



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOBRE LOS RECURSOS NATURALES

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN LIMNOLOGÍA Y ACUICULTURA**

**DINÁMICA DE NUTRIENTES EN EL LITORAL
LACUSTRE DEL LAGO DE PÁTZCUARO,
MICHOACÁN.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN LIMNOLOGÍA Y ACUICULTURA**

PRESENTA

Q.F.B. HERIBERTO MEDINA ROMERO

DIRECTOR DE TESIS

DR. ARTURO CHACÓN TORRES

MORELIA, MICH., MÉXICO; FEBRERO 2006



INDICE

	PÁGINA
I.- INTRODUCCIÓN	1
II.- ANTECEDENTES	7
III. OBJETIVOS	52
IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA	53
4.1. Localización geográfica	53
4.2. Fisiografía	54
4.3. Morfometría	55
4.4. Geología y suelos	58
4.5. Hidrología	60
4.6. Clima	62
4.7. Vegetación	63
4.8. Asentamientos humanos	66
4.9. Calidad del agua	68
4.10. Ictiofauna y pesquerías	73
V. MATERIALES Y MÉTODOS	77
5.1. Cartografía	77
5.2. Sitios de muestreo	78
5.3. Morfometría	79
5.4. Hidrodinámica	79
5.5. Análisis del agua	80
5.6. Análisis de sedimentos	81
5.7. Registros de campo	81
5.8. Trabajo de laboratorio	82
5.8.1. Análisis de agua	82
5.8.2. Análisis sedimentos	88
VI. RESULTADOS	90
6.1. Cartografía	90
6.2. Morfometría	90
6.3. Hidrodinámica	92
6.3.1. Frecuencia de vientos	92

6.3.2. Deriva superficial	92
6.3.3. Longitud de viento	93
6.4. Características del agua	95
6.4.1. Temperatura	96
6.4.2. Conductividad eléctrica	97
6.4.3. pH	97
6.4.4. Sólidos suspendidos	98
6.4.5. Alcalinidad	98
6.4.6. Oxígeno disuelto	99
6.4.7. Clorofila a	99
6.4.8. Nitrógeno	100
6.4.9. Fósforo	101
6.4.8. Productividad primaria	103
6.5. Sedimentos	103
6.5.1. Nitrógeno en sedimento	104
6.5.2. Fósforo en sedimento	105
6.5.3. Materia orgánica en sedimento	106
VII. DISCUSIÓN	107
VIII. CONCLUSIONES	113
IX. RECOMENDACIONES	116
X. REFERENCIAS	122

I. INTRODUCCIÓN

1.1. La zona litoral lacustre

La zona litoral de un lago corresponde a un espacio de interfase entre el medio terrestre de la cuenca de drenaje y la zona de aguas abiertas del ecosistema acuático. La relación de su superficie con respecto a la extensión de la masa de agua o zona limnética es variable en función del lago de que se trate. De la misma manera, las características de la zona litoral dependen de la geomorfología de la cuenca y de las tasas de sedimentación que tienen lugar desde el origen del lago. La mayoría de los lagos en el mundo poseen áreas relativamente pequeñas y una baja profundidad promedio.

Por lo tanto, la comunidad biológica litoral es la generadora de materia orgánica y contribuye de manera significativa a la productividad de los lagos y a la regulación del metabolismo del ecosistema lacustre.

En la zona litoral, las plantas acuáticas frecuentemente se encuentran restringidas a tres regiones distintas. En la región más somera que registra una profundidad máxima de un metro se encuentran las macrofitas emergentes que utilizan los recursos del hábitat tanto acuático como terrestre. La gran disponibilidad de agua y nutrientes en los sedimentos acuosos, asociado a una amplia cantidad de oxígeno y dióxido de carbono resulta en un incremento sostenido de la biomasa vegetal. Las angiospermas emergentes de las zonas litorales constituyen las plantas más productivas de la biosfera. Hacia el interior del lago, en intervalo de profundidad de 1 a 3 m, existe una segunda fase de la zona del litoral compuesta por vegetación sumergida de hojas flotantes. Estas plantas normalmente son perennes y se encuentran firmemente enraizadas por extensos sistemas de rizomas; sus hojas flotantes alcanzan la superficie debido a los pecíolos que son largos y flexibles. A partir de los 3m de profundidad y extendiéndose hasta el límite de la zona eufótica o profundidad a la que penetra con eficiencia la luz solar, se encuentra la región de macrofitas sumergidas enraizadas.

Las angiospermas sumergidas ocasionalmente se encuentran en profundidades superiores a los 10m, en parte por la limitada transparencia del agua o por los efectos de la presión hidrostática sobre el transporte de los gases.

Los musgos y las macroalgas sumergidas aunque viven en profundidades diversas, tienen la capacidad de desarrollarse en bajas intensidades de luz, estableciendo colonias con frecuencia en los límites inferiores de la zona eufótica.

Las macrofitas flotantes no enraizadas incluyen angiospermas, helechos y algunas hepáticas, cuyo tamaño oscila desde una diminuta lenteja de agua hasta grandes poblaciones flotantes (Wetzel, 1981).

En los lagos, ríos, embalses y humedales por tradición se vierten descargas de aguas residuales, industriales y domésticas, lo cual asociado al proceso de deterioro de las cuencas hidrográficas que por el escurrimiento de su superficie acarrearán mayores aportes de sólidos y nutrientes, ha provocado que estos sistemas se encuentren en un proceso acelerado de deterioro (De la Lanza y García, 2002).

Las prácticas agrícolas pueden alterar la composición de las aguas de escurrimiento, incluyendo la aplicación de abonos que aumenta la cantidad de nitratos, fosfatos y otros compuestos fertilizantes, además de materia orgánica y minerales, contribuyendo significativamente a la eutroficación de los sistemas acuáticos (Domínguez, 1995).

Uno de estos ecosistemas acuáticos más afectados por estos procesos son los humedales, estos se les ha considerado como zonas de litoral en donde el suelo presenta una saturación de agua que es el factor dominante para determinar la naturaleza del desarrollo de organismos que viven en la interfase suelo-agua y sobre el suelo (Azous y Horner, 2001).

Las zonas litorales de los ecosistemas acuáticos, además de sus humedales representan un hábitat de transición entre el medio terrestre y el medio acuático, donde confluyen procesos químicos y biológicos que son de fundamental importancia para el funcionamiento de un lago. Estas zonas son de alta fragilidad, ya que reciben las primeras cargas de azolve y deposición, el estancamiento hidráulico, la descomposición de materia orgánica, evaporación y desecación.

Los humedales varían en función de su origen, tamaño, localización geográfica, régimen hidrológico, química, características de la vegetación, del suelo y de los sedimentos. Se presentan en todos los climas y en todos los continentes abarcando desde una hectárea hasta miles, desde sistemas sumamente productivos hasta los más pobres. Ello ha complicado la investigación de los procesos fundamentales que son comunes a sistemas muy diferentes, contribuyendo a la falta de desarrollo de una disciplina uniforme sobre los humedales (Maltby 1991) y a una clasificación que refleje conjunto similares de características.

Los humedales son un ecosistema de alto beneficio frente a esta problemática ya que controlan la erosión a través de procesos de disipación y retención de sólidos. Estos ecosistemas litorales conocidos por su habilidad de captura de sedimentos y filtración de contaminantes mejoran la calidad de agua en lagos y ríos.

La destrucción de estos valiosos hábitats tiene como consecuencia el deterioro de las características del agua, reducción de flujos de agua por el estancamiento hidráulico y la interrupción de los procesos biológicos como la descomposición aerobia, resultando en el alteración del estado trófico del ecosistema y poniendo en riesgo de extinción a las especies que ahí ocurren.

Por lo anterior, es de fundamental importancia la generación de criterios que permitan mantener las zonas de litoral de los sistemas acuáticos que aún se encuentran en estado natural, así como definir estrategias eficientes que permitan la restauración ecológica para el mantenimiento de los procesos bioquímicos de estas regiones.

La pérdida y degradación de los humedales ha resultado en la reducción de beneficios y relaciones funcionales asociados a servicios ambientales tales como hábitat de aves, peces y vida silvestre, así como de comunidades vegetales. Estos ecosistemas son altamente productivos debido al enriquecimiento de materia orgánica y nutrientes, estos nutrientes pueden ser regulados y transferidos por medio de los humedales a los lagos participando en la productividad acuática.

Por lo tanto, se requiere de programas de protección y manejo adecuados para los de humedales debido a su importancia ecológica, para recuperar estos sistemas existen técnicas de restauración ecológica que tienen como objetivo principal la recuperación de un ecosistema que se encuentra en un estado funcional inestable y su transformación en un estado funcional de alta estabilidad. Un ecosistema funcional se caracteriza por sostener procesos naturales autosuficientes y permanentes, además de asociarse con eficiencia entre sus componentes acuático, terrestre y ripario (Ksuffman *et al* 1997).

Las causas que ocasionan el deterioro del ecosistema acuático incluyen actividades tanto del aprovechamiento del agua como del suelo que generalmente resultan en la erosión de éste. La cuenca es afectada por prácticas de uso del suelo en donde el aprovechamiento forestal, la agricultura y el pastoreo son incompatibles y destructivos, la desviación de tributarios, el vertido de agua negra, además del azolve aceleran la degradación del hábitat acuático (NOAA-EPA-ACE-USFWS-NRCS, 2002).

2.1. El lago de Pátzcuaro

Michoacán posee entre sus recursos naturales con un gran potencial acuícola incluyendo 14 lagos naturales, 44 ríos, 261 embalses y más de 600 manantiales con gastos de agua hasta de 100 L/s. A ello se debe que Michoacán en lengua P'urhécha signifique "Tierra de señores que pescan".

El lago de Pátzcuaro es uno de los sistemas acuáticos más importantes de México, por sus atributos ambientales, económicos, culturales y sociales. Sus aguas han sido aprovechadas desde la época precolombina, incluyendo la captura de valiosas especies, únicas en el país y en el mundo, como el pez blanco (*Chirostoma estor estor*), la acúmara (*Algansea lacustris*), la chehua (*Allophorus robustus*), el tiro (*Goodea luitpoldii*) y el achoque (*Ambystoma dumerilii*) (Orbe y Acevedo, 2002).

Sin embargo, el lago de Pátzcuaro ha sido objeto de una intensa e irracional explotación que en la actualidad lo ha conducido a un estado acelerado de degradación ecológica. Algunas de las causas que se han identificado como responsables del deterioro del lago de Pátzcuaro son la indiscriminada deforestación de su cuenca, la contaminación orgánica, la sobreexplotación pesquera, introducción de especies exóticas, programas institucionales de producción incompatibles con la realidad social, cultural y ecológica, falta de coordinación entre las diferentes instituciones involucradas en el manejo del lago y una fraccionada y frecuentemente incompleta evaluación ecológica. Tales circunstancias son cada vez más evidentes no solo en México sino en toda América Latina (Chacón, 1993).

