mismo que recibe aguas residuales de las poblaciones de Santa Clara del Cobre y Opopeo, e incorpora los escurrimientos de zonas de cultivo cercanas a las márgenes del cauce. La Palma contiene aguas residuales que aportan al lago de Zirahuén 0.25 (1986) a 0.34g/m<sup>2</sup>/año de fosfóro (1988), (Bernal-Brooks, 2000).

Debido a que actualmente no se conoce el comportamiento de los nutrientes en el lago de Zirahuén, ni se ha establecido el nutriente limitante para evaluar la productividad primaria potencial del lago.

Considerando que este lago es un lago tropical de altamontaña lo cual lo sitúa entre los lagos con dinámicas fuera de los patrones de comportamiento entre lagos oligotrofos y mesotrofos a nivel mundiales y poco conocidos es fundamental determinar la dinámica de nutrientes del lago de Zirahuén, para contribuir con el desarrollo de planes de aprovechamiento sustentable, ya que en años anteriores se han realizado estudios hidrológicos, ópticos, limnológicos, así como de sedimentos, calidad de agua y toxicidad de cobre en la comunidad planctónica tratando de diseñar en conjunto estrategias para el aprovechamiento y conservación de este lago.

Actualmente Martino (1990) y Bernal et. al. (2000), realizaron estudios sobre el papel de los nutrientes en este ecosistema acuático, sin embargo la información requiere de actualización continua en cuanto a la dinámica de nutrientes en el ecosistema, que además conlleva mecanismos que mantienen la calidad del agua aún insuficientemente estudiadas.

Por lo tanto, el presente trabajo plantea determinar la dinámica nitrógeno y fósforo dentro del lago, tanto en agua como en sedimentos, para establecer la relación N:P que determina la productividad primaria del lago de Zirahuén, así mismo poder proponer un modelo de la dinámica de fósforo y nitrógeno en este ecosistema con la finalidad de que sirva como punto de partida para determinar los porcentajes de N y P que es absorbido por organismos acuáticos.

## II. HIPÓTESIS

Si la dinámica del nitrógeno y del fósforo determinan la productividad primaria en el ecosistema acuático de Zirahuén entonces la relación entre ambos elementos influye en la productividad primaria .

## III. OBJETIVOS

### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la dinámica de nitrógeno y fósforo en el lago de Zirahuén.

### 3.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Caracterizar el ambiente físico-químico del lago de Zirahuén.
- Determinar la naturaleza y la concentración del nitrógeno y del fósforo en el agua y en el sedimento.
- Determinar la relación de nitrógeno y fósforo disponible en el ecosistema.?
- Determinar la relación nitrógeno y fósforo que existe la productividad primaria.

Proponer un modelo de la dinámica de nitrógeno y fósforo en el ecosistema.

## IV. ANTECEDENTES

### 4.1. Marco teórico

En la naturaleza existen dos tipos de ciclos biogeoquímicos, sedimentario y gaseoso. Los ciclos del fósforo y nitrógeno corresponden al primero y segundo caso (Fig 3.1).

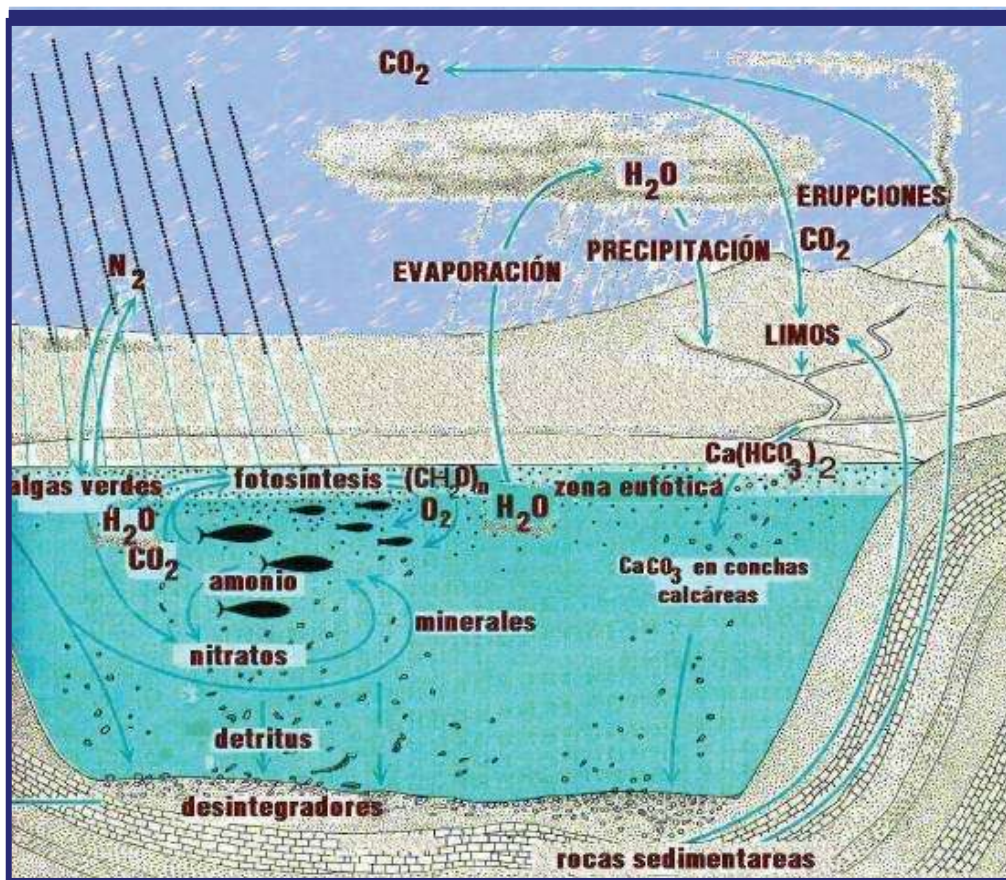


Figura 4.1 Flujos de nutrientes en un sistema acuático.

#### A.- Ciclos sedimentarios:

Los ciclos sedimentario de nutrientes se caracterizan por que éstos se encuentran y circulan principalmente en la corteza terrestre (suelo, rocas y sedimentos), la hidrósfera y entre los organismos como parte de su estructura molecular.

Los elementos en estos ciclos son generalmente reciclados mucho más lento que en el caso de los ciclos gaseosos, además el elemento se transforma de modo químico y con aportación biológica en un mismo lugar geográfico. Los elementos son retenidos en las rocas sedimentarias durante largos periodos de tiempo con frecuencias de miles a millones de años, ejemplos de este tipo de ciclos es el fósforo.

### **B.- Ciclos gaseosos:**

En estos ciclos los nutrientes circulan entre la atmósfera y los organismos. En la mayoría de ellos los elementos son reciclados rápidamente, con frecuencia en horas o días. Este ciclo se refiere a la transformación de la sustancia, además se fija a partir de una materia prima gaseosa, ejemplo de ciclos gaseosos es el nitrógeno.

#### **4.1.1. Nitrógeno**

El nitrógeno es uno de los elementos esencial para la vida y presente en casi el 80% del aire (como un gas incoloro, inodoro e insípido). Las plantas extraen nitrógeno del suelo y los animales lo obtienen de plantas u otros animales. Al morir, la descomposición de las plantas y animales regresa el nitrógeno al suelo. Al igual que el oxígeno, el nitrógeno atmosférico se conforma de moléculas con dos átomos y su símbolo es  $N_2$ , éstos forman diversos compuestos entre ellos como el caso clásico el monóxido de nitrógeno ( $N_2O$ ) gas del escape de los automóviles (Cole, 1983).

En contraste el nitrógeno constituye el 2.5% de los sistemas vivos. En el ciclo de nitrógeno (Fig. 4.2) existe una participación activa de organismos, el nitrógeno inerte libre y abundante en la atmósfera, es apresado por el pulmón y retenido por las plantas, solo algunos procariotes pueden convertir el nitrógeno molecular ( $N_2$ ) rompiendo las ligaduras moleculares en compuestos disponibles para los organismos como el nitrato ( $NO_3$ ) y los nitritos ( $NO_2$ ). En la naturaleza el nitrógeno se transforma a otras formas químicas por medio de dos procesos:

- 1) Descargas eléctricas de tormentas atmosféricas donde se forman pequeñas cantidades de oxido de nitrógeno y
- 2) La fijación de nitrógeno por medio de un proceso biológico, donde un grupo de organismos son capaces de transformar el  $N_2$  en aminoácidos y proteínas.

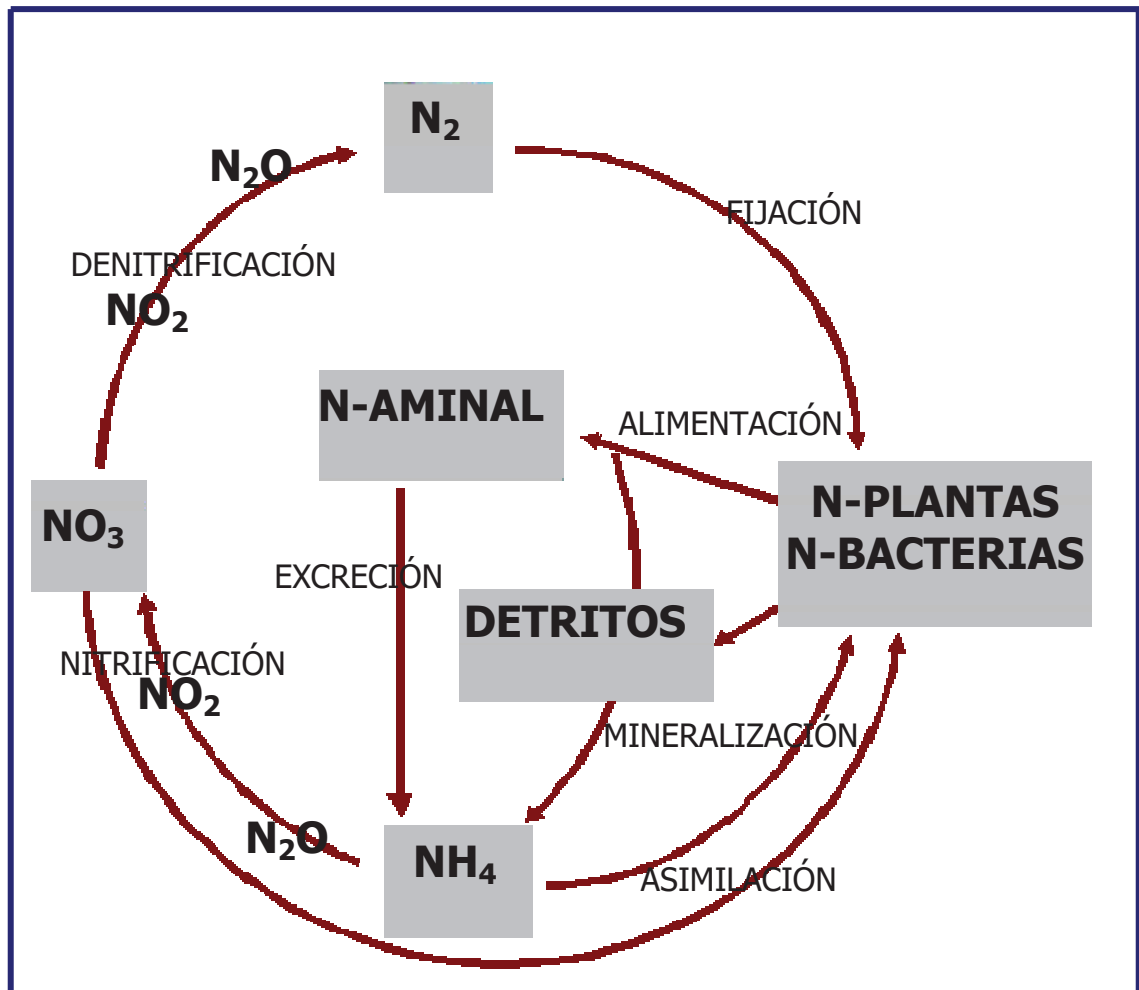


Figura 3.2 Ciclo del nitrógeno

### I.- Fijación de nitrógeno

Los nitratos y en menor cantidad el amonio, son las principales fuentes de nitrógeno de las plantas y de muchos microorganismos. En virtud de su patrón enzimático las plantas convierten los nitratos a través de una serie de reacciones químicas hasta aminoácidos, proceso llamado asimilación de nitrógeno.

Las proteínas de las plantas sirven como fuente de aminoácidos esenciales para numerosos animales. Así mismo, las plantas sintetizan sus propias proteínas celulares a partir de los aminoácidos. Los animales herbívoros a su vez son ingeridos por otros organismos carnívoros que sirven así como fuente de nitrógeno.

En esta etapa existen dos grupos responsables de la mayor parte de fijación del nitrógeno en el suelo y son las bacterias aerobias *Azotobacter* que se encuentran en los medios alcalinos y las bacterias aerobias *Clostridium pasterurinium* de los medios ácidos.

Otra forma de nitrógeno es la de los desechos nitrogenados que se presentan en forma de urea, como es el caso de los mamíferos y aves que producen ácido úrico. También se presenta la descomposición de materia orgánica (organismos muertos) a través de procesos bacterianos liberando compuestos nitrogenados.

### **B.- Nitrificación**

En la fase de nitrificación la oxidación de el amonio a nitratos ocurre en presencia de oxígeno, mediante la intervención de dos grupos de bacterias aeróbicas nitrificantes. Las bacterias *nitrosomas* oxidan aeróbicamente el nitrógeno hasta nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), mientras las bacterias *nitrobacter* oxidan el nitrito hasta nitrato aeróbicamente.

Para *Nitrosomonas*:



Para *Nitrobacter*:



### **C.- Denitrificación**

La denitrificación representa un proceso biológico, controlado por bacterias denitrificantes, que transforman nitratos y nitritos a nitrógeno molecular en forma anaeróbica. La liberación de nitrógeno hacia la atmósfera completan el ciclo.