La región del lago de Pátzcuaro ha sido el centro de numerosos estudios, particularmente aquellos de orden socio-económico, histórico, antropológico, y biológico. Una revisión bibliográfica (Argueta *et al.*, 1984) reporta un total de 1521 títulos distribuidos en diferentes tópicos. Sin embargo, la mayoría de los estudios anteriores han sido enfocados hacia aspectos particulares y temas aislados.

Por consecuencia, una evaluación ecológica completa de los factores físicos, químicos, biológicos y socioeconómicos que afectan al lago, a su cuenca y su productividad aún queda por hacerse (Chacón- Torres, 1993).

Actualmente se mantiene en la porción sur del lago de Pátzcuaro un canal perimetral y una serie de canales de navegación, con lo que han recuperado áreas que anteriormente se mantenían en estancamiento hidráulico y constante desecación. Sin embargo el mantenimiento de estas áreas representa costos muy altos y alguno de sus efectos negativos son la suspensión de sedimentos y materia orgánica en descomposición. Algunas consecuencias de estos procesos ocasionan el agotamiento del oxígeno disuelto y daños en las poblaciones de peces por la acumulación de sedimentos en las branquias.

Chacón y Rosas-Monge (1995) proponen que estas zonas de recuperación deben ser previamente planificadas para disminuir los daños causados sobre los procesos biogeoquímicos por las acciones de dragado. Además, discuten la posibilidad de establecer zonas de refugio y protección de especies nativas en donde se integren actividades de incubación y alevinaje, en condiciones semicontroladas y en donde se integre la participación de las comunidades indígenas que aprovechen el recurso pesquero.

El presente estudio es el resultado de un reconocimiento sobre las características físicas y químicas que presenta la zona litoral de la ribera sur del lago de Pátzcuaro con el objeto de identificar los componentes físicos y químicos que influyen en la dinámica ecológica del litoral del lago. Se espera que la información obtenida en el estudio respalde el diseño de estrategias eficientes y compatibles para la recuperación integral del lago de Pátzcuaro.

II. ANTECEDENTES

2.1. La zona litoral

Tomando la estructura convencional de un vaso lacustre se reconocen dos grandes zonas de profundidad en el perfil de un lago. La zona litoral que se extiende desde la línea de costa justo en donde incide el oleaje hasta una profundidad en donde la penetración de la luz solar es apenas suficiente para el desarrollo de las plantas acuáticas enraizadas. Alternativamente, se considera que el hábitat del litoral se extiende desde la línea de costa hasta una profundidad en donde las aguas de circulación de la superficie alcanzan todavía el sustrato del fondo del lago. La segunda zona lacustre es aquella que se ubica alejada de la línea de costa frecuente bien mezclada e iluminada denominada como zona limnética. La profundidad de la zona limnética está definida por la profundidad de la zona eufótica la cual se extiende desde la superficie del agua hasta la profundidad en donde la luz solar alcanza una profundidad del 1% del total que incide justo debajo de la superficie del agua (Goldman y Horne, 1983).

Cole (1983) define a la zona litoral como la zona periférica somera o de baja profundidad que se encuentran sujetas a la fluctuación de la temperatura y a la erosión de los materiales de la línea de costa a través de los efectos del oleaje. Debido a estas circunstancias el sustrato es un sedimento de textura relativamente gruesa el cual es evidente en líneas de costa sin protección de plantas acuáticas. Estas aguas de baja profundidad se encuentran bien iluminadas y habitadas por plantas acuáticas bien enraizadas que se extienden hacia las profanidades del lago y contribuyen con fragmentos del sedimento de la zona litoral así como el suministro de un sustrato para el establecimiento de otros organismos. La franja de la línea de costa hasta la profundidad en donde no se observa la existencia de plantas acuáticas se reconoce como la región de la zona litoral.

En algunos casos en donde la acción del oleaje es tan extremo que las grandes angiospermas acuáticas se encuentran ausentes la zona litoral se encuentra delimitada por las colonias de fitoplancton con estructuras de fijación que se establecen en rocas y en forma de capas cubriendo el sedimento.

2.2. El ecosistema de humedal

Los humedales poseen numerosas características distintivas. Las más evidentes son la presencia de agua con mínima actividad hidrodinámica, condiciones de sustrato o sedimento saturado en agua y organismos especialmente la vegetación adaptada a condiciones de tolerancia a la saturación de agua en los sedimentos. Sin embargo, los humedales no son fáciles de definir especialmente para aspectos legales, debido a que los humedales comprenden una amplia variedad de condiciones hidrológicas y se ubican en un extenso gradiente de ambientes, desde áreas de montaña hasta ecosistemas de agua de gran profundidad, además de su amplia variación en tamaño, geomorfología, ubicación, origen, evolución e influencia del hombre.

Términos como ciénega, pantano, charca temporal, zonas húmedas y maleza acuática han sido utilizados por siglos para describir este ecosistema. Definiciones formales han sido propuestas por diversos autores e instituciones a través del tratado internacional conocido como la Convención Ramsar. Estas definiciones incluyen un nivel considerable de detalle tanto para propósitos de estudio científico formal y riguroso como para intereses de manejo y protección. Por lo anterior, no existe en la actualidad una definición única para describir el ecosistema de humedal (Mitsch y Gosselink, 2000).

Entre las definiciones más importantes que describen de manera práctica y rigurosa un ecosistema de humedal destacan la del Servicio Norteamericano de Pesca y Vida Silvestre que después de algunos años de revisión establece que los humedales son terrenos de transición entre sistemas acuáticos y terrestres en donde la capa de agua se encuentra en o cerca de la superficie el sustrato y que el terreno se encuentra cubierto totalmente por el agua.

Para aceptar esta definición el humedal debe poseer uno o más de los siguientes atributos: 1) por lo menos de manera periódica el terreno debe de sostener de manera predominante a una comunidad de hidrofítas; 2) el sustrato debe de estar predominantemente con un tipo de suelo hídrico o asociado al agua sin drenaje; 3) el sustrato no es solamente suelo y se encuentra totalmente saturado o cubierto de agua de baja profundidad en alguna temporada del año (Cowardin, *et al* 1979).

Zoltai (1988) definió a los humedales como terreno que presenta una capa de agua que cubre la superficie del suelo o que se encuentra saturado el tiempo suficiente para promover procesos acuáticos como son suelos hídricos, vegetación hidrofítica y diversas actividades biológicas adaptadas a un ambiente húmedo. El mismo autor describe los atributos húmedo y seco extremos de un humedal como aguas someras abiertas generalmente menores a los 2.0 m de profanidad y área inundadas periódicamente solamente si las condiciones de estancamiento dominan a través del desarrollo del ecosistema.

La Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos propuso una definición de referencia estableciendo que un humedal es un ecosistema que depende de manera constante o recurrente de una inundación superficial o cerca de la superficie del sustrato.

Las características mínimas esenciales de un humedal es que sea una inundación recurrente, sostenida o de saturación en la superficie o cerca de la superficie del sustrato, además de la presencia de atributos físicos, químicos y biológicos que reflejen la condición de inundación recurrente, sostenida o de saturación. Atributos comunes de diagnóstico de los humedales incluyen suelos hídricos y la presencia de vegetación hidrofítica. Estos atributos estarán presentes excepto en donde los factores fisicoquímicos, bióticos o antropogénicos han sido eliminados o prevenidos para su desarrollo (NRC, 1995).

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (IUCN) reunidos en la ciudad iraní Ramsar mediante un tratado intergubernamental aprobado el 2 de febrero de 1971, actualmente conocido como Convención Ramsar ha definido a los humedales como ecosistemas tanto naturales como artificiales que se caracterizan por estar permanente o temporalmente inundados, ya sea por aguas dulces, estuarinas (salobres) o salinas, las cuales pueden estar estancadas o corrientes e incluyen las regiones ribereñas, costeras y marinas que no excedan los 6 metros de profundidad con respecto al nivel medio de las mareas bajas.

A pesar de haber sido generada una gran cantidad de información sobre las características de los humedales, aún existe controversia entre los autores sobre una definición única. Lo anterior de acuerdo con Abarca y Herzig se debe a tres razones principales:

- 1) La perspectiva y experiencia personal de cada autor sobre el tipo de humedal que más ha estudiado y/o trabajado. Esto incluye la perspectiva de la disciplina que se incorpora al estudio de los humedales incluyendo investigadores, administradores, ingenieros hidráulicos y ambientales, gestores de recursos, autoridades y público en general, de una región geográfica a otra.
- 2) El hecho de poseer características intermedias entre los ambientes terrestres y los acuáticos, y de compartir elementos con cada uno de estos ambientes.
- 3) La gran diversidad de tipos de humedales y las características únicas de cada tipo limitan la elaboración de una sola definición.

Los humedales son zonas en las que el agua es el factor principal que controla el medio físico, además de la vida vegetal y animal asociada con el sistema.

Se presentan en espacios en donde la capa freática se halla en la superficie o cerca del sustrato o donde el terreno se encuentra cubierto de agua poco profunda. La mayoría de los humedales se caracterizan por los niveles fluctuantes de agua y por los tipos de suelo que son bien distintos de aquellos suelos de los ambientes terrestres (Niering, 1985). De esta manera, los componentes más importantes de un ecosistema de humedal son: 1) agua; 2) sustrato y 3) comunidades biológicas bien establecidas (Mitsch y Gosselink, 2000).

Aunque algunos autores sostienen que los humedales son zonas de transición o ecotonos entre los ambientes estrictamente terrestres y aquellos de aguas profundas, también se ha determinado que los humedales no solamente comparten las características de uno u otro ambiente, sino que también poseen condiciones únicas. Por lo que el término ecotono es cada vez más controvertido. Sin embargo, es importante enfatizar que los humedales a pesar de ubicarse en zonas de transición, éstos finalmente integran unidades ecológicas bien definidas (Abarca y Herzig, 2002).

Aunque los humedales varían de acuerdo a sus diferencias de suelo, topografía, clima, hidrografía, química del agua, vegetación además de la actividad humana regional y local. Los humedales en los sistemas lacustres son con frecuencias áreas de litoral en donde la saturación de agua es el factor dominante y que determina el desarrollo de las comunidades de organismos que viven en estos ecosistemas (Coward, 1979; EPA, 2003).

En diversas áreas geográficas la pérdida de humedales ha afectado la comercialización de peces y moluscos, ya que estos dependen de estas zonas litorales. Además los humedales son hábitat de aves y otros organismos de vida silvestre. En Norte América se ha estimado que el 50 al 80% de la producción anual de rana proviene de los humedales y la pérdida de estos valiosos ecosistemas puede afectar en un 50% la disminución de lugares de reproducción para las poblaciones de diversas especies de pato silvestre.

Existen estudios que sugieren que los ecosistemas de litoral (humedales) ayudan al control de erosión a través de procesos de disipación de la energía de oleaje, además de incrementar la estabilidad del litoral que con ayuda de la vegetación retiene sólidos producto de una intensa erosión.