#### **Desnitrificación**



### **4.1.2. Fósforo**

El fósforo es absolutamente necesario para todos los organismos vivos; tiene como función el almacenar y transferir energía a las células y en los sistemas genéticos, ejemplo de esta importancia es el universal ATP (Adenosina Trifosfato) conocida como un acarreador de energía, así como la presencia de grupos fosfatos en nucleótidos y ácidos nucleicos, que son moléculas indispensables para la existencia. El fósforo esta incluido como uno de los principales átomos para la vida de los organismos junto con el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), y azufre (S).

#### **A.- Origen y naturaleza del fósforo.**

El fósforo no se oxida fácilmente, sin embargo, éste proceso ocurre en las zonas rocosas formando ortofosfato ( $\text{PO}_4$ ). También se puede incorporar ortofosfato o fosfato soluble a los cuerpos de agua como subproducto de las actividades agrícolas que aportan abonos agrícolas y pesticidas, además los desechos domésticos que incluye detergentes.

#### **B.- Formas de fósforo**

Es fundamental para los estudios de dinámica del fósforo conocer las diferentes formas de este elemento, por lo que Hutchinson (1957) clasifica el fósforo en cuatro formas que son:

- I. Fósforo inorgánico soluble (ortofosfato)
- II. Fósforo en suspensión (sestónico soluble en medio ácido principalmente, fosfato férrico y fosfato cálcico)
- III. Fósforo coloidal y soluble orgánico (amino ácidos, Proteínas y enzimas)
- IV. Fósforo orgánico en suspensión (sestónico constituyentes celulares de la materia viva).

El fósforo inorgánico soluble (Fig. 4.3) es la única forma inorgánica significativamente importante del fósforo. Más del 79% del fosfato del agua de los lagos existe en forma orgánica en constituyentes celulares del seston o asociado a diversas formas con (o adsorbido) partículas orgánicas muertas y materiales inorgánicos.

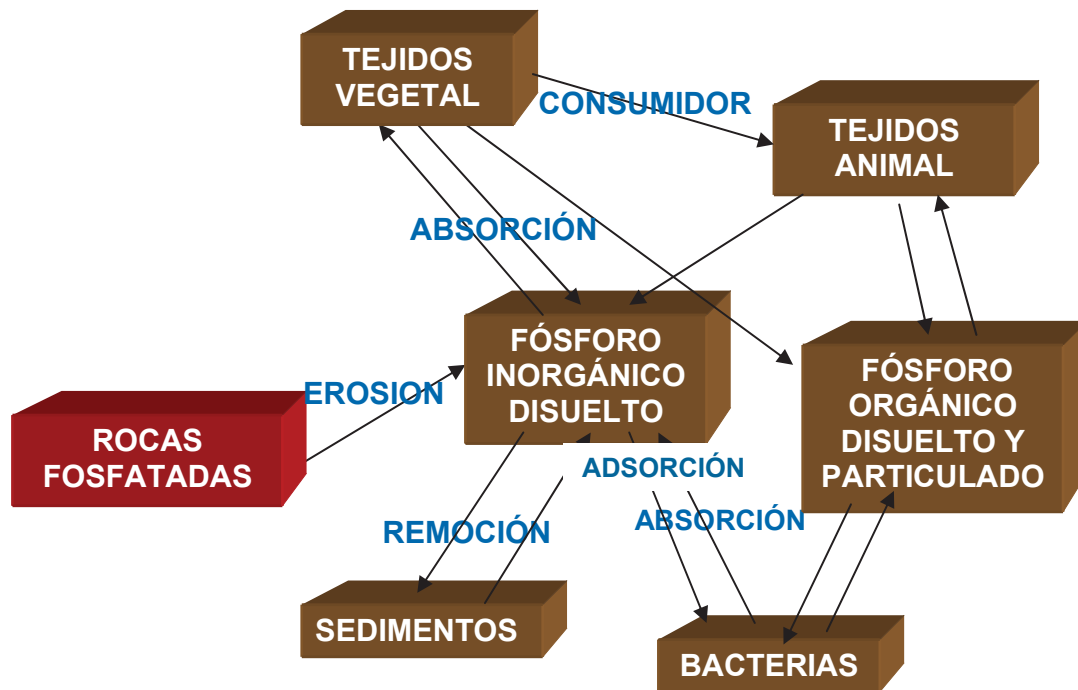


Figura 4.3. Ciclo del fósforo

## 4.2 Estudios Internacionales

Se han realizado varios estudios sobre la dinámica de nutrientes y la determinación del estado trófico en diversos sistemas acuáticos buscando el comportamiento de fósforo y el nitrógeno, así como, el efecto del factor limitante.

Con la determinación de un conjunto de características energéticas (incremento gradual de fósforo y nitrógeno) y ecológicas se ha definen el grado trófico del ecosistema, a lo cual se ha denominado como estado trófico (Tabla 4.1).

**Tabla 3.1. Clasificación general de estado trófico (Wetzel, 2001).**

| <i><b>ESTADO TRÓFICO</b></i> | <i><b>CARACTERÍSTICAS</b></i>   |
|------------------------------|---|
| Oligotrófico                 | Aguas claras con poca materia orgánica y mínima actividad biológica         |
| Mesotrófico                  | Aguas con más nutrientes y por lo tanto más productividad biológica.        |
| Eutrófico                    | Aguas extremadamente ricas en nutrientes, con alta productividad biológica. |

Dillon et. al. (2000) realizo un estudio sobre el balance de masa de fósforo total lo determina en ocho pequeños lagos oligotróficos de Ontario, Canadá. Basándose en una técnica colorimétrica que usa como agente reductor al ácido ascórbico y amonio molibdato para calcular la carga interna de fósforo total (TP ( $L_{INT}$  mg/m<sup>2</sup>/año) en lagos con hipolimnia.

Estos autores concluyen para ocho lagos de Notario, Canada, que el balance de masa de los ocho lagos en indica una entrada de fósforo total con una relación interna del 10%, pero la entrada de fósforo total por impacto antropogénico fue potencialmente altas con 57.5% de descargas de agua al sistema.

Straskraba et al. (1995) realizaron un estudio en 13 reservorios de Checoslovaquia sobre el efecto de la concentración de fósforo. Las formas de fósforo total y ortofosfatos, permitieron estimar fósforo retenido La revisión bibliográfica de lagos y presas, indican qu estas últimas presentan una capacidad de retención de fósforo mayor que los lagos y concluyen tres puntos:

- I. Teóricamente el tiempo de retención de fósforo en el agua de las presas y los lagos es una variable importante.
- II. La retención del fósforo total y el fósforo reactivo soluble presenta diferencias significativas.
- III. Existe diferencia significativa entre las presas y los lagos en cuanto a la retención de fósforo.

Knowlton y Jones (1996) llevaron acabo en una presa en el medio oeste de Estados Unidos un experimento *in situ* de 28 series de cultivo de algas durante 27 meses, con variaciones tanto en la intensidad de luz como en la concentración de nutrientes. Los resultados correlacionan el incremento proporcional del cultivo, la exposición de luz durante el experimento y la respuesta en la biomasa. En la mayoría de los experimentos la biomasa aumenta con la intensidad de y la mayor adición de nitrógeno y fósforo.

Vaithyanathan (1997) realizó un estudio en el norte de los Everglades, en Florida sobre nutrientes y analizó la concentración de fósforo y nitrógeno en la superficie del agua y en los sedimentos, así como en el agua intersticial, además del gradiente de eutrofización.

Los niveles de fósforo en la superficie del agua son atribuidos a la agricultura y la concentración de fósforo en el agua intersticial de los sedimentos en las áreas oligotróficas se encontrará en el rango de 5-10µg/L.

La relación molar de nitrógeno inorgánico disuelto y fósforo sugieren que el nutriente limitante en áreas oligotróficas es el fósforo, mientras en áreas eutróficas, es el nitrógeno.

Pizzolon y Arias, (2000) determinaron en la descarga del río Azul del lago Puelo, Argentina la relación de nutrientes nitrógeno y fósforo (N:P). Los autores concluyeron que el nutriente limitante es el nitrógeno solo en la vegetación terrestre, ya que el río cuenta con concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto desde 25µg/L, mientras que el fósforo solo 0.93 µg/L. Así mismo determinaron que el fósforo es el nutriente limitante, resultado de una actividad intensiva y prolongada de la agricultura en la zona.

Champion y Currie, (2000) realizan un estudio en 13 lagos, 15 ríos y 17 estuarios sobre la relación fósforo total (PT)-clorofila "a" (Cl-a). La señalada relación en lagos, ríos y estuarios resultó muy diferente en cada caso. El fósforo se encuentra asociado a partículas de tamaño distinto: en lago con 0.2-64 µm; ríos <0.2 µm; y en estuarios de >64 µm. En los lagos el 80% de los lagos el fósforo total se relaciona con la clorofila "a", en ríos el fósforo es soluble y en los estuarios indican una asociación con partículas floculadas o en fragmentos de macrozooplancton. Los resultados sugieren que la mayor parte de el fósforo total en ríos y estuarios no forma parte de las algas.

Wisniewski (2000), realizó en condiciones controladas de laboratorio un experimento que simuló la movilización de fósforo durante el proceso de resuspensión de los sedimentos en dos lagos, el lago Gutowo y el lago Lasinskie, lagos someros con profundidades de 5 m y 6 m respectivamente. En laboratorio, adicionando cloruro férrico como principal defloculador del fósforo precipitado en los sedimentos de ambos lagos.

La adición de cloruro férrico es un método alternativo para la resuspensión de fosfatos en los sedimentos, también las altas concentraciones de cloruro de hierro causan cambios en las condiciones físicas y químicas del agua que ponen peligro en la vida de los hidrobiontes.

Irving et al. (2000), predijeron en 29 lagos Irlandeses la concentración de fósforo a través del uso de relaciones empíricas y coeficientes de exportación de nutrientes con datos de calidad de agua en cuatro temporadas del año en dos años. Un análisis de correlación y varianza (programa estadístico CORINE) y el uso de imágenes de satélite permitieron obtener censos estadísticos y así predecir valores de fósforo total mediante un modelo. Las concentraciones medidas de fósforo total (PT) se encontraban en el rango de 1-88 µg/L.

James et al. (2001) midieron en el río Redwood de Minnesota la carga de fósforo, y analizaron la carga de fósforo lábil y fósforo refractario (particulado que no se disocia fácilmente por medios químicos o altas temperaturas) tanto en columna de agua como en sedimentos

Pereira et al (2003) realizan una estudio sobre la dinámica de nutrientes de la región portuaria del estuario del río Itajaí Harbour, Uruguay dichos autores midieron la salinidad y las concentraciones de nutrientes por un año. Como resultado obtuvieron concentraciones de salinidad de 16.7 de nitrógeno inorgánico total de 38.3µM , de PO<sub>4</sub> 0.69µM. y de Si de 63.1 µM. Concluyendo que el factor que determina los procesos del estuario son las descargas del río y posibles asociaciones con las actividades antrópicas e los alrededores.

### **4.3 Estudios nacionales**

Con el objetivo de enfatizar la importancia económica, social y cultural de los lagos se realizan estudios nacionales enfocados en el balance de los nutrientes clasificando al sistema acuático de acuerdo a el estado trófico en el cual se encuentra, los estudios son los siguientes:

De Anda et al. (2000) realizaron el balance de fósforo en el lago de Chapala a través de la cuantificación de entradas de fósforo total puntuales y no puntuales durante 40 años, usando la calidad de agua durante 24 años (1974-1997). El balance de masa mostró que el fósforo total se acumula en el lago cerca de 1 a 683 toneladas/año. Además encuentran que el fósforo total puntual es cerca de 626 a 910 toneladas/año donde el río Lerma contribuye con 90%. Concluyen que durante el periodo de estudio el lago de Chapala se mantuvo constante en su estado eutrófico.

Martino (2001), mediante metodología simplificada para evaluar el estado de eutroficación para lagos cálidos tropicales basado en modelos preliminares de clorofila **a** y nitrógeno total, incluyendo 43 lagos de América Latina y el Caribe.

### **4.4 Estudios del Lago De Zirahuén**

No existen hasta el momento estudios referentes a balance de nutrientes para el lago de Zirahuén siendo estos muy importantes, sin embargo, se han hecho varios estudios limnológicos desde el año de 1942.

De Buen (1943) describió por primera vez los límites geográficos del sistema lacustre, con una descripción batimétrica del lago e incluyó, variaciones de temperatura, oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno a diversas profundidades; además de un listado de especies de fitoplancton, zooplancton y peces.

López-Solache (1981) en un reconocimiento de tipo hidrológico clasificó a Zirahuén como un sistema que presenta una circulación completa de la masa de agua durante todo el año, es decir, un lago cálido polimíctico continuo.

Mendoza-González et al., (1985) encontraron como algas dominantes al grupo chlorophycophyta (54%), chrysophycophyta (29%), cyanophyta (10%), pyrrophycofitya (7%) mientras que las euglenophyceas fueron las menos representadas de toda la flora con 2 especies. Desde 1988 se presentan los primeros reportes de la existencia de una estratificación térmica y clasifica al lago como cálido monomíctico.

Bernal-Brooks (1988) discutió los impactos actuales sobre la condición del lago y presentó valores de las propiedades óptica, térmica, química y sedimentos del lago de Zirahuén y reafirma la presencia de la estratificación termica.

Chacón y Múzquiz (1991) reportaron concentraciones promedio de 0.8mg/L de sólidos suspendidos y hasta 2.5mg/L durante la temporada de lluvias. Lo anterior como resultado del acarreo de sedimentos hacia la cuenca lacustre, además mencionaron períodos de anoxia a partir de los 20 m.

Múzquiz (1994) discutió el impacto de la actividad agrícola sobre la cuenca de Zirahuén y mencionó que el número de terrenos en descanso cada vez son menos frecuentes para la recuperación del suelo, de las áreas dedicadas a la agricultura, con una afectación en el rendimiento de las tierras que agrava el proceso de erosión.