Además los humedales debido a su capacidad de retener sólidos y filtrar agua, incrementando su calidad son utilizados como pre-tratamiento de aguas, estos solo requieren de una fracción del costo de construcción y operación de una planta de tratamiento convencional (U.S.A Environmental Protection Agency, 2003)

Uno de los problemas ecológicos más graves del país es el uso del agua y que se expresa en el nivel de contaminación, sea ésta directa o indirecta, como una consecuencia del vertido de aguas negras, desechos o residuos de actividades agrícolas o pecuarias (Vázquez, 1993).

El concepto de calidad del agua se define a través de las propiedades químicas, físicas y biológicas que caracterizan este compuesto y con las cuales se evalúa la aceptabilidad de acuerdo al uso que se le destine. Esta se interpreta mediante valores específicos para cada propiedad, los cuales pueden exceder un determinado límite, superarla significa posibles riesgos para la salud (Domínguez, 1995).

La calidad del agua de un río o lago se encuentra estrechamente asociada a las características geoquímicas del sustrato y principalmente al uso que se hace del suelo en el área de la cuenca de drenaje, es decir, que las actividades agrícolas, deforestación, construcción, urbanización y uso industrial se refleja en las características físicas y químicas del agua de los escurrimientos naturales y por lo tanto, en la calidad del vaso receptor incluyendo ríos, lagos, lagunas y embalses. Esto significa que las actividades tendientes a prevenir y proteger la calidad de las aguas, depende esencialmente del uso controlado del suelo en el área de la cuenca (Domínguez, 1995).

El agua de los humedales mantiene una fuerte interacción con los componentes abióticos y bióticos del ecosistema, ya que componentes como nutrientes, metales pesados, sólidos suspendidos y bacterias son introducidos y desalojados constantemente dentro del ecosistema (Likens, 1972).

Cabe resaltar la importancia que ha adquirido la investigación y cuantificación de los procesos biogeoquímicos en el reciclamiento de nitrógeno, fósforo y de la participación de los humedales en el fenómeno del “calentamiento global” derivado de la intensa actividad en la captación de CO₂ y, contrariamente, del aporte de metano a la atmósfera por parte de algunos de ellos (Bobbink y de Caluwe ; Vile *et al.*, en Crow, 2000).

2.3. Clasificación de humedales

En 1974 la U. S. Fish and Wildlife Service dirigido por la Office of Biological Service para diseño y llevo un inventario de humedales. Existen sistemas de clasificación que fueron considerados muy simples (Martier *et. al.*, 1953) o muy limitadas geográficamente (Stewart y Kantrud, 1971; Golet y Larson, 1974; Odum *et. al.*, 1974; Zolta *et. al.*, 1975), para cumplir con los requerimientos de un inventario nacional, Cowardin *et. al.*, (1979) desarrollo un sistema de clasificación de humedales y hábitats de aguas profundas de los Estados Unidos para respaldar el inventario nacional. Los objetivos de la clasificación fueron para describir grupos ecológicos con atributos naturales homogenizados, para organizar estos grupos en un sistema que debiera ayudar en decisiones para el manejo de recursos, para proporcionar grupos para el inventario y el mapeo y para proporcionar uniformidad en conceptos y terminología en los Estados Unidos.

La clasificación de humedales y hábitats de aguas profundas de los Estados Unidos es jerárquico y divisivo. Los humedales y Sistemas de aguas profundas están formados por subsistemas, sistemas de clase y clase de subclase. Los tipos de importancia (plantas y animales) están atribuidos a subclases.

El régimen de Agua, Química del agua y modificadores del suelo están dedicados a clases, subclases y tipo de dominancia, por ejemplo, de acuerdo a la clasificación, una hierva (*Spartina sp.*), marisma debería ser estuarino (sistema), interamareal (subsistema) emergente (clase) y persistente (subclase).

Los sistemas son un complejo de humedales y hábitats de aguas profundas que comparten hidrología, geomorfología, química y biología; éstos se clasifican en cinco sistemas mayores: marino, estuarino, riberino, lacustre y palustre. Los subsistemas son categorías más específicas de sistemas y proporcionan información hidrológica.

Los sistemas riberinos incluyen un sistema de riadas, se clasifican en menos constante, superior constante y sistemas intermitentes. En cambio, los sistemas limnéticos y litorales comprenden a los sistemas lacustres. En contraste, el sistema palustre no está dividido en subsistemas.

Las clases describen la apariencia del hábitat y se definen por cualquiera de la forma de vegetación dominante o la fisiografía y composición del sustrato, ejemplos de estos son aquellos que incluyen fondos rocosos, fondo acuático, humedal emergente y humedal forestado.

Cowardin (1979), propuso que las clases son discernibles sin un amplio conocimiento biológico y en algunos casos reconocibles en general. Diferencias en la forma de vegetación o sustrato son reconocidas en el nivel de subclase. Por ejemplo, fondos rocosos está dividido en base de roca y escombros, y humedal emergente está dividido en constante y no constante. Además de que un tipo dominante es la categoría más precisa y refleja las especies de plantas dominantes o sedentario dominante o macro invertebrados sésiles.

Las clases, subclases y tipos de niveles dominantes de la clasificación están mejor descritos por modificadores del régimen del agua que describe las características hidrológicas, y requiere de un conocimiento detallado de la duración y cronometraje de la inundación de la superficie. La salinidad en todos los hábitats y potencial de hidrógeno (pH) en hábitats de aguas dulces, están modificados por la química del agua. Los modificadores del suelo son minerales y orgánicos. La clasificación también incluye modificadores especiales para describir humedales hechos por el hombre y humedales modificados por la actividad de personas o castores.

Cowardin *et. al.* (1979) diseñaron la clasificación para utilizarla sobre una amplia área geográfica y para utilizarla por individuos y organizaciones con variados intereses y objetivos. La información acerca de los humedales o áreas de aguas profundas que están clasificados está sacada directamente de lugares inspeccionados o indirectamente de mapas, fotografías aéreas y otras fuentes.

El tipo y magnitud de información necesariamente determina el nivel para el cual el área está clasificada. Cowardin *et. el.*, (1979) propusieron la clasificación para estar abierta e incompleta debajo de los niveles de clase.

Ducks Unlimited Mexico A.C. (DUMAC) desarrolló una clasificación tomando como base el Sistema de clasificación de humedales y de hábitats de aguas profundas de Cowardin (1979), utilizado por el Programa Nacional de Inventario de Humedales del Departamento de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos, al cual se le hicieron algunas modificaciones de acuerdo a las necesidades que se han presentado para México.

2.3.1. Niveles de Clasificación

De acuerdo a DUMAC la estructura de esta clasificación es jerárquica y se subdivide de acuerdo al régimen hidrológico y al tipo de vegetación presente, progresando de los niveles más generales, tales como los Sistemas y Subsistemas, hasta llegar a categorías más específicas a las que denominamos Clases. El término SISTEMA se refiere a un complejo de tipos de hábitats que comparten la influencia de factores hidrológicos, geomorfológicos o biológicos similares. El SUBSISTEMA se refiere al régimen hidrológico, y la CLASE describe la apariencia general del hábitat en términos de vegetación dominante, fisiografía del sustrato o uso de suelo en el caso de tierras altas (Cowardin, et al., 1979).

Dentro de la clasificación se consideran seis sistemas, de los cuales cinco corresponden a los diferentes cuerpos de agua: Marino, Estuarino, Lacustre, Palustre y Riberino; y un sexto sistema correspondiente a Tierras Altas, el cual no se considera dentro de los sistemas de clasificación de humedales (DUMAC, 2002).

CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES Y TIERRAS ALTAS

SISTEMA MARINO

SUBSISTEMA	CLASE
Submareal	Agua Abierta
	Vegetación Acuática
	Playa
Intermareal	Vegetación Acuática
	Manglar

Consiste del mar abierto que se encuentra sobre la plataforma continental y la línea costera.

SISTEMA ESTUARINO

SUBSISTEMA	CLASE
Submareal	Agua Abierta
	Vegetación Acuática
	Llanura Costera
	Vegetación Acuática
	Emergente Bajo Litoral
	Alto Litoral
Intermareal	Llanura Costera Modificada
	Manglar
	Selva Inundable
	Peten

Consiste en los hábitats de aguas profundas y humedales influenciados por las mareas, que se encuentran semirodeados por tierra, pero que tienen un acceso ya sea permanentemente abierto, esporádico o parcialmente obstruido con el mar abierto; y en donde las aguas del océano están al menos, ocasionalmente diluidas por escurrimientos provenientes de tierra (Cowardin, *et. al.*, 1979).

SISTEMA LACUSTRE

SUBSISTEMA	CLASE
Limnético	Agua Abierta
	Vegetación Acuática
Litoral	Agua Abierta
	Vegetación Acuática

Incluye los humedales y hábitats de aguas profundas que cumplan con todas las características siguientes: (1) que estén situados en una depresión topográfica o sobre un canal riberino represado; (2) que no presente árboles, matorrales, emergentes persistentes, musgos o líquenes, con una cobertura total mayor a 30%; y (3) que el área total exceda las 8 hectáreas.

Los humedales y hábitats de aguas profundas con características similares a las anteriormente expuestas, pero con un área menor a 8 hectáreas son incluidas en el Sistema Lacustre si presentan algún tipo de bordo o dique ya sea en parte o en todo el contorno del cuerpo de agua, o si la profundidad del agua en la parte más profunda durante los períodos de bajo nivel, excede los 2m. En el Sistema Lacustre la salinidad derivada del océano es siempre menos a 0.5 ‰ (Cowardin, *et. al.*, 1979).

SISTEMA PALUSTRE

CLASE

Agua Abierta

Vegetación Acuática

Vegetación Emergente

Selva Inundable

Incluye todos los humedales dominados por árboles, arbustos, emergentes y persistentes y no persistentes, musgos o líquenes, y todos aquellos humedales similares que ocurran en áreas de mareas en donde la salinidad derivada del océano sea menos a 0.5 ‰. También incluye humedales sin tal vegetación, pero que reúnan las características siguientes: (1) área menor a 8 hectáreas; (2) que no presenten bordos o diques; (3) profundidad máxima del cuerpo de agua menor a 2 m en nivel bajo; y (4) salinidad derivada del océano menor a 0.5 ‰ (Cowardin, *et. el.*, 1979).

SISTEMA RIBERINO

CLASE

Riberino

Riberino con Vegetación

Excavado

Incluye todos los humedales y hábitats de aguas profundas contenidas dentro de un canal con excepción de los humedales dominados por emergentes persistentes y hábitats conteniendo una salinidad derivada del océano mayor a 0.5 ‰.

Se han considerado para este sistema, tres tipos diferentes de corrientes:

CORRIENTE PERENE. Incluye los causes de ríos y arroyos que presentan agua superficial a través de los años, con excepción de aquellos años con una sequía extrema.

CORRIENTE INTERMITENTE. Incluye los causes de ríos y arroyos cuyo sustrato puede estar expuesto o inundado, presentando agua superficial por períodos variables sin ninguna periodicidad estacional predecible; pudiendo pasar semanas, meses o incluso años entre los períodos de inundación.

CANAL/DREN. Incluye los canales y drenes de los distritos de riego agrícola.

MODIFICADORE ESPEDIALES. Muchos humedales y hábitats de aguas profundas han sido creados por el hombre, mientras que algunos humedales naturales han sufrido ciertas modificaciones por actividades humanas. Ya que la naturaleza de estas modificaciones frecuentemente tienen influencia sobre las características de tales hábitats, se ha incluido el término de Modificadores Especiales, los cuales pueden ser utilizados en cualquier clase a la que se aplicable. Los Modificadores pueden ser:

- a) **ARTIFICIAL.** Se utiliza para identificar aquellas áreas con humedales que han sido artificialmente creados por actividades humanas.
- b) **MODIFICADO.** Incluye los humedales naturales que han sido modificados en cierto grado por actividades humanas. Dentro de esta clase se consideran aquellas áreas que en estado natural son susceptibles a inundación, presentando la vegetación emergente típica del sistema, pero cuya superficie del suelo ha sido mecánica o físicamente alterada para el uso agrícola, pudiéndose restablecer la vegetación acuática al ser descontinuada la labranza de la tierra (Cowardin, *et. al.*, 1979).

Así como las áreas naturalmente inundables que son modificadas para ser utilizadas como lagunas de producción de sal, como granjas camaroneras o para otros fin.

2.4. Los humedales en el mundo

Parece difícil creer que durante muchos años, los humedales fueron considerados lugares inhospitables, peligrosos y sin valor económico para el desarrollo del hombre. La imagen presente en la cinematografía mundial de una típica zona pantanosa evocaba situaciones de miedo, misterio, y de lugares llenos de insectos y de otros animales indeseables. Fue tal vez ésta idea de que eran tierras inútiles lo que evocó el mal uso y abuso de los humedales, a tal grado de modificar sus regímenes hidrológicos y ciclos de nutrientes, así como de contaminarlos, azolvarlos o destruirlos (Contreras 1993; Mitsch y Gosselink 2000).

No fue sino hasta principios de este siglo, que se les empezó a dar la atención y reconocimiento debidos como áreas de gran diversidad en plantas y animales, de enorme importancia ecológica y económica, de una belleza considerable y más aun, como sistemas de gran fragilidad. A pesar de este reconocimiento, el término y la importancia de protegerlos han empezado a ser del dominio público hasta hace apenas unos 15 años, aun en países desarrollados.

Los humedales existen en todos los países y en todas las latitudes, desde la tundra hasta el trópico. No se sabe exactamente qué porcentaje de la superficie del planeta se compone de humedales. Se ha calculado que cubren una extensión de 7 a 9 millones de km², lo cual equivale al 4-6 % de la superficie terrestre (Mitsch y Goselink 2000), de la cual, 2 % son lagos, el 30 % turberas, el 26 % marjales. El 20 % pantanos y el 15 % llanuras de inundación. Los manglares cubren unos 240,000 km² de zonas costeras y se estima que en todo el mundo quedan unos 600,000 km² de arrecifes de coral.

Más de la mitad (56%) se encuentran en zonas tropicales (2.6 millones de km²) y subtropicales (2.1 millones de km²). De la superficie total de humedales, el 60% está cubierta por comunidades con vegetación arbórea.

México posee apenas el 0.6% de los humedales de todo el mundo, es decir, aproximadamente 3,318, 500ha de humedales (Olmsted, 1993), de los cuales 1,567,000ha corresponde a superficies estuáricas (Contreras, 1993) (humedeces costeros) y 1,280,782ha a humedales continentales, incluyendo algunos artificiales (De la Lanza 1999). Además, la superficie cubierta por sistemas de manglar representa unos 6,600km². Sin embargo, estos datos distan todavía de ser finales ya que no se han tomado en cuenta las superficies comprendidas por las zonas ribereñas o ripariás (vegetación a lo largo de los bancos de los ríos, lagos y lagunas, naturales o artificiales) y las zonas arrecifales.

Los humedales han formado parte importante en el desarrollo de varias civilizaciones antiguas, como fueron los casos de las planicies de inundación del Nilo, Tigris y Eufrates. En el continente Americano, y particular en México, varias culturas prehispánicas se establecieron en zonas de humedales como fueron los aztecas que ocuparon el entonces extenso de lagos someros del Valle de México (Texcoco y Chalco); los olmecas, que habitaron las zonas pantanosas de la planicie tabasqueña y los mayas que florecieron alrededor de los cenotes en le Península de Yucatán y parte de Centroamérica.

En la historia de la humanidad, ha existido una dependencia del hombre hacia los sistemas acuáticos y en particular a los humedales. Sin los beneficios de estos ecosistemas, las civilizaciones no se hubieran establecido y florecido. En la actualidad, acciones como las prácticas agrícolas e industriales, canalización de cauces, construcción de presas e introducción de plantas y animales exóticos, han provocado profundos cambios a los humedales.

Se estima que actualmente en los Estados Unidos de América existen menos del 50 % de las áreas ocupadas por humedales, comparadas con la que los colonizadores españoles primero, y los ingleses después, encontraron a su llegada al continente (Niering 1985). El porcentaje de pérdida de humedales en México es aun desconocido, aunque de manera muy conservadora se ha estimado por lo menos un 35 % de pérdida (Abarca y Cervantes 1996).

2.5. Tipos de humedales en México.

De manera general, se agrupa a los humedales de México en tres grandes categorías: 1) Interiores, 2) Costeros y 3) Marinos. Esta clasificación considera la ubicación geográfica y tipo de cuerpo de agua, su extensión y sus características relevantes como la presencia o ausencia de aportes marinos (Abarca y Cervantes, 1996; Flores-Verdugo, 1996). Las siguientes definiciones, ofrecen una idea de la gran diversidad de humedales que existen en México.

1) Humedales interiores

Se consideran humedales interiores a toda aquella planicie de inundación a lo largo de los ríos y arroyos, a los márgenes de los lagos y estanques ó como depresiones inundadas aisladas rodeadas por tierra. Estos sistemas no presentan algún tipo de contacto directo con el mar y pueden o no tener una salinidad variable, esto de acuerdo al tipo de afluente que los alimenta.

Lagos: Cuerpos de agua natural de condiciones lénticas (estancadas) y cuyo origen es continental, sin comunicación directa con el mar, generalmente grandes con más de 8 m de profundidad. Constituyen masas de agua permanentes y que se depositan en una depresión del terreno (cuenca lacustre).

Laguna: Cuerpos de agua con similitud a lagos; pueden corresponder a cualquier origen, drenaje y dimensiones. Permanecen estancados e inestables con variaciones en el nivel de agua, pueden ser temporales o permanentes dependiendo del régimen pluvial. Son depósitos con una profundidad media menor a 8 metros, de forma cóncava.

Esta profundidad provoca una creciente turbiedad de color pardo o café por la presencia de materia orgánica, crecimiento algal y sólidos suspendidos, originando una menor transparencia.

Ríos: Son cuerpos de aguas lóaticas y aun cuando pueden dividirse de varias formas, son en última instancia corrientes de agua continua que desembocan en otra corriente de agua o en otro cuerpo de agua.

Arroyos: Torrentes variables de agua, los cuales ser estacionales, mansos o rápidos con volumen de agua menor que los ríos. Suelen circular sobre rocas erosionadas conteniendo aguas frías saturadas de oxígeno.

Bordos: Son obras artificiales realizadas por los campesinos, con estacas y postes, con el fin de almacenar el agua y utilizarla para irrigación y otros. Los bordos pueden ser temporales o permanentes y constituyen cuerpos de agua muy abundantes. Además representan recursos potenciales para aprovechamiento piscícola en actividades acuícolas.

Embalses: Reservorio artificial donde se recogen la aguas de un río, sujetos a fluctuaciones en el nivel del agua.

Cenotes: Tipo particular de depósito de agua dulce que se encuentran en planicies de suelos calcáreos como Yucatán y Quintana Roo. Son anchos pozos naturales de contornos más o menos circulares y paredes regularmente verticales que se han formado debido al hundimiento reciente del terreno cárstico, ocasionado por la frecuente circulación de las aguas subterráneas que forman profunda grutas, cuyas bóvedas se derrumban y dan lugar a estos cuerpos de agua. Algunos cenotes se localizan en el mar (hoyos azules) y en general se caracterizan por presentar comunidades bióticas muy particulares.

Oasis: Son cuerpos de agua relativamente aislados, característicos de zonas áridas como los que se encuentran en Baja California (Mulejé) y Sonora.

Petén: Se denomina comúnmente como petenes a los islotes de vegetación arbórea que se encuentra inmerso en una matriz de vegetación baja inundable. En los petenes se presentan variaciones en la elevación del terreno, por lo tanto en la profundidad de la inundación y la duración de la misma, la cual determina qué asociación vegetal se manifiesta en cada sitio.

Bolsón: Cuenca cerrada intermontaña que se caracteriza por su desagüe centrípeto. Estas depresiones han sido grandemente excavadas por el viento; algunas contienen en su porción central gran cantidad de aluviones que han sido arrastrados desde las montañas circundantes; otras, presentan piso rocoso cubierto con sal (llamados alcalinos).

Ciénega: Zonas pantanosas alimentadas por un ojo de agua permanente y suelos permanentemente saturados, con abundante vegetación ribereña y semisumergida. Muchas veces presentan las cabeceras de arroyos y pequeños ríos, especialmente en zonas áridas o semiáridas (Minckley y Brown, 1982; Hendrickson y Minckley, 1985). En algunos casos pueden tener cierta influencia marina.

Dentro de los humedales artificiales por sus dimensiones destacan las presas hidroeléctricas, otros sistemas artificiales desde tiempos prehispánicos vienen a ser las chinampas y los sistemas agro-piscícolas.

Los cultivos de arroz, los distritos de riego con sus canales de irrigación, represas y drenes comprenden los humedales artificiales modernos, también se consideran como humedales artificiales los estanques de cultivo de camarón, los estanques de evaporación para la obtención de sal, para la obtención de yeso y los que se utilizan para la obtención de sosa.

Las norias son excavaciones poco profundas de suelos donde el manto freático se encuentra cercano a la superficie y son utilizadas para la agricultura o como abrevaderos e ganado, en general las norias se localizan cerca de la costa donde el agua dulce se acumula por el efecto de la cuña salina.

2) Humedales costeros

Cuerpos de agua que se encuentran en la zona litoral manteniendo una comunicación permanente o temporal con el mar y pueden o no estar conectados a sistemas dulceacuícolas. Esto hace que el tipo de salinidad presente en la aguas de estos sistemas vaya desde salobre hasta típicamente marina (Burke *et. al.*, 1988).