Múzquiz (1994) encontró que en la región se presenta un sistema agroforestal en crisis, y parte de la sierra pierde alrededor de 2,500 has anuales, casi el 50% de los ejidos y comunidades de la región han agotado o están por agotar sus recursos forestales y sólo entre un 20 a 30 % de las comunidades se encuentran en posibilidades de desarrollar una actividad forestal organizada y planificada.

Cruz (1995) realizó una evaluación sobre el balance hídrico de la cuenca y mencionó que la cuenca es un sistema de tipo endorréico y su drenaje está conformado por cuatro vertientes (norte, sur, oriental y occidental) de las cuales tres de ellas vierten hacia el río La Palma y la cuenca se orienta este-oeste.

La dinámica hídrica que presenta el lago es positiva, esto permite que al haber deficiencia de entradas superficiales, éste sea alimentado probablemente por aguas subterráneas y cuando existen demasías en las entradas del lago la mayor parte del agua que recibe se pierde en favor de los flujos subterráneos de salida hacia la cuenca del río Balsas. Lo que significa que por mucho que llueva o falten las lluvias el volumen de agua del lago tiende a ser constante (Cruz, 1995).

Santos (1995) en un estudio de contaminación por bacterias coliformes, encontró que el lago presentaba baja contaminación por materia fecal. El mayor número de bacterias totales corresponde al Rincón de Agua Verde y la menor el único tributario. Las bacterias coliformes son mayormente abundantes en el arroyo y la estación Copándaro.

Alvarado (1996) estudio el fitoplancton y registró 189 especies de fitoplancton y 24 variedades, de las cuales el 42% son clorofitas, 39% crisofitas, 11% cianofitas y 4% pirrofitas y euglenofitas. La mayor abundancia relativa de fitoplancton se presentó en el periodo de primavera y la más baja en otoño.

Las especies más abundantes fueron *Cosmarium sexangulare* y *Cyclotella menenghiniana*. La producción primaria neta máxima en diciembre (133 mgC/m<sup>3</sup>/h); la mínima en octubre (3.46 mgC/m<sup>3</sup>/h). Los índices algales indican un cuerpo de agua oligotrófico con tendencias a mesotróficas.

Antaramián y Ortega (1996) evaluaron el riesgo de erosión de la cuenca, así como cambio de área y volumen del lago, considerando tres factores: climáticos, edáficos y topográficos.

El valor promedio de riesgo de erosión para la cuenca es de 153 ton/ha/año, siendo este ligero a moderado y se presenta principalmente en suelos de andosoles y litosoles de la cuenca.

Campos *et al* (1997) realizan un análisis de limnología física del lago, señalando que el color púrpura azulado es ocasionado por partículas coloidales y pseudocoloidales, con una iluminación de 99.45%.

Determinando que la zona eufótica se encuentra a una profundidad de 9.70m, además de estratificación térmica de marzo a septiembre que disminuye lentamente la concentración de oxígeno del lago. En el fondo se presenta una anoxia que desaparece en Diciembre cuando ocurre la meromixis o mezclado de la columna de agua.

Rosas-Monge (1997) realizó un reconocimiento ambiental de la cuenca del lago de Zirahuén, donde identifica los principales componentes, de morfometría, actividades productivas y efectos en el entorno natural. Finalmente, determina siete unidades espaciales: sierra de pendiente pronunciada y moderada, lomerío alto medio y bajo, llano aluvial y el lago. La propuesta de desarrollo para la cuenca incluye investigación multidisciplinaria, integración social e institucional, silvicultura, turismo ecológico, restauración y conservación ecológica, diversificación productiva, capacitación y generación de empleos.

Davies (2000) reportó datos paleoambientales del lago de Zirahuén y la laguna de Juanacatlan (Jalisco) obtenidos de un análisis de diatomeas, susceptibilidad magnética y contenido de metales. Los sedimentos del lago de Zirahuén registran los efectos causados a partir del año 1,029 por las diferentes épocas ambientales y socio-culturales. Este trabajo mostró las primeras evidencias de concentración de metales como un resultado de la explotación mineral de la colonia y actividades en Santa Clara del Cobre a partir del siglo XVIII con actividades.

Bernal-Brooks (2000) analizo variables físicas y químicas en el cause de el río La Palma y del Lago de Zirahuén y reportó valores promedio de 18.5°C de temperatura, 5.15 mg/L de oxígeno disuelto, 4.68 mg/L de demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno inorgánico total de 1621.8 mg/L y 196 mg/L de fósforo total y reitera con la obtención de datos, la observación de una cuenca lacustre que permanece inalterada a pesar de la introducción de elementos promotores de la eutroficación.

Chacón et al. (2001) realizaron un reconocimiento ecológico bajo el enfoque de cuenca hidrográfica e identificó seis unidades ambientales basadas en las características de vegetación, uso del suelo y actividades económicas en cada una de ellas. La propuesta de establecer un área natural protegida en la cuenca de 266.2km<sup>2</sup>.

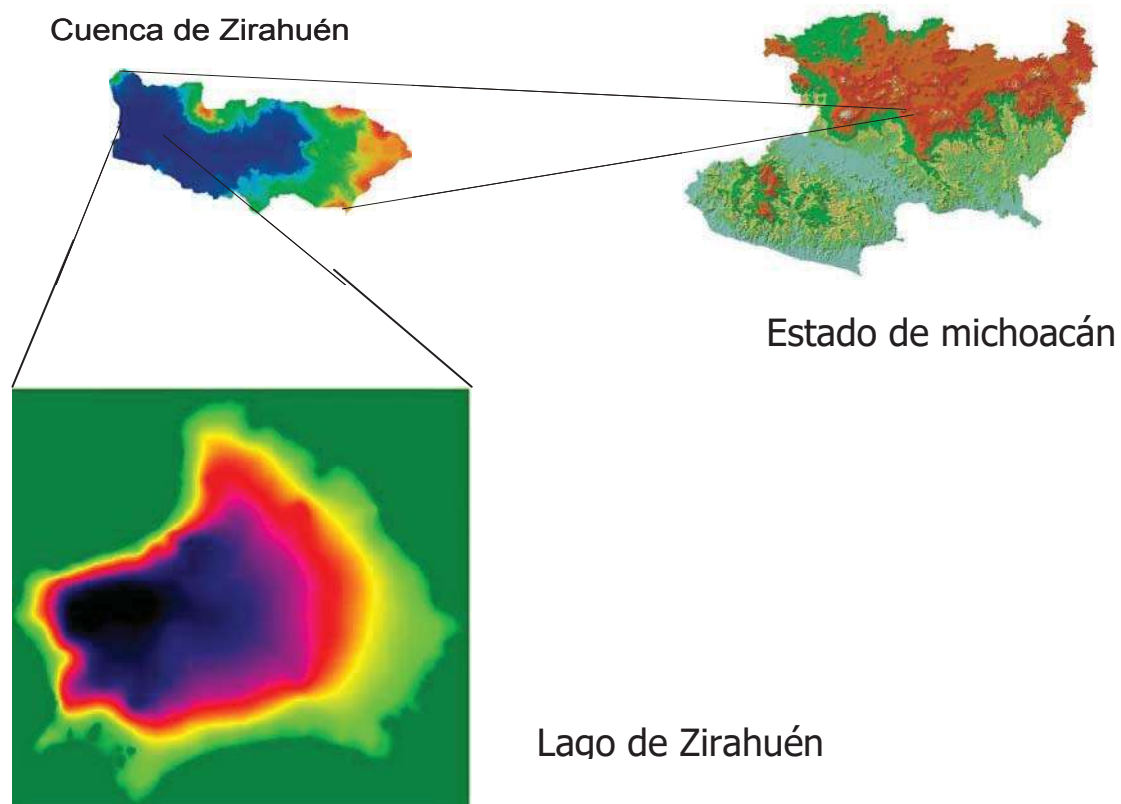
Bernal Brooks et al (2002) realizaron bioensayos para determinar el nutriente limitante de la productividad en el lago de Zirahuén. Las concentraciones de fósforo en el lago (4-10µg/L) contrastan con aquellas que ingresan del arroyo la Palma (100-347µg/L), determinando como nutriente limitante al fósforo, además mencionan que el lago esta reduciendo su transparencia, debido al manejo de cuenca a partir de actividades como la agricultura, industria y residuos domésticos.

Ayala (2002) realizó un estudio en donde determino el flujo de cobre en el arroyo la Palma y el lago de Zirahuén durante un año, Vergara (2003), por su parte realizo un estudio ecotoxicológico en dos especies de fitoplancton (***Chlorella vulgaris*** y ***Scenedesmus obliquus***) y una especie de zooplancton ***Daphnia sp.*** que revela la presencia concentraciones letales de cobre que afectan a la comunidad planctónica del lago de Zirahuén.

## V. DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

### 5.1. Localización geográfica

La cuenca del lago de Zirahuén se ubica en la Subprovincia Neovolcánica Tarasca, en la porción norte-central del estado de Michoacán y forma parte de la región hidrológica No. 18 “Río Balsas”. El vaso lacustre se encuentra limitado por las coordenadas máxima 214460-2153500 UTM y mínima 210000-2149600 UTM (Antaramian-Ortega, 1996; Chacón y Rosas, 1998; Bernal, 2002; Ruiz, 2002). (Fig. 5.1).



Diseño: M.C. Gerardo Ruiz Sevilla

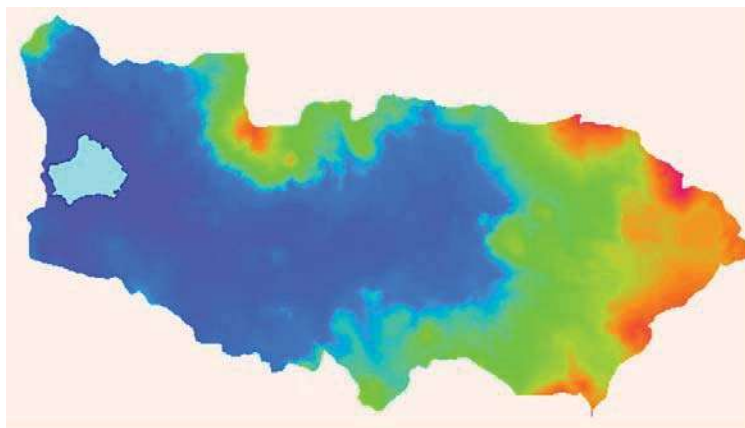
**Figura 5.1 Localización geográfica de la cuenca de lago de Zirahuén, Mich.**

La cuenca del lago de Zirahuén comprende los municipios de Villa Escalante y Tarétan; colinda al norte con la cuenca del lago de Pátzcuaro y el límite entre ambas cuencas corresponde a la serranía de Santa Clara del cobre, hacia el noreste el Cerro Burro (3,2800msnm) delimita la colindancia con la cuenca de Cuitzeo, al este y sureste los cerros de Zimbicho (3,120msnm), Jánamo (3,020msnm), la Tapada (3,000msnm) y la Cofradía separan la cuenca del Río Tacámbaro (Antaramian y Ortega, 1996); al sur, una serie de lomeríos conforman el parte-aguas de menor altitud y al oeste inicia de la sierra Enrique Cortés (Cruz, 1995).

El relieve presenta elevaciones marginales entre los 2,300 y 3,100 msnm con pendientes dirigidas hacia un cauce central, el río La Palma; el cual a su vez continua, en descenso gradual con dirección este-oeste rumbo al lago. El área de captación de la cuenca es de 260 km<sup>2</sup>, y contiene 40 conos volcánicos extintos que revelan una vigorosa actividad volcánica durante el pleistoceno y desde hace 3.5 millones de años (Cruz, 1995; Bernal, 1988 y 2002).

## 5.2. Morfometría del Lago

El lago se localiza al oeste de la cuenca, a una altitud de 2,075msnm, entre las coordenadas máximas 2159000-240000UTM, y mínimas de 208000-2141000UTM (INIRENA, 2000).



Diseño: M.C. Gerardo Sevilla

**Figura 5.2 Cuenca del lago de Zirahuén en el municipio de Villa Escalante y Tarétan.**

El área del lago de Zirahuén es de 10.5 km<sup>2</sup> (Bernal, 1988); y el último reporte determina un área de 10.48km<sup>2</sup> (Chacón y Rosas,1998) (Fig 5.2). presenta una amplitud máxima de 4.6 Km y una mínima de 3.76Km. La profundidad máxima reportada es de 45 m, la profundidad promedio es de 20.56m. El volumen del lago es de 220 657, 500 m<sup>3</sup> mientras que el nivel del lago se encuentra a 2075.995 msnm. (Ruiz 2000).

### **5.3. Fisiografía**

La cuenca del lago de Zirahuén forma parte de una cadena montañosa de origen tecto-volcánico que se ubica en la vertiente sur de la provincia del Eje Neovolcánico Transversal. El área incluye con llanuras, conos cineríticos, dispersos o en agregados amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena, cenizas y otras formaciones (Múzquiz, 1995). Masa de rocas volcánicas de diversos tipos, acomodadas en episodios sucesivos a partir de mediados del terciario (35 millones de años) hasta el presente. La cuenca del lago de Zirahuén es considerada en su mayor parte como sierra volcánica

### **5.4. Geología**

La sierra del centro donde se localiza el lago de Zirahuén es una región con una reciente actividad volcánica. El origen geológico corresponde a su vez con el del Altiplano Mexicano, que aumenta en altitud desde el Cretácico Superior y durante el Cenozoico Medio y Superior Volcánico (Oligoceno-Mioceno)(De Buen, 1943; Correa, 1974; Barrera, 1986).

Los principales factores geológicos han sido el vulcanismo y fenómenos asociados (Demant, 1976). Por lo tanto, la cuenca de origen volcánico incluye constituyentes litológicos como basaltos, representados por rocas ígneas extrusivas con manchones de brecha volcánica y corrientes de lava poco intemperizadas.

El intemperismo va de acentuado a leve (Múzquiz, 1995). Las planicies de la cuenca están formadas por depósitos aluviales cercanos a Opopeo, Santa Clara, Santa Juana y San Gregorio.

### **5.5. Suelos**

La mayor parte de la región incluye suelos de origen reciente formados a partir de cenizas volcánicas erosionadas. Los suelos son en la mayor parte de la cuenca de tipo andosol, principalmente ócrico y húmico (75%), en menos proporciones acrisol órtico, cambisol dístrico, feozem y luvisol crómico. En las partes más altas se presentan los litosoles (Chacón y Múzquiz, 1991).

### **5.6. Hidrología**

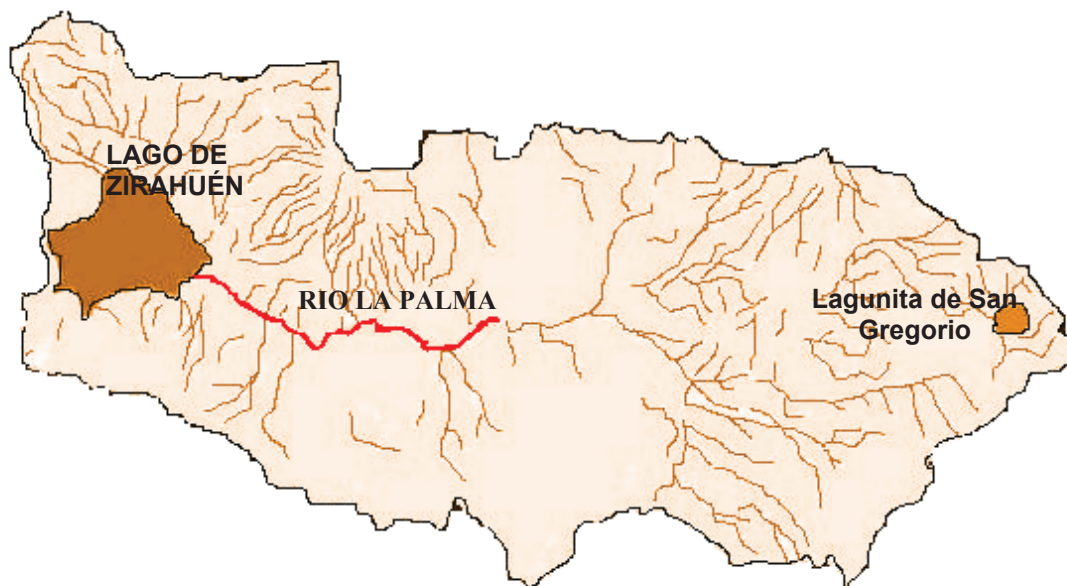
La cuenca de tipo endorréico, rodeada de montañas de origen volcánico, presenta una depresión central, inclinada hacia el oeste para terminar en dirección al lago, el drenaje de agua sigue este patrón.

Existe una corriente principal del cuarto orden, perenne que se origina en el extremo oriente de la cuenca que termina en su porción occidental del lago, se denomina arroyo “La Palma” o “El Silencio”, proveniente de Santa Clara del Cobre, con una longitud promedio de 16.2 km, cubre un área promedio de 52.7 km<sup>2</sup> y el flujo asciende a 402.7L/seg en época de lluvias (Cruz, 1995) y disminuye a 300L/seg en época de sequía (Rosas, 1997).

Además aparecen otros cuerpos de agua en forma de manantiales, afloramientos y otros tributarios de órdenes uno, dos y tres de tipo intermitente y efímeras (Campos 1997, Rosas Monge 1997).

Los brotes de agua que existen de manera de manantiales tienen su origen en la misma cuenca, debido a la infiltración, los afloramientos se ubican por lo general en las laderas de los cerros a una altitud entre los 2,200 y 2,700msnm entre los que destacan Cungo, Las Palmitas, San Miguel Characuén, Santa Clara del Cobre, estos manantiales sufren perturbación antropocéntrica, ya que en su mayoría son de uso doméstico o para abrevadero.

Existe también una pequeña laguna localizada en la base del Cerro Burro, conocida como la lagunita de San Gregorio. (Rosas-Monge, 1997). (Fig. 5.3).



**Figura 5.3** Corriente principal representada por el efluente río La Palma y corrientes de segundo y tercer orden (INIRENA, 2000)

## **5.7. Clima**

De acuerdo con la clasificación de Garcia (1988) el clima de la cuenca del lago de Zirahuén corresponde a templado sub-húmedo con lluvias en verano, con porcentaje de precipitación invernal menor de 5%, la temperatura medio anual es de 15.7°C y la precipitación anual es de 1182.6mm.

En altitudes mayores a los 3,000 m, el clima semi-frío sub-húmedo registra lluvias abundantes en verano y porcentaje de precipitación invernal menor del 5% (INEGI, 1985). En las zonas templadas la precipitación alcanza un máximo en los meses de junio a septiembre, la temperatura por su parte alcanza un valor máximo al inicio del período de lluvia y mínimo durante el invierno (Chacón y Múzquiz, 1991).

## **5.8. Estratigrafía del lago.**

La estratificación de un cuerpo de agua va a depender de las diferencias de densidad en las aguas de los lagos que resultan del gradiente térmico, e influyen sobre la circulación vertical de las aguas y la profundidad total del cuerpo de agua (Heinonen et al., 2000). a lo largo del año. La circulación general depende de la temperatura y, por consiguiente, va ligada al clima de la región.

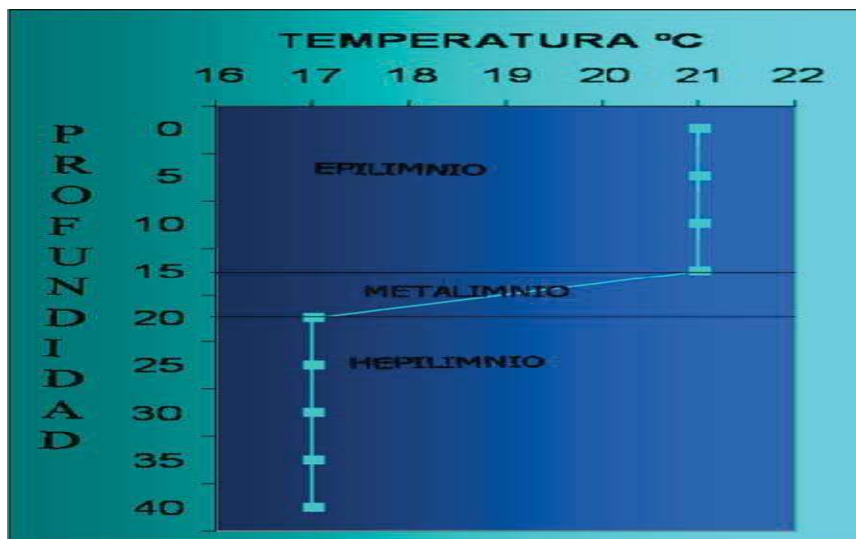
El lago de Zirahuén presenta estratificación térmica y se manifiesta de la siguiente manera, en el mes de Enero la temperatura en la superficie del agua es de 15°C sin diferencias notables con la temperatura del fondo. En Febrero empieza a ascender a 17°C y 15.5°C en el fondo. A medida que la temporada de calor avanza de Marzo a Octubre se registran las máximas temperaturas de 22°C, estableciéndose una diferencia de hasta 6°C con la temperatura del fondo .

Estas diferencias en la temperatura indica la estratificación térmica que se prolonga hasta la segunda mitad del Otoño, la cual se establece con pocas diferencias de temperaturas en Abril y con una termoclina ubicada entre los 8 y 10m de profundidad, siendo 2°C la máxima diferencia entre temperaturas de superficie y fondo. De esta manera se establece un epilimnio de 10m de profundidad, un metalimnio de 5m y finalmente un hipolimnio de 30m que se reduce al avanzar la temporada calurosa.

Con el aumento de la temperatura al final de la primavera y comienzo del verano la termoclina se reubica a mayor profundidad a un promedio de 15m en Junio y Julio con diferencia térmica máxima de 6°C entre las temperaturas de superficie y fondo, lo anterior implica un aumento en el epilimnio y una disminución en el hipolimnio.

Al llegar las primeras lluvias de verano la temperatura de superficie comienza a disminuir a 21°C manteniendo durante Agosto y Septiembre.

Mientras tanto la termoclina se reubica una vez más a mayor profundidad debido al calentamiento recibido por el epilimnio durante la primavera y el verano, estableciéndose a 20m de profundidad.



**Fig. 5.1. Estadigrafía del Lago de Zirahuén.**

Durante Octubre y Noviembre la diferencia de temperatura de superficie y fondo disminuye a un máximo de 2°C siendo la temperatura de superficie de 19°C y la del fondo de 17°C con una termoclina ubicada a una profundidad de 20m.

Finalmente, durante Diciembre las temperaturas de superficie y fondo se igualan a una temperatura de 17°C ocasionando el rompimiento de la estratificación térmica y el inicio del volcamiento o mezclado de las masas de agua. El periodo de circulación permanece hasta el final del invierno.

### 5.9. Vegetación

La vegetación de la cuenca está representada por las siguientes asociaciones (INEGI, (1985) Pérez (1991):

- a) Bosque de pino, 18% con *Pinus pseudostrobus.*, la especie más ampliamente distribuida.
- b) Bosque de abies, 1.3% de la superficie de la cuenca, en la porción oriental y *Abies sp.*, como la especie más representativa.
- c) Bosque de encino, 19% de la cubierta vegetal con las dominantes, *Quercus magnolifolia*, *Q. Rugosa*, *Q. Crassipes* y *Q. Crassifolia*.
- d) Bosque mesófilo de montaña 0.5% de la superficie de la cuenca y en la localidad denominada Rincón de Agua Verde, así como en algunas cañadas del cerro Zirahuén. El bosque mesófilo está representado por ocho especies que rebasan los 20 m de altura y 15 especies que alcanzan entre los ocho y doce metros.
- e) Pastizal 0.5% de la cubierta vegetal y representada por 28 especies en áreas donde el drenaje del suelo es lento, y claros del bosque de *Abies*.

La **vegetación acuática** del lago de Zirahuén se encuentra constituida por diferentes tipos de asociaciones y presenta una zonificación definida, principalmente en función de la profundidad.

Las comunidades representan unidades bien definidas de acuerdo a la forma de vida. Las hidrófitas enraizadas sumergidas, abarcan una mayor extensión y quedan incluidas todas las especies cuyas estructuras foliares y reproductoras permanecen completamente sumergidas. No obstante, aunque en algunos casos pueden tener sus órganos reproductores aéreos emergidos por encima de la superficie o flotantes.

Las especies mejor representadas son : *Potamogeton illimensis*, *Naja guadalupensis*, las algas *Chara excelsa* y *Nitella opaca*; seguidas de las hidrófitas enraizadas emergentes, arraigadas al sustrato, cuyos tallos, hojas y órganos reproductores son aerobios y se encuentran por encima de la superficie, las comunidades representativas de esta forma de vida son: *Typha latifolia*, *T. domingensis* y *Schenoplectus californianus* (Madrigal, 2001; Madrigal et. al.,2004).

Otra comunidad de pequeña extensión y de distribución restringida. Las hidrófitas de hojas flotantes constituyen las plantas enraizadas al sustrato y hojas flotantes sobre la superficie del agua y sus órganos reproductivos aéreos emergen por encima de esta, las principales especies son: *Nymphaea odorata* y *Nymphaoides follax*.

También se registró la presencia de una especie de hidrófita cuya forma de vida corresponde al tipo libremente sumergida, con tallos postrados, sin ninguna estructura que les permita fijarse sobre el sustrato u otras plantas acuáticas esta fue identificada como ***Utricularia aff. Macrorhiza*** (Madrigal, 2001).

La comunidad fitoplanctónica está representada por clorofilas con 41 géneros y 89 especies, Euglenofitas con 3 géneros y 8 especies; diatomeas con 31 géneros y 84 especies; Pirrofitas con 3 géneros y 9 especies; Cianofitas con 12 géneros y 22 especies (Alvarado, 1996; Rosas 1997).

### 5.10. Fauna

La ictiofauna del lago de Zirahuén presenta afinidad zoogeográficas con los lagos de Pátzcuaro y Cuitzeo. Las especies de mayor importancia comercial son las familia Atherinidae: *Chirostoma estor* Var. *Copándaro* (pescado blanco de Zirahuén) y *Chirostoma attenuatum* var. *Zirahuén* (Chacón y Múzquiz, 1991).

### 5.11. Actividades productivas

Existen 16,915 ha de uso agrícola (41% de la superficie de la cuenca), y 2,824 ha de uso pecuario ( 6.8% de la superficie total de la cuenca). La ganadería es básicamente extensiva de tipo familiar, se enfoca en manejo de ganado criollo, o alternativamente la semi-extensiva con pastoreo en terrenos de descanso, agostaderos y zonas de desmonte.

Los recursos forestales en la cuenca del lago de Zirahuén representan el 40% de la superficie total, y el aprovechamiento puede clasificarse en dos grandes grupos: de orientación comercial con el uso de maquinaria y cuyo destino son los aserraderos comerciales; y los de orientación doméstica para sustentar actividades artesanales.

Las artes de pesca comercial utilizadas en el lago son menos diversas que aquellas en el lago de Pátzcuaro, siendo éstas la red agallera y el chinchorro; por las características geográficas, físicas y biológicas del vaso lacustre la actividad pesquera de Zirahuén es poco productiva y no representa un ingreso económico de importancia para las comunidades.

En la cuenca se cultiva maíz principalmente. La actividad agrícola está muy relacionada a la actividad ganadera, ya que los terrenos en descanso son utilizados para el pastoreo del ganado. La productividad pesquera comercial del lago oscila en un promedio de 45.8kg/ha/año incluyendo ocho especies de peces existentes, esta actividad es realizada por 30 pescadores.