Bahías: Son ambientes marinos expuestos al oleaje oceánico y reciben poco o ningún aporte de agua dulce por lo que su salinidad varía poco y se encuentra cercana a la salinidad del mar (aproximadamente 35%). La vegetación dominante lo constituyen las microalgas de muy diversas especies.

Lagunas costeras: Son depresiones topográficas por abajo del nivel medio de las mareas altas separadas de la energía del mar por algún tipo de barrera (comúnmente de arena) y con comunicación al mar a través de una o más bocas permanentes o efímeras. En México existen más de 125 lagunas costeras que abarcan una superficie total aproximada de 12,600km² y cubren el 33% de sus litorales, como ejemplos de lagunas costeras se puede mencionar a la Laguna Superior y Mar Muerto en Oaxaca.

Los estuarios son cuerpos semi-cerrados donde existe mezcla de agua dulce con agua marina (aguas salobres) por lo que frecuentemente estas condiciones se presentan en muchas lagunas costeras en forma permanente o estacional así como en los deltas y desembocaduras de ríos. Un estero es un canal de mareas que comunica o comunicaba una laguna costera con el mar, con un río u otra laguna o marisma, los esteros son abundantes y de muy diversas dimensiones y en general en zonas tropicales y subtropicales se encuentran bordeadas por manglares.

Estero: Es un cuerpo de agua formado en un canal o en antiguos brazos deltáicos cerrados.

En sus aguas se alternan períodos de estancamiento y de circulación, de acuerdo con el ciclo diario o estacional de las mareas y en relación con la magnitud y penetración de las corrientes de mareas, lo que origina que sus aguas presenten salinidad variable.

Bajos lodosos: Son componentes comunes dentro de las lagunas costeras y en particular en zonas estuarinas de alta sedimentación. Los bajos quedan expuestos al aire durante las mareas bajas y son particularmente importantes para aves playeras como áreas de alimentación. Las barras y los bajos de arena en general se depositan frente a las bocas de las lagunas conformando los deltas de mareas o constituyendo las playas de las barreras.

Manglar: éste corresponde a la vegetación arbórea de la zona de mareas en las regiones tropicales y subtropicales. Los manglares son halófitas facultativas que pueden crecer a diferentes salinidades pero alcanzan su máximo desarrollo en condiciones estuarinas (10-20 ‰).

En México los manglares mejor desarrollados y más extensos se localizan en Laguna de Términos (Campeche), Teacapan-Agua Brava-Marismas Nacionales (Sinaloa-Nayarit) y en Chantuto-Teculapa- Panzacola en el extremo sur de Chiapas. Se estima que la extensión cubierta por los manglares en el país es de 6,600 km², extensión superior a la encontrada en la gran mayoría de los países tropicales. Los manglares presentan una gran variedad de formas fisonómicas que varían desde un boque bien desarrollado (Atasta-Pom, Campeche) hasta matorrales dispersos en las marismas (Sonora) o formando parte de asociaciones vegetales únicas como en los “petenes” (Campeche), (Abarca, 2002).

Praderas de pastos marinos: También conocidos como “ceibadales”, son gramíneas, es decir plantas con flores, que en algún momento de su evolución abandonaron los ambientes terrestres retornando al mar. Son ecosistemas muy productivos por lo que también son hábitat de crustáceos juveniles y peces, algunos de importancia pesquera.

Las especies dominantes en la zona del Caribe mexicano es el pasto *Thalassia testudinus* y en las aguas templadas de la costa del Pacífico de Baja California predomina *Zoostera marina*. En México las praderas de *T. testudinus* son particularmente abundantes en Laguna de Términos (Campeche) y Sian-Káan (Quintana Roo). Existen otros pastos como *Ruppia maritima* ("paste"), una especie cosmopolita común en lagunas costeras con baja influencia de mareas como Huizache-Caimanero, Sinaloa.

Pantanos estuarinos: Corresponden a las áreas templadas y tropicales de las costas de México que se encuentran representadas por las macrófitas emergentes de *Spartina sp* en la zona de mareas y los tulares (*Typha spp*) respectivamente. Esta última es menos tolerante a la salinidad que la primera y usualmente se encuentra en agua dulce y por arriba de las mareas altas. Los pantanos de *Spartina* se pueden observar en el estero de Tijuana y en la ciénega de Santa Clara (Baja California) y amplias extensiones de tulares se presentan en Chiricahueto en Sinaloa. Resultando este último en particular, un importante refugio invernal para varios miles de patos golondrinos (*Anas acuta*) y otra aves.

Los más extensos pantanos dulceacuícolas de macrófitas emergentes de popales (*Thalia geniculata*) se encuentran en Centla (Campeche-Tabasco) constituyendo casi el 75 % del total de los humedales de esta zona. También humedales con vegetación flotante como el lirio acuático (*Eichornia spp*) se encuentran ampliamente distribuidos en todo el país. Helechos acuáticos (*Lemna spp*) o macrófitas enraizadas al fondo y de hojas flotantes como los capomos o nenúfares (*Nynphaea spp*) son muy comunes en las orillas de lagos, lagunas y ríos e incluso en pozas estacionales tropicales y subtropicales del país.

Marismas: Corresponde a las llanuras de inundación estacional por arriba del nivel medio de las mareas altas. Son llanuras de suelos salinos que se inundan solamente durante la época de lluvias o durante las mareas más altas del año.

En época de sequía, frecuentemente presentan manchones o extensas praderas de halófitas terrestres conocidas regionalmente como vidrillos (*Salicornia spp* y *Batis spp*) con árboles o matorrales aislados de mangle negro o botoncillo o también llanuras desprovistas de vegetación alguna, presentándose en ocasiones cristalizaciones de sal conocidas como salinas. Ejemplos de estos ambientes se tienen en las Marismas de Huizache, Laguna de Caimanero, Las Cabras en Sinaloa y Ria Lagartos en Yucatán

Bosques pantanosos: Comprenden asociaciones forestales en suelos inundados por aguas estuarinas como los pantanos de mangle-zapotón (*R. mangle-Pachira acuática*) de Chantuto-Teculapa-Panzacola, Chiapas, así como por agua dulce, por ejemplo los bosques de galería de higuera o camichines (*Picus spp*) y de ahuehuetes (*Taxodium mucronatum*) en los márgenes de los ríos de zonas tropicales y templadas respectivamente.

Selvas bajas inundables: Comprende asociaciones vegetales muy diversas con especies dominantes que definen al pantano como bosques de anonas (*Annona sp*) en Nayarit y Veracruz, tintales de palo de Campeche (*Haemotoxylon campechianum*), mucales (*Dalbergia glabra*) y Chechenales (*Metopium brownei*) de Quintana Roo y Campeche e incluso pantanos de palmar como los tasitales (*Acoelorrhaphe wrightii*) también en Quintana Roo. Como ejemplos de lagunas y lagos de agua dulce tenemos a Tequesquitengo, Morelos; Cuitzeo y Chapala, Michoacán; Santa Maria del Oro, Nayarit; Careco, Chihuahua; El Ocotál, Chiapas; Cuatro Ciénegas, Coahuila y muchos otros.

Lagunas hipersalinas: Se presentan en regiones con tasas de evaporación superiores a las precipitaciones como vienen a ser las zonas áridas y semi-áridas. Ejemplos de estos humedales son: la Laguna Salada, Mexicali, Baja California Norte y Guerrero Negro situado en el mismo estado.

3) Humedales marinos.

Se consideran humedales marinos aquellos ambientes localizados en el área de la plataforma continental que no exceda los 6 metros de profundidad en marea baja.

Barreras de coral: Se caracterizan por su elevada biodiversidad tanto de corales pétreos, como gorgonáceos (corales blandos), esponjas y una gran variedad de crustáceos, moluscos y peces. La elevada productividad de los corales está relacionada con su simbiosis con algas unicelulares conocidas como zooxantelas. Los arrecifes de coral se distribuyen en tramos paralelos a la línea de costa conformando a sotavento una laguna somera con condiciones ambientales apropiadas para esponjas, pastos marinos y otras macrófitas como se puede observar a todo lo largo de Quintana Roo y Belice o formando atolones con una laguna interior como es el caso de Banco Chinchorro en Quintana Roo.

2.6. Los humedales costeros de México

La información básica sobre los atributos ecológicos en ecosistemas epicontinentales, es extremadamente escasa a comparación de la que existe para humedales litorales. A este respecto, es necesario resaltar que la extensión total de aguas epicontinentales que podrían considerarse como humedales es muy significativa. En una reciente publicación, por cierto la primera de este tipo en el país, De la Lanza y García-Calderón (1995) exponen que en el país, se ubican 70 lagos con tamaño que varían entre 1,000 y 10, 000 Ha, y que en conjunto cubren una superficie de 370,891 Ha. Finalmente, existen más de 14, 000 presas o reservorios (Contreras, 2002).

La República Mexicana está rodeada por una línea litoral de 11 mil 600 kilómetros, de los cuales un millón 567 mil hectáreas están cubiertas por superficies estuáricas. El Pacífico posee 892 mil 800 y el Golfo de México 647 mil 500 (INEGI, 1984). Las aguas estuáricas se definen como aquellas superficies acuáticas, en donde se lleva a cabo una mezcla entre agua proveniente del continente y la oceánica por medio del fenómeno mareal.

En nuestro país existen más de 128 grandes ecosistemas costeros (constituidos algunas veces por numerosos cuerpos acuáticos más pequeños cuyo número total se ubica en la actualidad en 617), se incluyen bahías, ensenadas, lagunas, esteros, pantanos, rías, pampas y marismas.

Todos presentan diferencias en su comportamiento, extensión, productividad y propiedades ecológicas lo que les confiere, además, especial particularidad. Los ecosistemas costeros se dividen en cuatro grandes grupos.

- a) los **oligohalinos**, dominados por los escurrimientos dulceacuícolas como los pantanos, ciénegas y ciertos tipos de marismas y esteros, que se localizan principalmente zonas asociadas a caudales importantes, por lo que la mayoría reubican en la parte sur de México. Las áreas más conocidas son los Pantanos de Centla, en Tabasco; El Huayate y la Cantileña, en Chiapas, y las zonas asociadas a la laguna de Alvarado con el río Papaloapan, en Veracruz.
- b) los **estuarinos**, cuyo ejemplo son las lagunas costeras y que son el resultado de la mezcla de los dos tipos de agua: la proveniente de los ríos y el mar. Ubicados en gran parte del litoral nacional, sobresalen por sus dimensiones y productividad las lagunas de: Escuinapa y Yávaros, en Sonora; Huizache-Caimanero, en Sinaloa; Agua Brava-Teacapán, en Nayarit; Superior e Inferior; en Oaxaca; Mar Muerto, en el límite entre Oaxaca y Chiapas; Madre, en Tamaulipas; Tamiahua, Mandinga, Alvarado y Sontecomapan, en Veracruz; Carmen-Machona y Mecoacán, en Tabasco; Términos, en Campeche y Celestúm, en Yucatán.
- c) los **eurihalinos**, dominados principalmente por la influencia marina por ejemplo, las bahías, ensenadas y roquetas. Su mayor incidencia se da en áreas con escasos o nulos escurrimientos de agua dulce y/o climas áridos, como en la península de Baja California y Yucatán, Sonora y parte de Oaxaca. Destacan por su extensión las bahías de Todos Santos y San Quintín, en Baja California; Vizcaino, San Ignacio,

Magdalena-Almejas, La Paz y Concepción, en Baja California Sur; Adair, Guaymas y Lobos, en Sonora; Mazatlán, en Sinaloa; Manzanillo, en Colima; Acapulco, en Guerrero; Huatulco, en Oaxaca; Sian Ka'an, Espíritu Santo y Chetumal, en Quintana Roo. En esta categoría podrían considerarse a las lagunas arrecifales, estas son las asociadas con arrecifes coralinos ya sea las interiores de atolones o las dipuestas en las barreras de coral.