La actividad turística representa una actividad más que influye en el deterioro de los recursos de la cuenca.

La comunidad de Zirahuén presenta una alta demanda en cuanto a servicios turísticos, proporcionados de forma aislada por una sola empresa particular y sin competencia por parte de la comunidad ejidal o rural. El comercio se encuentra poco desarrollado y por tanto representa un porcentaje muy bajo en el ingreso económico de la población (Múzquiz, 1994).

Otra actividad en la región es la artesanal, destacando la orfebrería en cobre como es el caso de Santa Clara del Cobre.

### **5.12. Asentamientos humanos**

En el municipio de Villa Escalante la mayoría de la población se distribuye en pequeños poblados. Las poblaciones de Santa Clara y Opopeo tienen una población que oscila entre 5 a 10 mil habitantes y el resto de las localidades cuentan con menos de 5 mil habitantes (INEGI, 1990).

La cuenca tiene gran cantidad de pueblos con problemas de servicios, educación y empleo, lo que ha derivado en el incremento de la migración. Las poblaciones más importantes de la cuenca son Santa Clara (cabecera municipal de Villa Escalante), Opopeo, Zirahuén y Copándaro (Bernal-Brooks, 1988; Múzquiz, 1995).

## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1. Sitios de muestreo

La selección de sitios de muestreo deriva de un recorrido de campo para detectar zonas potenciales de ingreso de nutrientes o de sedimentación. El mapa batimétrico del lago de Zirahuén elaborado por Chacón (Ruiz 2002) permitió identificar las zonas de mayor representatividad limnológica y a partir de las cotas de profundidad se seleccionaron las siguientes estaciones de muestreo: (Tabla 6.1)

**Tabla 6.1. Ubicación de los sitios de muestreo en coordenadas de UTM**

| ESTACIÓN | UTM Máxima (Y) | UTM Mínima (X) | NOMBRE               |
|----------|----------------|----------------|----------------------|
| 1        | 2150400        | 210400         | Rincón de Agua Verde |
| 2        | 2151600        | 212000         | Zona profunda        |
| 3        | 2152800        | 212400         | Muelle de Zirahuén   |
| 4        | 2150800        | 213200         | La Palma             |

### 6.2. Descripción de las estaciones de muestreo

**Estación 1. Rincón de Agua Verde.** Este sitio se caracteriza por ser una zona aislada del lago, en donde las profundidades alcanzan un máximo de 13 metros durante el máximo nivel del lago. La zona se caracteriza por una baja hidrodinámica, acentuada sedimentación y un aporte de materia orgánica originada por el bosque mesófilo de montaña que se encuentra en su ribera (Fig. 6.2)

**Estación 2. Zona profunda.** En esta área se presenta la zona de máxima profundidad con valores máximos de 45 metros. En este sitio se presenta una alta hidrodinámica que en consecuencia favorece un tipo de sedimento compacto de capa delgada. Además este sitio se presenta en la región central del lago en donde se presenta la mayor extensión de aguas limnéticas. En la zona profunda es donde se presenta el proceso de estratificación térmica (Fig. 6.2)

**Estación 3. Muelle de Zirahuén.** La estación se ubica en la orilla del poblado de Zirahuén en donde se asume un alto ingreso de nutrientes resultado de la actividad turística y las descargas domésticas sin tratamiento. La profundidad oscila entre 6 y 10 metros, con una pendiente moderada y con la presencia de algunas extensiones de plantas acuáticas sumergidas. La zona se encuentra expuesta a los vientos dominantes por lo que el oleaje es frecuente así como el arrastre de sólidos por el deslave de la línea litoral (Fig. 6.2).



**Figura 6.1 Ubicación de las estaciones de muestreo.**

**Estación 4. La Palma.** En esta localidad se ubica la desembocadura del arroyo del mismo nombre que procede de la cuenca media, a partir de la población de Salvador Escalante o Santa Clara del Cobre. La zona de la desembocadura se caracteriza por una pendiente suave, una alta acumulación de sedimentos e ingreso de materia orgánica incorporada en la trayectoria del arroyo con un destino final en el lago (Fig. 6.2).

### 6.3. Muestreo

#### 6.3.1. Toma de muestra de agua

En cada estación se tomaron muestras durante la estratificación térmica (marzo a noviembre) y durante la mezclado (diciembre a febrero) de agua mediante el uso de una botella de muestreo tipo Van Dorn de 2L de capacidad. Las muestras de agua se tomaron de la manera siguiente (Tabla 8.2):



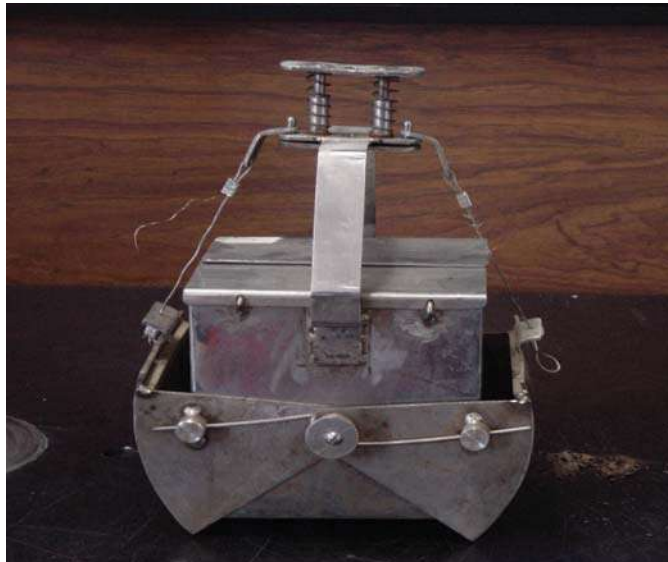
**Tabla 8.2. Profundidades de muestreo en las estaciones de campo**

| ESTACIÓN                          | PROFUNDIDAD DE MUESTREO        |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Rincón de Agua Verde (Estación 1) | Superficie, 5.0 m y fondo      |
| Zona profunda (Estación 2)        | Superficie, 10 m, 20 m y fondo |
| Muelle de Ziahuén (Estación 3)    | Superficie, 5 m y fondo        |
| La Palma (Estación 4)             | Superficie, 2 m y fondo        |

Las muestras colectadas se almacenaron en envases de plástico previamente lavados con un detergente libre de fosfatos y ácido clorhídrico al 5%, y enjuagados con agua destilada. Las muestras se transportaron en hielera al laboratorio y proceder al análisis inmediato de las muestras con una alteración mínima que pudiera modificar la naturaleza de los nutrientes.

### **6.3.2. Toma de muestra de sedimento.**

En cada estación se tomaron muestras de sedimento mediante el uso de una draga de muestreo tipo Ekman de 2K de capacidad. Las muestras colectadas se almacenaron en bolsas de plástico, transportadas en hielera al laboratorio para así proceder al análisis inmediato de los sedimentos con alteraciones mínimas en el contenido químico.



#### 6.4. Registros de campo

De manera simultánea a la tomaron muestras de agua y de sedimento, además se realizó un registro de variables ambientales que incluyeron (Tabla 6.3):

**Tabla 8.3. Registro de campo**

| VARIABLE                    | UNIDADES                        | TÉCNICA                    |
|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Temperatura ambiental       | °C                              | Termómetro de mercurio     |
| Temperatura del agua        | °C                              | Termómetro (termistor)     |
| Transparencia               | m                               | Disco de Secchi            |
| Conductividad electrolítica | $\mu\text{S}/\text{cm}$         | Conductivímetro PC-18      |
| Potencia de hidrógeno       | Adimensional                    | Conductivímetro PC-18      |
| Oxígeno disuelto            | mg/L                            | Técnica Winkler modificada |
| Productividad primaria      | $\text{gC}/\text{m}^2/\text{h}$ | Botella clara y oscura     |



## 6.5. Trabajo de laboratorio

### 6.5.1. Análisis químicos del agua

Las muestras de agua en laboratorio se les realizo las siguientes variables para su análisis.

**Tabla 8.4. Análisis en laboratorio físico-químicos**

| VARIABLE  | UNIDADES             | METODO   |
|---|----------------------|--|
| Alcalinidad total                                 | mgCO <sub>3</sub> /L | Titulación con ácido sulfúrico 0.02N, (APHA 1995).   |
| Dureza de calcio, magnesica, y total              | mg/L                 | Titulación con Edta (indicador de murexida y negro de eriocromo T) (APHA 1995).  |
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) | mg/L                 | Técnica de winkler modificada con 5 días de incubación a 20°C (APHA 1995).   |
| Demanda química de Oxígeno (DQO)                  | mg/L                 | Técnica de digestión con un ácido sulfúrico concentrado y titulando con un sulfato ferroso amoniacal 0.25n utilizando un indicador de ferroin (APHA 1995). |
| Sólidos Suspendidos totales                       | mg/L                 | Gavimétrico (APHA 1995)  |

### 6.5.1.1 Nutrientes

Para determinar la naturaleza de los nutrientes y su concentración se realizaron los siguientes análisis.

**Tabla 8.5. Determinaciones de nutrientes en agua.**

| VARIABLE                      | UNIDADES | METODO   |
|-------------------------------|----------|--|
| Nitritos                      | mg/L     | Método espectrofotométrico   |
| Amonio                        | mg/L     | Método Nessler   |
| Nitrógeno inorgánico disuelto | mg/L     | Suma de nitratos y nitritos  |
| Nitrógeno inorgánico total    | mg/L     | Suma de nitratos, nitritos y amonio  |
| Fosforo total                 | µg/L     | Digestiones con persulfato de potasio y utilizando el método de amonio molibdato-acido ascórbico (APHA 1995) |
| Ortofosfatos                  | µg/L     | Amonio molibdato-acido ascórbico (APHA 1995).  |



### 6.5.1.2. Biomasa

En el caso de biomasa en este trabajo se baso en el análisis de productividad primaria en campo y determinación de pigmentos puntualmente de clorofila a con los siguientes métodos:

**Tabla 8.6. Determinaciones de biomasa**

| VARIABLE               | UNIDADES | METODO  |
|------------------------|----------|---|
| Clorofila a            | µg/L     | Extracción por medio de acetona alcalinizada (Lind 1985). |
| Productividad primaria | µg/L     | Botella clara y oscura (Lind 1985).                       |

## 6.6. Análisis químicos de sedimentos

### 6.6.1. Nutrientes

Al igual que los análisis de nutrientes en la columna de agua, en sedimentos se realizó en análisis de las diferentes formas de nutrientes, además de textura de sedimentos y materia orgánica (Tabla 8.7).

**Tabla 8.7. Determinaciones de variables para sedimentos.**

| VARIABLE                      | UNIDADES | TÉCNICA  |
|-------------------------------|----------|--|
| Textura                       | %        | Método bouyoucos (1928)  |
| Nitratos                      | mg /L    | Brucina al 4%  |
| Nitritos                      | mg /L    | Extracción con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Mudroch 1996)   |
| Fosfato total                 | µg/L     | Digestiones con persulfato de potasio y utilizando el método de amonio molibdato-ácido ascórbico (APHA 1995) |
| Ortofosfato                   | µg/L     | Digestiones con HCL 1N y utilizando el método de amonio molibdato-ácido ascórbico (APHA 1995)                |
| Amonio                        | mg /L    | Extracción con HCL y método de Nessler   |
| Nitrógeno inorgánico disuelto | mg/L     | Suma de nitratos y nitritos  |
| Nitrógeno                     | mg/L     | Suma de nitratos, nitritos y amonio  |

|                  |   |                  |
|------------------|---|------------------|
| inorgánico total |   |                  |
| Materia orgánica | % | Técnica Kononova |

## 6.7. ANALISIS ESTADISTICOS

- Para conocer el nutriente limitante se utilizaron las siguientes formulas (Brezonik 19949):

$[TN] / [TP] \geq 20$  El Fósforo es el factor limitante

$[TN] / [TP] \leq 10$  El nitrógeno es el factor limitante

$10 < [TN] / [TP] < 20$  Ambos son limitantes

- El modelo de fósforo y nitrógeno se realizara por medio de acuerdo a Hakansön (1994)
- Se realizaron análisis generales de descripción estadística como media, mínima, máxima y desviación estándar para todas las variables espacio-temporalmente.
- Además se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) para determinar la similitud o variabilidad entre las estaciones de muestreo, así como entre las etapas de circulación y estratificación en el lago. También se aplicó un análisis de cluster para agrupar las estaciones dependiendo de su dinámica en las variables analizadas.

## II. VII. RESULTADOS

### ***7.1. Análisis en la columna de agua***

De acuerdo a las evaluaciones realizadas para este trabajo (Tabla 7.1) la temperatura superficial promedio fue de 21.7°C con una desviación estándar de 0.3°C, en los diferentes sitios de muestreo, por lo tanto la variación en la temperatura superficial es mínima. La temperatura máxima registrada corresponde a la estación La Palma (21.8°C), mientras la temperatura mínima ocurre en la estación de Agua Verde (21.5°C).