- d) los **hipersalinos**, humedales que alcanzan valores altos de salinidad, debido principalmente a una elevada evaporación local, son escasos en el país y son conocidos como marismas. Se presentan en climas áridos y secos primordialmente hacia la parte norte y central del Pacífico, en los estados de Colima, Sinaloa y Sonora.

De los anteriores sobresalen, por su número, extensión y productividad las **lagunas costeras**, éstas son las que poseen características estuarinas. Las aguas estuáricas son aquellas superficies acuáticas en donde se lleva a cabo una mezcla entre el agua proveniente de los escurrimientos continentales (ríos y arroyos) y la oceánica, por medio del fenómeno mareal; el término estuario proviene de la palabra latina *aeustus* que significa marea

Los humedales costeros de nuestro país son muy importantes desde la perspectiva de la biodiversidad. Por ejemplo, la cantidad promedio de especies de peces por laguna está entre 50 y 100 (se calcula un total de especies ícticas cercano a los 400 en todo el litoral del país), de moluscos entre 50 y 90 de crustáceos entre 40 y 70, por nombrar los más conocidos grupos de organismos, cuya permanencia está en función de la productividad local y su conservación. Los humedales están, en su mayoría estrechamente ligados con bosques de manglar que son un hábitat particularmente rico en especies de aves (son áreas destacadas en la migración de aves provenientes de Canadá y Estados Unidos), reptiles y mamíferos.

En este aspecto, un interés cada vez más creciente se ha manifestado para conservar estos sitios; la conservación de la biodiversidad, sobre todo la avifauna, ha venido a coadyuvar con los esfuerzos realizados en otras áreas del conocimiento (Contreras, 2002).

2.7. Determinación de los 28 humedales prioritarios en México.

El análisis de los datos sobre la distribución de las aves acuáticas, durante las 3 décadas anteriores, logró la identificación de 28 áreas que albergan al 83.8 % de las aves acuáticas migratorias distribuidas en México, durante años promedio en las décadas de los años 60's, 70's y 80's. Esta información conforma el Plan de los 28 Humedales Prioritarios para las Aves Acuáticas Migratorias de DUMAC. Estas áreas se distribuyen de la siguiente manera: 7 en la Ruta Migratoria del Golfo, 14 en la Ruta Migratoria del Pacífico y 7 en la Ruta Migratoria del Centro; de las cuales 4 están en humedales de las Tierras Altas del Norte (Chihuahua y Durango) y 3 en los humedales de las Tierras Altas del Centro (Jalisco y Michoacán).

En estos 28 humedales también se presentaron la mayoría de las especies invernantes de aves acuáticas migratorias, censadas en México. Es decir, 65 % de las cercetas de alas verdes (*Anas crecca*), 69 % de los patos golondrinos (*Anas acuta*), 84 % de las cercetas de alas azules (*Anas discors*), 68 % de los patos cucharones (*Anas clypeata*), 76 % de los patos pintos (*Anas strepera*), 77% de los patos calvos (*Anas americana*), 91 % de los patos cabeza roja (*Aythya americana*) y 63 % de los patos boludos (*Aythya affinis*).

La población invernante de las aves acuáticas migratorias en México, se distribuyen 38 % en los humedales de importancia de la Zona Costera del Pacífico, en los estados de Baja California Norte y Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit; 35 % en la Zona Costera del Golfo, en los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán y 11% de las aves en los humedales interiores de las tierras altas del norte, en los estados de Chihuahua y Durango, y del Centro, en los estados de Jalisco y Michoacán.

También ciertas áreas de invernación en México, tiene mayor importancia o están más ligadas a ciertas especies de aves acuáticas migratorias. Esto es el caso del pato golondrino (*Anas acuta*), con la Bahía de Pabellones y la Laguna Madre, Tamaulipas; la cerceta de alas azules (*Anas discors*) con las lagunas de Tabasco y los Humedales de Campeche y Yucatán; el pato cucharón (*Anas clypeata*), con la Laguna de Cuitzeo y Marismas Nacionales; el pato cabeza roja (*Aythya americana*), con la Laguna Madre, Tamaulipas y la Bahía de Santa María, Sinaloa; la branta negra (*Branta bernicla*), con las Bahías de San Quintín, Ojo de Liebre y San Ignacio; y el pato calvo (*Anas americana*) con la Laguna Madre, Tamaulipas y Topolobampo.

De los 28 humedales prioritarios identificados, 6 de ellos albergan más del 40 % de las aves acuáticas migratorias invernantes en México. Siendo en orden de importancia los siguientes: Laguna Madre y Lagunas de Tamaulipas, Bahía de Pabellón en Sinaloa; Bahía Topolobampo en Sinaloa; Lagunas de Tabasco; Laguna de Cuitzeo en Michoacán y Marismas Nacionales en Nayarit. A través de los años, ha habido en algunos casos, marcados cambios en la proporción de las aves invernando en los humedales de México. Casi la mitad de estas áreas han mostrado incrementos desde los años 60's; y solamente 8 de éstas han mostrado decrementos en sus poblaciones, mientras que las otras 7 se muestran estables. El denominador común, es que éstas 28 áreas se han mantenido a través del tiempo como los principales humedales de invernación para las aves acuáticas migratorias en México, basados en el análisis de la información de los censos de medio invierno.

De los 28 humedales prioritarios, 21 coinciden con áreas costeras. Éstas zonas se caracterizan por ser áreas con grandes extensiones de terreno, dentro de las cuales podemos encontrar humedales con más de 200 mil hectáreas (Lagunas de Tabasco y Laguna Madre, Tamaulipas), hasta áreas de menos de 50 mil hectáreas (Bahía San Quintín, Baja California y Bahía Topolobampo, Sinaloa).

Los humedales interiores, se caracterizan por ser la mayoría de estos humedales estacionales intermitentes, dependiendo de la lluvias para su abastecimiento de agua, como lo es el caso de las lagunas de Babícora, Mexicanos en Chihuahua; Santiaguillo en Durango; Cuitzeo en Michoacán y Chapala y Sayula en Jalisco. Además de esto, son humedales que en su mayoría no exceden d entre 45, 000 hectáreas (Cuitzeo) a 3,000 hetáreas en el caso de la Laguna de Mexicanos, siendo solamente la Laguna de Chapala un embalse de 112, 500 hectáreas, lo que hace ser el cuerpo natural de agua dulce más grande del país (DUMAC, 2002).

2.8. Características de los humedales.

Como los humedales se presentan en donde el agua yace cerca del nivel de la superficie del terreno o por encima de él. El suelo puede estar saturado durante cuestión de días o permanentemente saturado o inundado, el agua limita el oxígeno. Por lo tanto, el oxígeno disminuye o desaparece rápidamente en cuanto los suelos se saturan de agua.

Esta condición se conoce como anoxia del suelo, y es una característica típica de los suelos de humedal, si el humedal se encuentra mojado durante un corto período de tiempo, los suelos estarán temporalmente pobres en oxígeno y se hallarán ricamente oxigenados durante las épocas de sequía. En donde el humedal está permanentemente inundado, persistirán los suelos pobres en oxígeno.

Un número de transformaciones biogeoquímicas se llevan a cabo tan pronto como el oxígeno desaparece del agua y de la matriz física del suelo, estas últimas pueden incluir la desaparición de nitratos, la formación de sulfuro de hidrógeno mediante una reducción del sulfato, o la formación de metano en ausencia de oxígeno. Eventualmente, el humedal atrae seres vivos, tanto plantas como animales, que están adaptados al conjunto único de condiciones hidrológicas y geoquímicas en diferentes sitios a lo largo del humedal y de humedal en humedal.

Estas condiciones hidrológicas y edafológicas son responsables de mantener la biota del humedal y de configurar sus comunidades vegetales (Warner, 2002).

Las plantas mueren hacia el final de la temporada de crecimiento. Sus restos muertos caen sobre la superficie del humedal. Estos restos pueden ser hojas, otros restos vegetales o un árbol, arbustos o plantas herbáceas enteros. También pueden incluir algas microscópicas e invertebrados que vivieron en el agua. Los restos orgánicos se anegarán en el agua, se sumergirán hacia el fondo de la columna de agua y yacerán a profundidad en la superficie de sedimentación. En humedales que carecen de espejo de agua, los restos bióticos sobre la superficie del fondo del humedal. La cantidad de materia que permanece sobre la superficie del fondo del humedal depende de los procesos hidrodinámicos que afecten al humedal.

En sistemas abiertos influenciados por mareas y reflujos, el agua erosiona o se lleva mucha de la materia muerta a los ríos, lagos, o el mar. Es más probable que los materiales orgánicos permanezcan in situ en sistemas cerrados no afectados por mareas y reflujos. En este último caso, la descomposición da inicio, pero tan sólo a una cierta tasa que se relaciona con la cantidad de oxígeno disponible en el agua y el suelo. (Warner, 2002).

A mayor cantidad de oxígeno en el suelo, mayor es la tasa de descomposición, en donde hay poco oxígeno, no toda la materia vegetal se descompone y la materia vegetal parcialmente descompuesta forma turba, si este ciclo se repite año con año, se presenta una acumulación de materia orgánica y de turba, mismas que dan lugar al desarrollo de turberas, frecuentemente a partir de un humedal mineral.

Los humedales que tienen una acumulación mínima de 30 a 40 cm de turba son conocidos como humedales orgánicos o turberas. Si hay menos de 30 a 40cm de turba, estos humedales son conocidos como humedales minerales.

Es posible identificar cuatro características que dan sustento a un humedal, el ambiente físico o la geomorfología de la superficie terrestre desempeñan un papel principal en la determinación de la localización y distribución de los humedales.

El ambiente geomorfológico en gran medida determina el tamaño, la forma y la morfología general del humedal, la hidrología está relacionada con los factores climáticos que producen tanto un balance hídrico como hidrodinámicas características del humedal (es decir, las interacciones entre los procesos físicos e hidrológicos).

El agua, por su parte, tiene características geoquímicas específicas, dependiendo de sus orígenes, y esto a su vez regula los ciclos geoquímicos y la naturaleza de las comunidades vegetales. Finalmente, la biota es el producto final de los procesos geomorfológicos, hidrológicos y geoquímicos, mismos que pueden interactuar con cualquiera de las otras dos o tres características del humedal. La clasificación, por lo tanto, hace uso de cualquiera de estas características, o de cualquier combinación de dos o tres de ellas (Warner, 2002).

El agua ejerce el control primario sobre los humedales, por lo tanto, es posible establecer un sistema de clasificación basado en la fuente principal de agua en el balance hídrico del humedal.

El balance hídrico se determina a través de las entradas de precipitación (tanto de lluvia como de nieve), los flujos de superficie, los flujos de agua subterránea así como de las salidas, tales como la evaporación, el flujo de salida superficial y la salida de agua subterránea. El sufijo “geno” se refiere a términos hidrológicos y se reserva para ser usado sólo en un contexto hidrológico. Los humedales ombrígenos (de “ombro”= nube) son enteramente dependientes de las fuentes de precipitación. Los humedales terrígenos (de “terri”= tierra) están conectados con regímenes de flujo de agua subterránea locales y regionales y con regímenes de flujo de aguas superficiales (Warner, 2002).

El termino solígeno (de “sol”= suelo) se aplica en humedales, dominados por flujos de superficie que entran y fluyen como filtraciones a través del humedal, especialmente turberas. Los humedales solígenos suelen presentarse en pendientes muy inclinadas con precipitación abundante, pero el agua de precipitación no es la fuente predominante en el balance hídrico del humedal.

Los humedales litógenos (de “lit”= orilla), que también se conocen como humedales de línea de costa, se presentan a lo largo tanto de líneas de costa marina como dulceacuícola. La principal fuente de agua es superficial, pero los humedales litógenos se ven grandemente influenciados por el agua presente en un cuerpo de agua adyacente. Los humedales riparios diferencian los sistemas litógenos dulceacuícolas de los humedales litógenos estuarinos o marinos. Los humedales riparios pueden ser tanto fluviales, los que denotan sistemas de humedales litógenos a lo largo de los ríos, o humedales litógenos lacustres, situados alrededor de los lagos. Los sistemas estuarinos se presentan en estuarios y los sistemas marinos ocurren en contacto con el mar (Warner, 2002).

El conocimiento de las fuentes de agua puede estar ligado con frecuencia a la composición química del agua, ya que la química de la fuente de agua puede ser marcadamente diferente. Por ende, es decir, es frecuente asociar las clasificaciones hidrológicas con algún tipo de clasificación hidrogeoquímica.

Otro enfoque que involucra a la hidrología del humedal concierne a la hidrodinámica, que se refiere a los flujos del agua y a su capacidad para efectuar un trabajo (Brinson, 1993). SE pueden reconocer tres tipos de regímenes hidrodinámicos que afectan a los humedales:

- (1) Movimientos verticales del agua impulsados por las pérdidas de agua por evapotranspiración, suministro de agua a través de la precipitación, o suministro de agua mediante descargas de agua subterránea.

- (2) Flujos unidireccionales, que son dominados por aguas de superficie que fluyen a través de la superficie del terreno, ya sea en canales o en flujos laminares y
- (3) Flujos bidireccionales, que son flujos horizontales de aguas de superficie y próximas a la superficie, resultado de las fluctuaciones de las mareas o la deriva de costa.

La química de las aguas de un humedal varía con la fuente de origen de dichas aguas. Toda el agua contiene iones disueltos. Existen siete iones dominantes. Hay cuatro cationes principales (es decir, iones cargados positivamente): Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y Potasio (K^+) y tres aniones principales (es decir, iones cargados negativamente): bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y cloruros (Cl^-). El pH es la medida más común que refleja la cantidad de iones disueltos en agua (Warner, 2002).

Los humedales minerales y las turberas con aguas de alto contenido disuelto tienen aguas neutras y alcalinas, estos humedales se clasifican como minerotróficos, e incluyen a la gran mayoría de los humedales. El término minerotrófico se reserva generalmente para los humedales dulceacuícolas que contienen grandes concentraciones de iones calcio y bicarbonato. Los humedales marinos y estuarinos también tienen valores elevados de pH, pero ello se debe a concentraciones elevadas de iones disueltos de sodio y sulfatos (Warner, 2002).

Los humedales con turba y materia orgánica son frecuentemente ácidos porque el flujo de agua de las fuentes mineralógenas es restringido y los humedales mismos contribuyen ácidos orgánicos al agua (por ejemplo, ácidos húmico, fúlvico y sáprico). Tales humedales, especialmente las turberas, tienen aguas que son más oligotróficas. Una condición extrema de oligotrofia, única de los humedales, es la ombrotrofia. Los humedales ombrotrofos son siempre turberas cuya única fuente de agua es la precipitación.

La precipitación es generalmente ácida y cuando se mezcla con los ácidos orgánicos en el humedal, se generan condiciones muy ácidas, con pH hasta de 4.6 (Warner, 2002).

La acumulación de turba y sedimento orgánico son características singulares de los humedales. La acumulación de restos de plantas y animales muertos y en descomposición, mismos que componen la materia orgánica de los suelos de los humedales, proporcionan un medio para reconstruir la historia de acrecentamiento orgánico del suelo y por lo tanto la historia del humedal mismo.

Los restos de las plantas y animales pueden ser preservados por cientos y miles de años, haciendo uso de indicadores geoquímicos y biológicos preservados en la materia orgánica, las técnicas estratigráficas y paleoecológicas pueden proporcionar información sobre los procesos responsables del origen y la historia de desarrollo del humedal. Los restos fosilizados de plantas y animales presentes en el sedimento pueden ser identificados para recabar la historia de las comunidades bióticas del pasado. Es posible determinar cómo y cuándo cambiaron dichas comunidades vegetales en y alrededor del humedal.

La secuencia de desarrollo y los cambios en las comunidades vegetales a lo largo del tiempo, desde su origen hasta hoy en día, revelan frecuentemente que el humedal contemporáneo surgió a partir de otros tipos de humedales. Se pueden usar fechas estimadas con carbono radiactivo para establecer la edad del humedal y el tiempo que le tomó transformarse de un tipo a otro y cuando se configuró en su tipo actual. De manera similar, es posible estas técnicas para determinar cuándo y cómo empezó a deteriorarse el humedal actual y a verse afectado por las actividades humanas.

Las características estratigráficas y paleoecológicas han sido comúnmente en turberas, las cuales son más fáciles de muestrear y estudiar, que los humedales minerales.

Pero esto no significa que los humedales minerales no pueden ser estudiados. Las relaciones fitosociológicas identificadas en estudios de comunidades vegetales contemporáneas pueden también ser aplicadas a comunidades vegetales reconstruidas mediante el uso de la paleoecología. Se puede establecer historias detalladas a largo plazo, como por ejemplo a lo largo de 10,000 años, para determinar la causa y las consecuencias de la modificación del humedal (Moore, 1984). Este enfoque hace énfasis en el génesis de la totalidad del humedal y proporcionar alguna base para inferir relaciones de sucesión en humedales contemporáneos.

2.9. BIOGEOQUÍMICA DE LOS HUMEDALES.

Los ciclos biogeoquímicos de los humedales ofrecen una combinación de transformaciones químicas y procesos de transporte químicos no compartidos por algunos otros ecosistemas, los suelos de los humedales, conocidos como suelos hídricos, son formados cuando el oxígeno es limitado debido a la presencia de agua, causando condiciones reducidas, estos suelos pueden ser suelos orgánicos o suelos minerales. Los suelos hídricos minerales se pueden identificar a través de concentraciones redox, reducciones drásticas y matrices reducidas.

Transformaciones de nitrógeno, azufre, hierro, magnesio y carbón ocurren como resultado de estas condiciones anaeróbicas, algunas transformaciones ocasionan condiciones tóxicas, como la producción de sulfuro de hidrógeno, mientras otras, tal como la desnitrificación y metanogénesis, ocasionan una pérdida de químicos a la atmósfera.

Algunas de las transformaciones son mediadas por poblaciones de microbios que están adaptadas a los ambientes anaeróbicos. Los compuestos químicos son transportados hidrológicamente a los humedales a través de la precipitación, flujo superficial, agua subterránea y por medio de las olas. Los humedales dominados por precipitación generalmente son pobres en nutrientes, mientras las concentraciones de flujos químicos hasta los humedales de otras terceras partes son altamente variables.

Los humedales pueden ser fuentes, sumideros o transformadores de compuestos químicos. No todos los humedales son sumideros de nutrientes ni son un patrón de estación a estación o de año a año, los humedales son también a menudo conectores de ecosistemas adyacentes por la exportación de materiales orgánicos, aunque los efectos directos sobre los ecosistemas adyacentes han sido difíciles para cuantificar.

Aunque los humedales son similares a los ecosistemas terrestre y acuático, en esto pueden ser sistemas altos en nutriente o bajo en nutrientes, hay diversas diferencias, particularmente en la importancia de nutrientes y en función de la vegetación en el ciclo de los diferentes nutrientes. (Mitsch y Gosselink, 2000).

2.9.1. Tipos de nitrógeno en humedales

El nitrógeno tiene un ciclo biogeoquímico complejo con múltiples transformaciones bióticas y abióticas abarcando siete valencias o estados de oxidación (+5 a -3), los compuestos incluyen una variedad de nitrógeno orgánico e inorgánico, formas que son esenciales para la vida.

Las transformaciones del nitrógeno (Fig. 2.1) involucran varios procesos microbiológicos, algunos de los cuales hacen a los nutrientes menos disponibles para que las plantas los capten, en ión amonio (NH_4^+), que tiene un estado de oxidación de -3, es la principal forma de nitrógeno mineralizado en la mayoría de los suelos inundados de los humedales. El presencia de una zona oxigenada sobre una anaeróbica o zona reducida, es crítica para la diversidad de vías a seguir por las reacciones químicas (Mitsch y GosselinK, 2000).