**Tabla 7.1 Resultados de las variables analizadas ( $\pm$  desv. standasd) de la columna de agua en cuatro estaciones de muestreo del Lago de Zirahuén (2003-2004)**

| PARÁMETRO                            | ZIRAHUEN    | A. VERDE   | PALMA      | PROFUNDA   |
|--------------------------------------|-------------|------------|------------|------------|
| Profundidad (m)                      | 8.27±0.46   | 13.00±0    | 4.5 ±0.12  | 44.3±1.15  |
| Temperatura (°C)                     | 21.7±2      | 21.7±1     | 21.8±2     | 21.5±2     |
| Transparencia de Secchi (m)          | 2.7±0.4     | 3.3±0.3    | 2.6±2      | 5.7±2      |
| Conductividad (µS/cm)                | 120.0±0     | 120.0±0    | 121.75±2   | 119.75±2   |
| Potencial de Hidrógeno               | 8.17±0.16   | 7.77±0.96  | 8.3±0.4    | 8.3±0.4    |
| Oxígeno Disuelto (mg/L)              | 7.05±0.63   | 6.81±0.77  | 7.03±.03   | 4.6±2.47   |
| Alcalinidad total (mg/L)             | 52.53±1.0   | 52.48±1.2  | 54.63±1.2  | 50.32±1.2  |
| Bicarbonatos (mg/L)                  | 51.73±1.0   | 51.1±1.2   | 54.25±1.2  | 48.94±1.2  |
| Dureza total (mg/L)                  | 28.67±0.79  | 26.05±2    | 31.68±1    | 25.3±2     |
| Ortofosfatos (µg/L)                  | 0.93±0.41   | 0.48±0.22  | 1.56±0.57  | 0.58±0.65  |
| Fósforo total (µg/L)                 | 9.02±1.72   | 7.6±2.96   | 11.56±3.16 | 6.15±1.02  |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L) | 3.69±0.13   | 4.14±0.38  | 4.23±0.223 | 3.68±0.33  |
| Demanda Química de Oxígeno (mg/L)    | 29.98±3.93  | 23.75±4.85 | 30.08±4.85 | 23.75±4.16 |
| Nitratos (mg/L)                      | 0.075±0.04  | 0.04±0.07  | 0.095±0.19 | 0.07±0.03  |
| Nitritos(mg/L)                       | 0.061±0.1   | 0.027±0    | 0.0709±0   | 0.064±0    |
| Amonio (mg/L)                        | 0.015±0     | 0.012±0    | 0.0186±0   | 0.0147±0   |
| Nitrógeno inorgánico Total (mg/L)    | 0.152±0.17  | 0.079±0.18 | 0.186±0.15 | 0.147±2.5  |
| Nitrogen I D (mg/L)                  | 0.1366±0.17 | 0.066±0.19 | 0.17±0.16  | 0.126±0.26 |
| Calcio (mg/L)                        | 9.352±1.2   | 9.352±0.5  | 9.35±1.2   | 8.82±1.4   |
| Magnesio (mg/L)                      | 4.136±1.6   | 3.969±1.2  | 4.38±1.9   | 3.386±2    |
| Sólidos Suspendidos (mg/L)           | 2.54±0.1    | 0.57±0.2   | 0.6±0.2    | 2.3±0.2    |
| Clorofila a (mg/m <sup>3</sup> )     | 1.10±0.51   | 1.016±0.08 | 1.14±0.15  | 1.42±0.14  |

Los valores de potencial de hidrógeno (pH) en las estaciones de muestreo se encuentran dentro del rango básico. La variación de pH entre las estaciones fue de 0.53, se registró un máximo en las estaciones Profunda y la Palma, mientras que el valor mínimo se presentó en la estación de Agua Verde.

La concentración máxima de oxígeno disuelto en las estaciones de muestreo fue de 7.05 mg/L en la estación del muelle de Zirahuén, mientras que la concentración mínima fue de 4.6 mg/L a partir de los 28m en la estación Profunda que se encuentra asociada a la estratificación térmica en el lago, con 2mg/L de oxígeno disuelto en el fondo .

La concentración promedio de oxígeno disuelto en el lago fue de 6.4 mg/L, menor en 1.1mg O<sub>2</sub>/L al valor de saturación que de acuerdo a la temperatura y presión atmosférica de la zona (7.3 mg/L).

La alcalinidad promedio es de 52.49mg/L, está representada por bicarbonatos con ausencia de carbonatos, además de valor bajo de calcio y magnesio.

En cuanto a la concentración de dureza total la máxima fue de 31.68 mg/L, mientras que la concentración mínima fue de 25.3 mg/L (Tabla 7.1). De acuerdo a Sawyer y MacCarty (1967) el lago de Zirahuén (Tabla 7.2) tiene una dureza clasificada como suave o blanda.

## **7.2. Nutrientes en la columna de agua**

Los resultados de Fósforo total registrados presentaron un promedio de 8.58μg/L, alcanzando una concentración máxima de 11.56μg/L en la estación la Palma, y un valor mínimo de 7.58μg/L en la estación de Agua Verde.

En cuanto a las concentraciones de ortofosfato el valor promedio reportado fue de 0.88± 0.45μg/L, alcanzando la concentración máxima en la estación la Palma (1.374μg/L) y la mínima en Agua Verde (0.48μg/L)(Tabla 7.1).

La concentración promedio de nitrato entre las estaciones de muestreo fue de 0.155±0.3mg/L, mientras que los nitritos tienen una concentración promedio de 0.073±0.01mg/L.

El nitrógeno inorgánico disuelto tiene una concentración máxima de 0.17mg/L en las estaciones la Palma, mientras que la concentración mínima es de 0.069mg/L en la estación Agua Verde.

El promedio de las concentraciones de los sitios de muestreo para el nitrógeno inorgánico es de 0.127mg/L y varía entre ellos 0.05mg/L

En cuanto al nitrógeno inorgánico total la concentración máxima es de 0.185mg/L en las estaciones la Palma y la mínima es de 0.076mg/L en la estación el agua Verde. El Valor promedio entre las estaciones de muestreo fue de 0.146mg/L y varía en 0.1mg/L.

### 7.3 Análisis estadístico

El análisis estadístico de varianza de un factor demuestra que entre las estaciones Zirahuén, Agua Verde, Profunda y la Palma la diferencias entre ellos no es muy marcada (Tabla 7.3) Por lo tanto este análisis nos indica que no hay diferencia estadística entre ellas y se requiere de un análisis más detallado como el análisis de cluster.

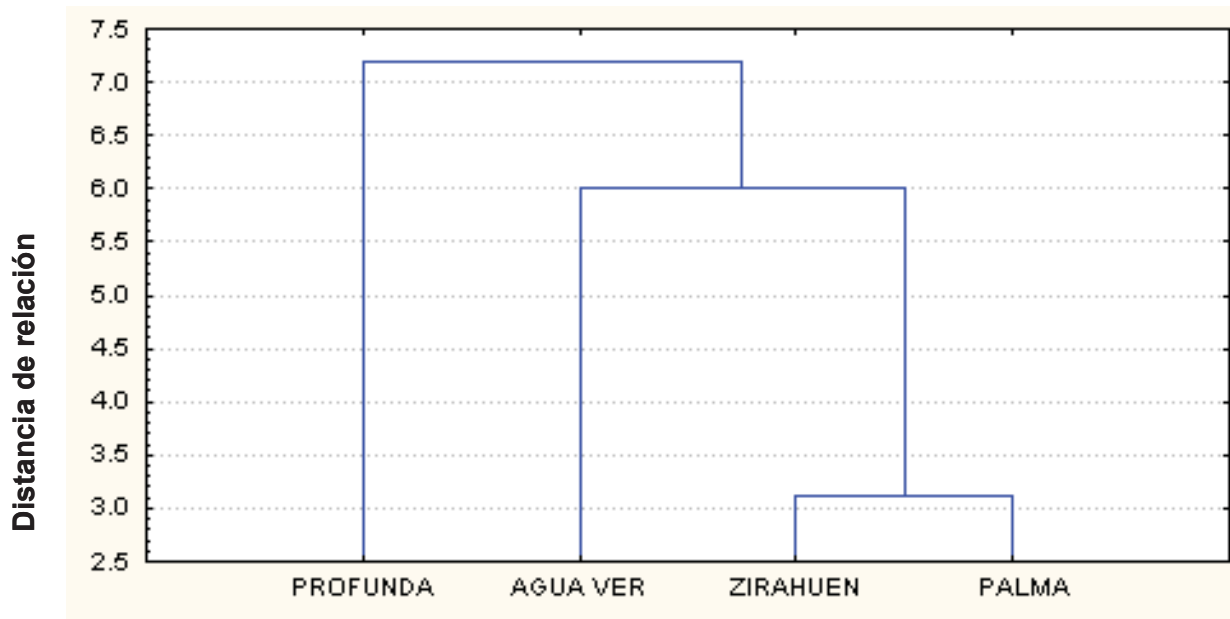
**Tabla 7.3.ANOVA entre las estaciones de muestreo en el lago de Zirahuén.**

| ANÁLISIS DE VARIANZA             |                          |                           |                                  |          |                     |                             |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------|---------------------|-----------------------------|
| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
| Entre estaciones                 | 31.266                   | 3.000                     | 10.422                           | 0.013    | 0.998               | 2.719                       |
| Dentro de las estaciones         | 65674.858                | 80.000                    | 820.936                          |          |                     |                             |
| Total                            | 65706.124                | 83.000                    |                                  |          |                     |                             |

El análisis de cluster agrupó las estaciones de manera relativamente homogénea, en tres grupos; el primero agrupa las estación de Zirahuén y la Palma a una

distancia de relación de 3.1; el segundo grupo representado por la estación de Agua Verde con una distancia de relación con el primer grupo de 6 y el tercer grupo se encuentra representado por la estación Profunda con una distancia de relación con el segundo grupo de 7.2 (Fig. 7.1).

**Dendograma de 4 casos**  
**Método Ward**



**Figura 7.1. Diagrama de cluster de las estaciones en el lago de Zirahuén.**

En el caso temporal donde se establece la etapa de circulación o mezcla y la estratificación del lago de Zirahuén, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existe una variabilidad o similitud de la dinámica entre las 23 variables. De tal manera que se pueda determinar una significancia entre las dos etapas (Tabla 7.5).

El valor de la F crítica en este análisis es mayor al valor de F, por lo tanto, esto indica que no existe variabilidad entre las dos etapas.

**Tabla 7.5 ANOVA de las 22 variables en los dos periodos (estratificación y circulación en el lago de Zirahuén.**

## ANÁLISIS DE VARIANZA

| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i>   | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------|---------------------|-----------------------------|
| Entre etapas                     | 4.71506986               | 1                         | 4.71506986                       | 0.00594594 | 0.9389205           | 4.08474565                  |
| Dentro de las etapas             | 31719.5756               | 40                        | 792.989391                       |            |                     |                             |
| Total                            | 31724.2907               | 41                        |                                  |            |                     |                             |

## 7.3.1 ANOVA nutrientes

En el caso temporal donde se establece la etapa de circulación o mezcla y la estratificación del lago de Zirahuén, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existe una variabilidad o similitud de dinámica de los nutrientes considerados en este trabajo. De tal manera que se pueda determinar una significancia entre las dos etapas (Tabla 7.7).

**Tabla 7.7 ANOVA de los nutrientes en las etapas de estratificación y mezcla.**

| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------|---------------------|-----------------------------|
| Entre etapas                     | 4697.614                 | 1                         | 4697.614                         | 5.307108 | 0.039               | 4.747                       |
| Dentro de las etapas             | 10621.862                | 12                        | 885.155                          |          |                     |                             |
| Total                            | 15319.476                | 13                        |                                  |          |                     |                             |

En los resultados del análisis realizado en los nutrientes se registró una varianza para la circulación de 17.194 y para la estratificación de 8.259 (Tabla 7.8)

### III. 7.4 Nutriente limitante

En cuanto a la relación N:P en el lago de Zirahuén, primeramente se determinó que en la columna de agua el nutriente limitante de acuerdo a Brenzonik (1994), para la estación Profunda el fósforo es el nutriente limitante, mientras que para Agua Verde el nutriente limitante es el nitrógeno, en las estaciones la Palma y el muelle de Zirahuén se calculó que ambos nutrientes son limitantes, por lo tanto el nitrógeno como el fósforo limitan la productividad primaria (Tabla 7.9).

**Tabla 7.9. Nutrientes limitantes dentro de la columna de agua.**

|               | ZIRAHUEN      | A. VERDE  | PROFUNDA | PALMA         | LAGO DE ZIRAHUEN |
|---------------|---------------|-----------|----------|---------------|------------------|
| Fósforo total | 9.02          | 7.96      | 6.15     | 11.56         | 8.67             |
| Nitrógeno I T | 151.00        | 797.00    | 185.00   | 147.00        | 320.00           |
| N:P           | 16.70         | 9.90      | 30.08    | 12.71         | 16.20            |
| Resultado     | CO-LIMITACIÓN | NITROGENO | FOSFORO  | CO-LIMITACIÓN | CO-LIMITACIÓN    |

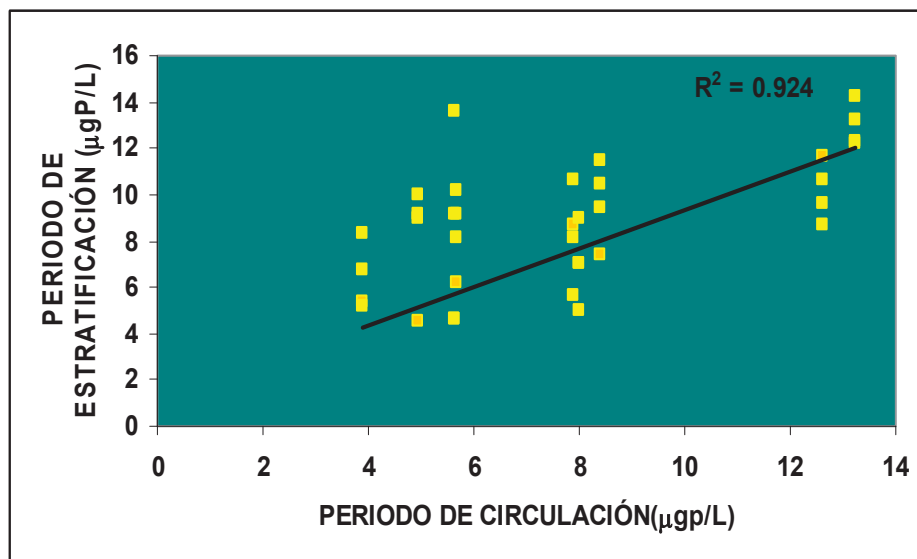
Para el lago de Zirahuén en promedio se reporta una co-limitación de los nutrientes, es decir ambos nutrientes tanto el nitrógeno como el fósforo son el nutriente limitante.

Mientras que en el periodo de estratificación térmica la relación N:P registra una limitación de ambos nutrientes, en la mezcla principalmente una limitación por el fósforo.

Las concentraciones del fósforo durante el periodo estratificación térmica ( $8.04\mu\text{g/L}$ ) en la columna de agua tienden a disminuir, mientras que durante el mezclado las concentraciones ascienden ( $10.82\mu\text{g/L}$ ) ( $r^2=0.92$ ).

El valor mínimo de concentración de fósforo total fue de  $3.91\mu\text{g/L}$  durante la estratificación a una profundidad de 43m y el valor máximo  $13.25\mu\text{g/L}$  se registró a 4m de profundidad, mientras que durante la circulación los valores mínimo  $8.34\mu\text{g/L}$  y máximo  $14.29\mu\text{g/L}$  se registrarón en las mismas profundidades (Fig. 7.2)

**Figura 7.2 Valores de fósforo en las etapas de estratificación y mezclado**



Las concentraciones del nitrógeno inorgánico total durante el periodo estratificación térmica ( $0.108\text{ mg/L}$ ) en la columna de agua tienden a disminuir, mientras que durante la circulación las concentraciones ascienden  $1.39\text{ mg/L}$  ( $r^2=0.84$ ). El valor mínimo de nitrógeno total fue de  $0.86\text{ mg/L}$  durante la estratificación a una profundidad de 43 m y el valor máximo de  $13.25\text{ mg/L}$  se registró a 4m de profundidad, mientras que durante la circulación los valores mínimo  $0.101\text{ mg/L}$  y máximo  $0.20\text{ mg/L}$  se registraron en las mismas profundidades (Fig. 7.3)

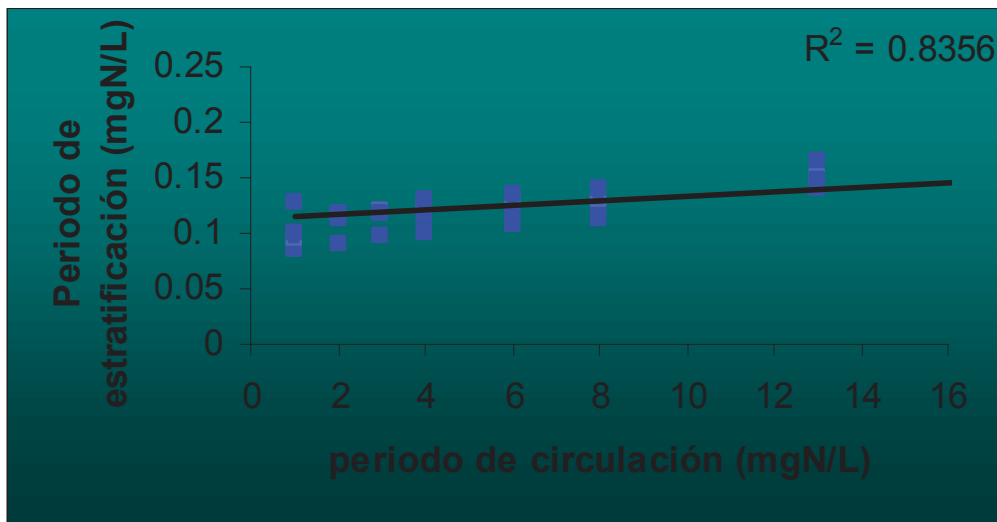
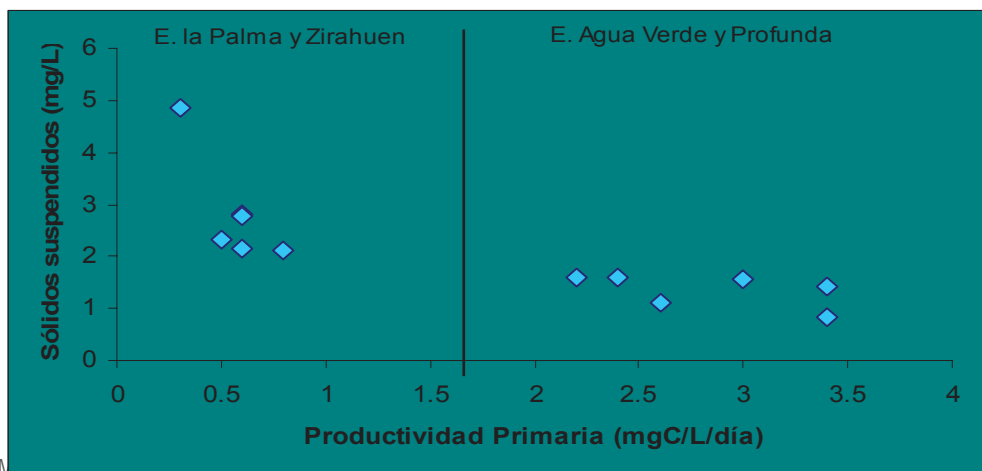


Figura 7.3 Valores de nitrógeno en las etapas de estratificación y mezclado

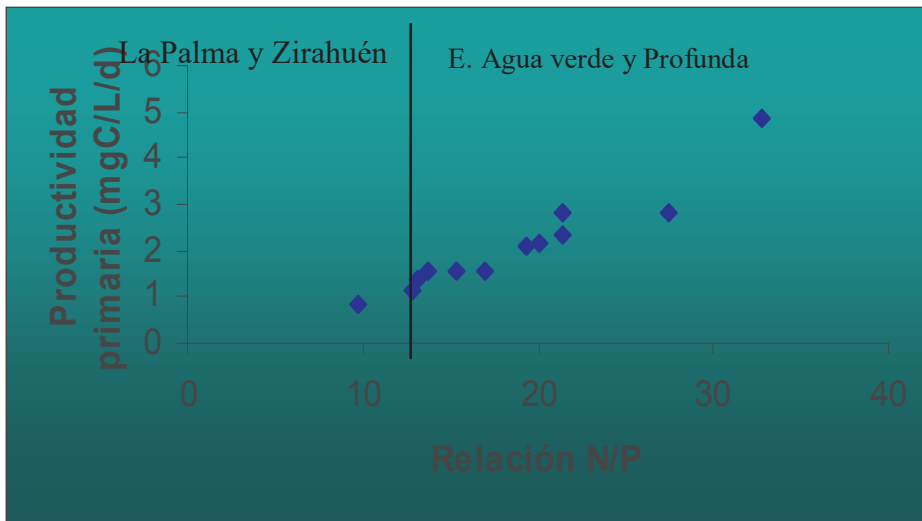
### 7.5. Productividad primaria

La productividad primaria en el lago de Zirahuén registró un valor de  $1.56 \text{ mgC/m}^3/\text{d}$  que comparado con el lago Superior EUA (3.1-260) que es un lago oligotrófico es menor, por lo tanto el lago de Zirahuén se encuentra dentro del grupo correspondiente a esta clasificación. La productividad primaria se encuentra controlada por los nutrientes (nitrógeno y fósforo) en la estación de Agua Verde y la Profunda, mientras que en las estaciones de la Palma y Zirahuén esta controlada por la transparencia debido a la cantidad de sólidos suspendidos presentes (Fig.7.4 y 7.5)



IV.  
V.

VI. **Figura 7.4 La productividad primaria controlada por lo sólidos suspendidos**



VII.  
VIII. **Figura 7.5 La productividad primaria controlada por la relación N/P**

IX. **7.6 Análisis de sedimentos**

La textura y composición de los sedimentos esta determinada por numerosos factores, entre los que destacan: la geografía, la geología, el grado de influencia humana en el área, las características hidrológicas e hidrodinámicas, las entradas alóctonas y la producción autóctona, la tasa de sedimentación, la dinámica del fondo y la sedimentaria (Hakanson y Jansson, 1983).

De acuerdo al triangulo textural Shepard (1954), el sedimento se clasifico de los sitios de muestreo para este trabajo como predominantes de arenas con un 55% de arenas en la estación la Palma, Agua Verde y Profunda, mientras que en el muelle de Zirahuén predominan los limos con 51% y el 49% de arenas (Fig 7.6)



**Figura 7.6 Triángulo de textural Shepard (1954). El círculo azul indica el tipo de textura para el sedimento del lago de Zirahuén.**

### **7.7 Materia orgánica**

En cuanto a la materia orgánica, la estación de Agua Verde y la estación Profunda se registran con el valor más bajo (5,2 y 5.7 %), mientras que los valor más altos (7.3 y 10.4%) se reportan en la estación de Zirahuén y la Palma (Fig. 7.8), ocurriendo que en estas estaciones son también las áreas que se encuentran sometidas a mayor actividad de origen antropocéntrico.



Figura 7.6. Porcentaje de materia orgánica.

### 7.8 Nutrientes en sedimentos

Los resultados de fósforo total en sedimentos tienen una concentración máxima en la estación la palma de 19.92mg/K, en la estación del muelle de Zirahuén se reporta 12.60 mg/K de fósforo total y en la estación Profunda re registró un valor de 11.71 mg/K, mientras que la concentración más baja se encuentra en la estación de Agua Verde con 8.31mg/K (Tabla 7.4)

**Tabla 7.4 Nutrientes en sedimentos del lago de Zirahuén, Michoacán**

| <b>Nutrientes</b>                    | <b>Profunda</b> | <b>Agua Verde</b> | <b>Zirahuén</b> | <b>Palma</b> |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------|
| Fósforo total(mg/K)                  | 11.71           | 8.31              | 12.60           | 19.92        |
| Ortofosfato (mg/K)                   | 0.43            | 0.40              | 0.48            | 0.56         |
| Nitratos (mg/k)                      | 20.00           | 23.00             | 10.00           | 19.00        |
| Nitritos (mg/K)                      | 4.00            | 6.00              | 5.00            | 4.00         |
| Amonio (mg/K)                        | 8.00            | 7.00              | 5.00            | 3.00         |
| Nitrógeno inorgánico disuelto (mg/K) | 24.00           | 29.00             | 15.00           | 23.00        |
| Nitrógeno inorgánico total (mg/K)    | 32.00           | 36.00             | 20.00           | 26.00        |

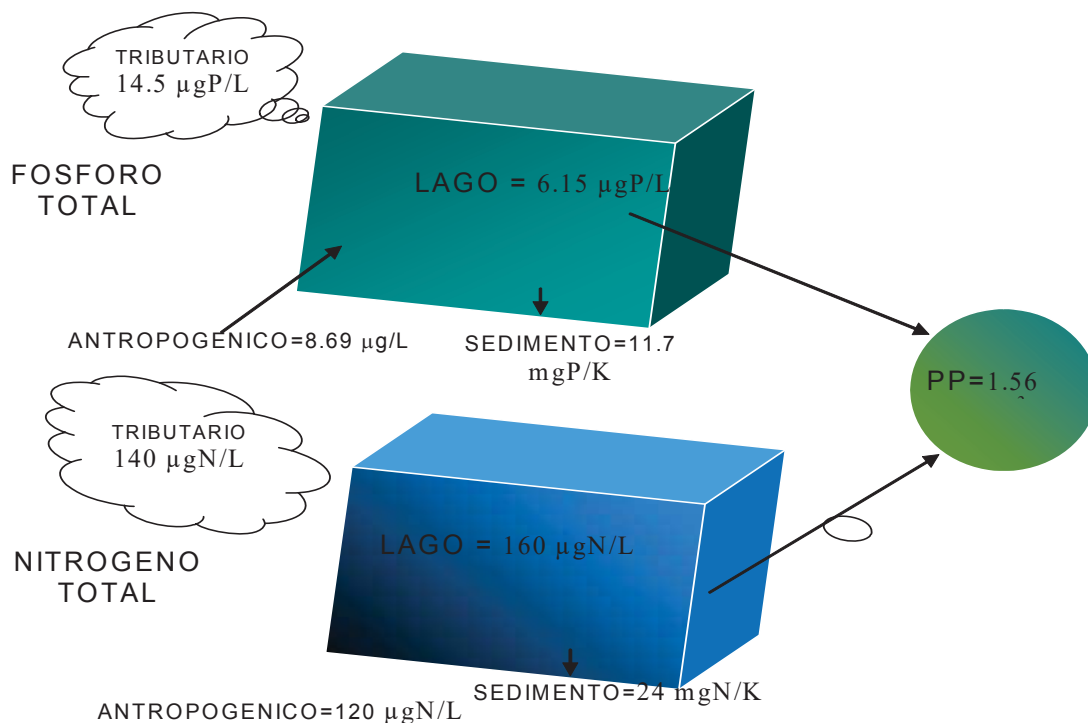
En cuanto a las concentraciones de ortofosfato la concentración promedio reportada fue de 0.47mg/K en las estaciones de muestreo con una concentración máxima en la estación la palma de 0.56mg/K y la mínima en Agua Verde (0.40 mg/K). En cuanto al nitrato la concentración máxima es de 0.23mg/K en la estación de Agua Verde, y la mínima 0.19mg/K en la estación de Zirahuén, mientras que los nitritos tienen una concentración máxima de 6mg/K en la estación de Agua Verde y una mínima de 4mg/K en la estación Profunda (Tabla 7.4)

En cuanto al amonio la concentración máxima es de 8mg/K en la estación Profunda, y la concentración mínima es de 3mg/K en la estación de la Palma. Para el nitrógeno inorgánico disuelto la concentración máxima es de 29mg/K en la estación de Agua Verde y la concentración mínima es de 15mg/K en la estación la Palma. El nitrógeno inorgánico total tiene una concentración máxima de 36 mg/K en Agua Verde y una mínima de 20 mg/K en la estación la Palma (Tabla 7.4).

## 7.9 Modelo de la dinámica de nutrientes

En cuanto a las entradas de nutrientes el arroyo la Palma ( $14.5 \mu\text{gP/L}$ ) junto con el antropogénico ( $8.69 \mu\text{gP/L}$ ) representan el 100% de fósforo como entrada al lago, a partir de este supuesto se calcula que el 26.5% de fósforo se encuentra presente en la columna de agua ( $6.15 \mu\text{gP/L}$ ). En la contraparte de nutriente que es el nitrógeno presenta un ingreso proveniente del arroyo ( $120 \mu\text{gP/L}$ ) y de origen antropogénico ( $140 \mu\text{gP/L}$ ) simulando el 100%, de este porcentaje se calcula que el 61.53% se encuentra en la columna de agua ( $160 \mu\text{gP/L}$ ).

Éstos nutrientes (N:P) en parte son asimilados por la productividad primaria y otra parte se sedimenta por lo tanto el 50.45% de fósforo ( $11.7 \text{mgP/K}$ ) y el 9.23% de nitrógeno ( $24 \text{mgN/K}$ ) se calcula que se encuentran en el sedimento (Fig. 7.9).



**Figura 7.9 Modelo de evaluación de la dinámica de nutrientes en el lago de Zirahuén, Michoacán**

## VIII. DISCUSIONES

El lago de Zirahuén de acuerdo a los resultados de este trabajo tiene una transparencia de 5.6m, durante 11 años la transparencia ha sido registrada por Ordóñez et al 1982, Bernal 1988, Chacón et al 1993 quienes reportaron una transparencia de Sechee de 6-6.5m, en el caso de Campos et al 1977, Bernal et al 2000 y Vergara 2003 reportaron valores menores (5m), esta disminución de transparencia se debe básicamente al aumento de aporte de los sólidos y que coinciden con la construcción de la carretera Morelia-Uruapan en 1997, aunado a esto se encuentra el deterioro de la cuenca debido a actividades de deforestación, ambas acciones han contribuido a que el lago de Zirahuén pierda aproximadamente 1.1m de su transparencia y esta no se pueda recuperar.

La dureza del lago se encuentra en la clasificación de blanda de acuerdo a su concentración dentro del lago.

### Clasificación de las aguas según su concentración de $\text{CaCO}_3$

| Categoría             | Concentración (mg $\text{CaCO}_3$ /L) |
|-----------------------|---------------------------------------|
| <b>Suave o Blanda</b> | <b>0-75</b>                           |
| Poco dura             | 75-150                                |
| Dura                  | 150-300                               |
| Muy dura              | Más de 300                            |

Clasificación utilizada por Sawyer y MacCarty (1967)

En cuanto a la conductividad actual en el lago es han ligeramente aumentado en un periodo de 12 años de 110 a 120  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$  (Bernal 1988, Chacón 1993, Campos et al 1977, Bernal et al 2000), esto indica que las concentraciones de iones disueltos aumentaron de 1.77 mgCa/L (Chacón et al 1990-1993) a 9.4 mgCa/L que se encontró para este estudio. Sin embargo, a pesar de esto el lago mantiene sus aguas blandas (0-75 mg $\text{CaCO}_3$ /L).

En cuanto al amonio la concentración promedio es de  $0.0175 \pm 0.01 \text{ mg/L}$  es importante resaltar que en el lago no se reportan concentraciones arriba de  $0.025 \text{ mg/L}$  de amonio que es una concentración tóxica para los organismos acuáticos.

En cuanto a los nutrientes se presentan una dinámica activa, ya que la relación N:P se encuentra zonificada ya que en Agua Verde el nutriente limitante en ambos periodos tanto estratificación como circulación del lago es el nitrógeno, sin embargo, en el resto del lago se presenta una co-limitación ya que se observó que tanto nitrógeno como fósforo en ambas etapas del lago, encuentran limitando la productividad primaria.

Estas conclusiones coinciden con el estudio realizado por Dávalos-Lind et al. (1998) quienes reportaron que existe una co-limitación de nitrógeno y fósforo en el lago de Zirahuén para la productividad primaria.

Esto también concuerda con otros autores donde se confirma que el lago de Zirahuén es “un lago que rompe las reglas” (Caraco, Cole y Likens 1991; Martínez 2004), esto se debe a que el fósforo aparentemente se encuentra retenido en los sedimentos por bajas concentraciones de sulfatos o en su caso fierro que son los que promueven la movilización de fósforo, y un aumento en las concentraciones de sulfatos y fierro aumentaría la concentración de fósforo en la columna de agua.

Por otro lado, el sedimento presenta una textura que se clasifica dentro de las areno-limosas esto sucede en todos los sitios de muestreo indicando una homogeneidad en su textura, en cuanto a la materia orgánica los altos porcentajes se encontraron en las estaciones del muelle de Zirahuén y la Palma, esto por ser zonas donde existe la mayor actividad antropocéntrica y la influencia del arroyo la Palma quien refleja el impacto de la cuenca alta del lago de Zirahuén.

El fósforo en los sedimentos se encuentra en altas concentraciones, sin embargo y a pesar de los periodos de anoxia en la interfase sedimento-agua, éste no se libera significativamente a la columna de agua, lo cual quiere decir que el sedimento lo mantiene retenido quizás por la falta de algún ion movilizante.

En el caso del nitrógeno aparentemente no sufre una retención en los sedimentos ya que este nutriente tiene un ciclo en donde actúan las bacterias que se encargan de transformar a los diferentes compuestos nitrogenados, pasa lo contrario con el fósforo ya que tiene un ciclo que se clasifica como sedimentarios en donde no se presentan procesos por actividad biológica. Por lo tanto se puede considerar que en los sedimentos el nitrógeno es limitado.

## **IX. CONCLUSIONES**

- El lago de Zirahuén es uno de los lagos que se mantiene con el paso de los años como transparente y profundo, y se ve afectado por las actividades de agricultura, industrial-artesanal, y descargas de agua domesticas que a través de sus escurrimientos y el arroyo la Palma llegan hasta éste ecosistema lacustre.
- El agua se mantienen ligeramente básicas por su pH y de tipo blandas por su dureza.
- El oxigeno disuelto en el fondo del lago se ve afectado por la estratificación del lago ya que el hipolimnio se vuelve anóxico, no así durante la meromixis en la cual no es muy diferente que la de la superficie.
- La relación de los nutrientes (N/P) en la columna de agua es co-limitante, sin embargo existen son áreas donde él nutriente limitante es el nitrogeno lo cual es clásico en lagos tropicales oligotrofos, esto nos indica que efectivamente el lago de Zirahuén presenta una transición entre oligotrofia a mesotrofia.
- La productividad primaria sugiere que el lago de Zirahuén es un lago oligotrófico. Mientras que por la relación N/P, el lago es clasificado como oligo-mesotrófico.
- El fósforo se encuentra retenido en los sedimentos, sin una liberación total a la columna de agua, a pesar de la anóxia probablemente por la falta de iones movilizantes, lo que ha ayudado al lago amortiguar el impacto de deterioro que sufre en su cuenca.
- El sedimento tiene una textura de tipo areno-limoso.
- La materia orgánica tiene mayor porcentaje en la estación la Palma, debido a que es la entrada del arroyo la Palma en donde se arrastran los desechos de algunos poblados como son Santa Clara del cobre y aledaños.

## X. LITERATURA CITADA

Alvarado V. R. 1996. Análisis espacio-temporal del fitoplancton en el lago de Zirahuén Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. UMSNH México. pag.106.

American Public Health Association (1995) Standard methods for examination of water and wasrterwater. Washington Dc. 19<sup>th</sup> edition.

Antaramian H. E. y Ortega J. M. 1996. Riesgo de erosión en la cuenca del lago de Zirahuén y cambio de área y volumen del lago. Ciencia Nicolaíta No. 11. UMSNH México. pag. 83 -94 .

Ayala R. G. L. 2002. Evaluación de la concentración de cobre en el lago de Zirahuén y el arroyo La Palma. Tesis de maestría, Facultad de Biología UMSNH México. pag.120.

Bernal B.F.W. 1988. Limnology of Lake Zirahuén relative to cultural impacts. Tesis de Maestría en Ciencias. University of Guelph. Canada. pag.132 .

Bernal-Brooks y MacCrimmon. 2000. Lake Zirahuen (México): a pristine natural reservoir visually intensive to expected cultural eutrophication. En: M. Munawar, Lawrence, S. G., Munawar. I. F., y D.F. Maller. Aquatic ecosystem of México. Status & Scope. The Netherlands. pag. 77-88.

Campos Mendoza A., Gutiérrez Hernández A., y Hernández Díaz I. 1997. Limnología física del lago de Zirahuén, Michoacán, México. Tesis de licenciatura, Facultad de Biología, UMSNH México. pag.97.

Chacón T.A y Muzquíz I.E. 1991. El lago de Zirahuén, Michoacán. Reconocimiento de una cuenca michoacana. Biología Acuática No.2. Sría de Difusión Universitaria, UMSNH. Universitaria. Morelia, Michoacán, México. pag.30 .

Chacón T. A., Rosas M. C., Rendón L. M. B. 2001. La cuenca del lago de Zirahuén: Una propuesta de área natural protegida. Ciencia Nicolaita No.28 UMSNH México. pag. 127-143.

Champion M. y Currie D. J. 2000. Phosphorus-chlorophyll relationships en lake, rivers and estuaries. En: Verh. International limnology. Vol. 27. pag 1986-1989.

Cole G A. 1983. Texbook of limnology. Ed. Mosby. 3<sup>a</sup> ed. United Status of American.

Cruz A .J. O. 1995. Balance hídrico en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología. UMSNH. pag. 80 .

De Buen F. 1943. Los Lagos Michoacanos I. Caracteres Generales. Revista de la Sociedad Michoacana de Historia Natural. México. pag. 211-233.

Dillon J. P., Reid R. A. y Evans H. E. 2000. The relative magnitude of phosphorus sourcea for small, oligotrophic lakes in Ontario, Canada. En: Verh International limnology.. Vol. 25. pag 355-358

Foth Henry D. 1986. Fundamentos de la Ciencia del Suelo. Ed. CECSA México Segunda reimpresión.

García E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. UNAM. México. pag. 219.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1985 Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán. Secretaría de Programación y Presupuesto. México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990. Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán. Secretaría de Programación y Presupuesto. México.

Goldman C. R. and Horne A. J. 1983. Limnology. Ed. McGraw-Hill United States of America.

Hakanson, Lars y Peters H. Robert. 1995. Predictive limnology. Methods for predictive modelling. Ed. SPB Academic publishing.

Irvine K. Allott N. Mills P. and Free G. 2000. The use of empirical relationships and nutrient export coefficients for predicting phosphorus concentrations in Irish lake. En: limnology. Verh. International. Vol. 27. pag. 1127-1131

López S. G. 1981. Dinámica hidrológica del lago de Zirahuén. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana. México. pag. 61.

Martino P. 2001 metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación de lagos cálidos tropicales. Organización Panamericana de salud

Madrigal G. X. (2001) Vegetación Acuática del Lago de Zirahuén, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología, UMSNH. pag. 110.

Mendoza G. A., Huerta M. L., Flores G. C. (1985). Estudio florístico del fitoplanctón del Lago de Zirahuén, Michoacán, México: Phytologia V.59 N<sup>a</sup> 1 An International Journal to expedite. Botanical y Phytoecological Publication México pag. 1-8.

Mudroch, Alena y José Azcue. (1995) Manual of Aquatic Sediment Sampling. Ed. Lewis publishers. United States of America. pp

Muzquiz I. L.E. 1994. Evaluación del aprovechamiento de los recursos naturales de la cuenca del Lago de Zirahuén, Michoacán. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Chapingo, México. pag.155 .

Muzquiz I.L.E. 1994. El manejo Agrícola en la Cuenca del Lago de Zirahuén. En: Aprovechamiento de los recursos naturales en la agricultura mexicana (comp. Atenógenes Licona, Jorge Duch y Juan Larios). Programa de Recursos Naturales y Agrícolas. Dirección de de Centro Regionales. Universidad Autónoma de Chapingo. pag. 29-60.

Muzquiz I. L.E. 1995. Evaluación del aprovechamiento de los recursos naturales de la cuenca del Lago de Zirahuén, Michoacán. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Chapingo, México. pag.155.

Owen T. Lind 1985. Handbook of common methods & Limnology. U.S.A. pag.198.

Pérez C.E. 1991. Flora y Vegetación de la Cuenca del Lago de Zirahuén, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México. pag.155.

Pizzolon L. A. y Arias L. B. 2000. Nutrient fluxes in Puelo lake watershed, Patagonian Andes, Argentina. En: Verh. International limnology. Ed. SPB Academic publishing. Vol. 27. pag 1310-1314.

Rosas-Monge C. 1997. La Cuenca del Lago de Zirahuén: los avances del deterioro. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Biología. UMSNH. México. pag.187.

Ruiz Sevilla, G. 2002. Variaciones morfométricas del lago de Zirahuén, Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Biología. UMSNH. pag.100.

Santos, M. A. R. 1995. Estudio de contaminación por materia fecal utilizando como indicadores a las bacterias coliformes en el Lago de Zirahuén, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. UMSNH. pag. 66

Wisniewski Ryszard. 2000. Experiments on phosphate immobilization during sediment resuspension in two shallow lakes. En: Verh. International limnology. Vol. 27 pag. 682-688

Straskraba, Dostalkova 1995. The effect of reservoirs on Phosphorus Concentration. En: Int. Revue ges. Hydrobiology. Vol. 80. pag. 403-413

Vaithyanathan, Richardson 1997. Nutrient profiles in the everglades: examination along the eutrophication gradient. En: Elsevier. the Science of the Total Environment. Vol. 205. pag 81-95

Wetzel, G. 2001. Limnology. Lake and River Ecosystems. 3<sup>a</sup> ed. Elsevier Science. AUS. Pag.1006.

Yusita P.M, White D.S., Kipphut G.W., Jhonston K., Rice G. yHendricks P.S. 2004. Nutrients patterns in a Mainstem Reservoir, Kentucky lake, USA, over a 10-years period. Lake and Reservoir Management an international journal. 20(2): 148-163. Madison Wisconsin.