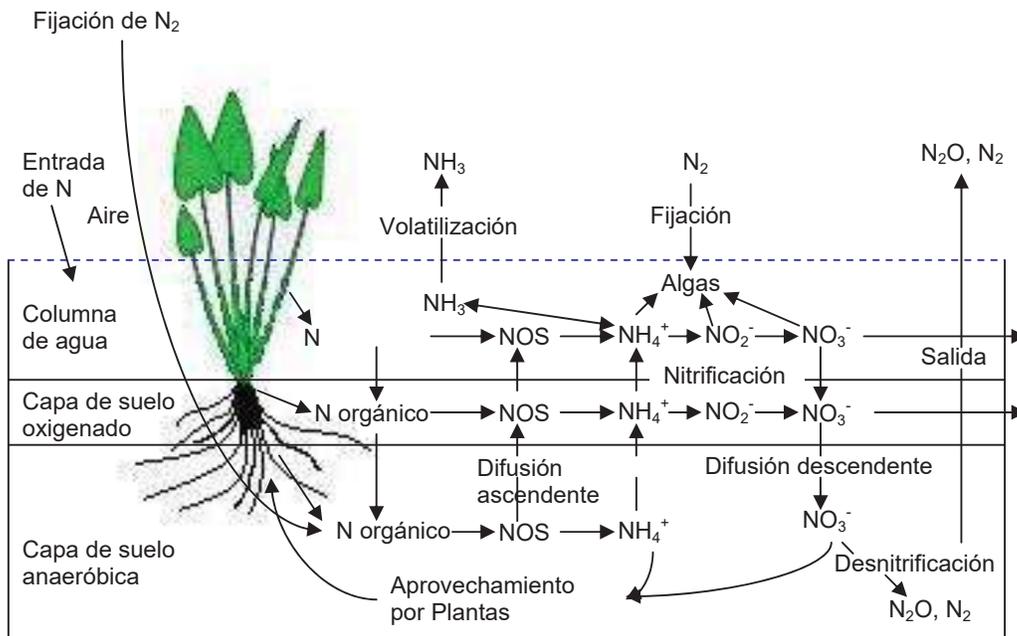


Figura 2.1. Transformaciones del nitrógeno en humedales. NOS indica nitrógeno orgánico soluble.

Las formas inorgánicas de más importantes del nitrógeno en los humedales son amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-), también el nitrógeno se puede encontrar de forma gaseosa tales como el dinitrógeno (N_2), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO_2 y N_2O_4) y amoníaco (NH_3). El óxido nitroso es un producto intermediario de la desnitrificación microbiana, la cantidad de óxido nitroso comprendida durante la desnitrificación depende de la cantidad de nitrógeno desnitrificado y la cantidad de N_2 para N_2O producido. Esta cantidad es afectada también por aeración, pH, temperatura y nitrato para la cantidad de amoníaco en el sistema de desnitrificación (Vymazal, 1995).

El nitrógeno también puede estar presente en los humedales en algunas formas orgánicas incluyendo urea, aminoácidos, aminas purinas y pirimidinas, las cantidad de nitrógeno orgánico en muestras de agua y sólidos es funcionalmente estimado por reducción de la concentración de amoníaco del nitrógeno Kjeldah total (NTK), el cual es una medición de nitrógeno orgánico y amoníaco (Kadlec y Knight, 1996).

El amoníaco total es igual a la suma del amoníaco no ionizado (NH_3) y el amoníaco que si es ionizado (NH_4^+), en un valor de $\text{pH}=8.0$ aproximadamente el 95% del nitrógeno amoniacal está en forma de NH_4^+ , a un valor de pH alcalino cambia la ecuación (1) en relación a la producción de amoníaco gaseoso (Middlebrooks y Pano, 1983).



A una temperatura de 25°C y a pH de 7.0 y 9.3 el NH_4^+ forma aproximadamente 0.6 % y 50% respectivamente, la temperatura afecta tanto a la constante de equilibrio como el coeficiente de transferencia de masa. A un pH de 9.5 y una temperatura de 0°C el NH_3 forma aproximadamente el 20% del nitrógeno amoniacal total, mientras que a una temperatura de 30°C el 70%.

El amoníaco es importante en los humedales por que es la forma de nutriente del nitrógeno preferido por la mayoría de las especies de plantas de los humedales y especies de bacterias autótrofas; porque es químicamente reducido y en consecuencia puede ser rápidamente oxidado bajo condiciones aerobias, resultando un consumo significativo de oxígeno (aproximadamente 4.3 g de oxígeno por gramo de amonio oxidado); y el amoníaco no ionizado (NH_3) es toxico para algunos seres vivos acuáticos en una concentración relativamente baja (generalmente a concentraciones mayores de 0.2 mg/L (Kadlec y Knight, 1996).

El nitrito (NO_2^-) es un intermediario del estado de oxidación del nitrógeno (+3) entre amoníaco (-3) y nitrato (+5), a causa de esta condición energética del intermediario, el nitrito no es químicamente estable en la mayoría de los humedales y generalmente lo encontramos en muy bajas concentraciones. Los niveles detectables de nitrito en humedales frecuentemente indican asimilación incompleta de nitrógeno y la presencia de una fuente antropogénica (Kadlec y Knight, 1996).

El nitrito es muy importante en los procesos de transformación del nitrógeno debido a que es un producto intermediario en la nitrificación aeróbica así como en el proceso de desnitrificación anaeróbica. Bajo condiciones del suelo, de acuerdo con el cual las zonas anaeróbicas y las aeróbicas están cerradas, el movimiento del nitrito puede ser una conexión o enlace entre ambos procesos de transformación del nitrógeno (Van Cleemput y Baert, 1984).

El nitrato (NO_3^-) es la forma más oxidada del nitrógeno (+5) encontrada en humedales y todos los demás ambientes, debido a este estado de oxidación, el nitrato es químicamente estable y debería permanecer sin cambio, si no fuera por varios procesos biológicos donde se transforma el nitrógeno para consumo de energía (Kadlec y Knight, 1996).

Las masas de varias formas de nitrógeno pueden ser sumadas para estimar el total de masa del nitrógeno presente en un humedal, el nitrógeno total es calculado por la adición del valor del nitrógeno Kjeldahl (nitrógeno orgánico y amoniacal) y la concentración de nitratos y nitritos ($\text{NO}_x\text{-N}$). En los detritus, suelos y tejido biológico, el nitrógeno está presente predominantemente como soluble y nitrógeno orgánico insoluble, el nitrógeno total en estos almacenes de humedales es aproximadamente igual a el nitrógeno total Kjeldahl (Kadlec y Knight, 1996).

2.9.2. Tipos de fósforo en humedales

El ciclo del fósforo es fundamentalmente diferente al ciclo del nitrógeno, no hay cambios de valencia durante la asimilación biótica del fósforo inorgánico o durante la descomposición del fósforo orgánico por microorganismos.

El fósforo (Fig. 2.2) es uno de los elementos químicos limitantes más importantes en los ecosistemas, y los humedales no son la excepción, es uno de los mayores nutrientes limitantes en los pantanos del norte, marismas dulceacuícolas y ciénagas del sur.

En otros humedales tales como humedales de uso agrícola y marismas de agua salada, el fósforo es un importante mineral, aunque esto no es considerado un factor limitante debido a su relativa abundancia y estabilidad bioquímica. La retención de fósforo es considerado uno de los más importantes atributos de los humedales naturales y construidos (Mitsch y GosselinK, 2000).

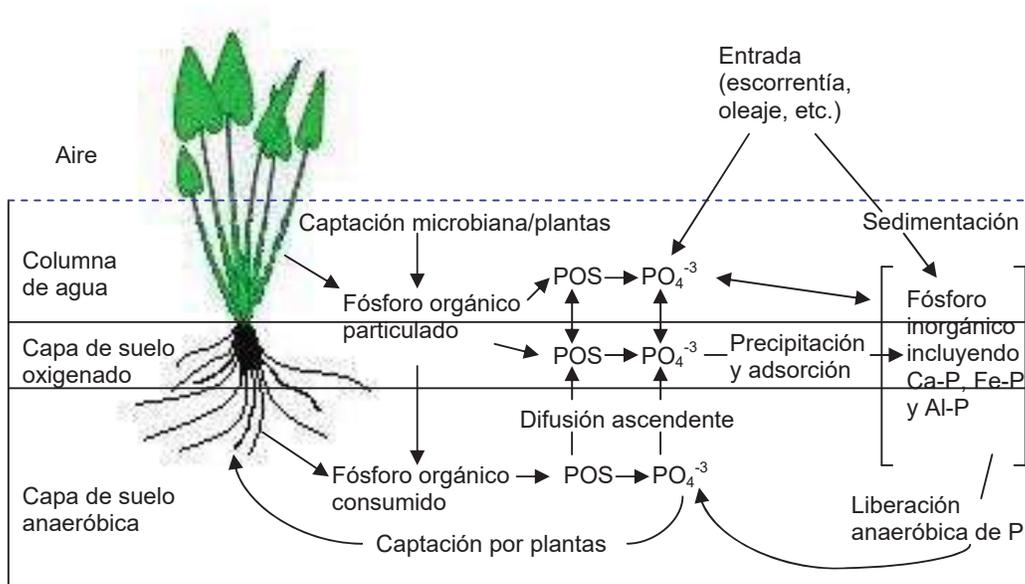
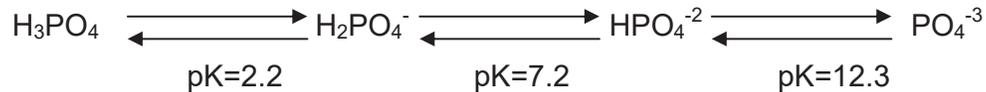


Figura 2.2. Transformaciones de fósforo en humedales. POS indica el fósforo orgánico soluble.

Las transformaciones del fósforo en los humedales comprenden adsorción, desorción, precipitación, disolución, captación microbiana y por plantas, fragmentación, mineralización, sedimentación y sepultamiento (Vymasal, 1995).

El fósforo en los humedales se halla como fosfato (PO_4^{-3}) en compuestos orgánicos e inorgánicos, el ortofosfato es la única forma del fósforo para ser utilizado directamente por las algas y las macrófitas y por lo tanto un principal intermediario entre el fósforo orgánico e inorgánico en el ciclo del fósforo en los humedales (Vymazal, 1995).

En agua, el ortofosfato se encuentra en equilibrio iónico, por ejemplo:



Con H_2PO_4^- y HPO_4^{-2} siendo las especies predominantes sobre un rango de pH de 5 a 9 (Stumm y Morgan, 1970). Otro grupo de compuestos de fósforo inorgánico son polifosfatos linealmente condensados y cíclicos, fósforo orgánicamente-confinado por ejemplo fosfolípidos, ácidos nucleicos, nucleoproteínas, azúcares fosforilados o polifosfatos orgánico condensados (Coenzimas, ATP; ADP, AMP) (Vymazal, 1995).

Primeramente en el ciclo del fósforo, el fósforo sedimentable se halla en la valencia de +5 (oxidado), porque los estados de oxidación más bajos son termodinámicamente inestables y rápidamente oxidados a PO_4^- e incluso en suelos de humedales reducidos (Lindsay, 1979).

El fósforo tiene únicamente una etapa pequeña gaseosa, la fosfina (PH_3) (Dévai *et al*, 1998, Dévai y De Laune, 1995), la fosfina es soluble en agua, pero tiene una presión de vapor grande. Esta puede ser emitida de lugares con potencial redox extremadamente bajo, junto con metano.

Dévai *et. al.*, (1988) midió emisiones de fosfina en un humedal construido en Hungría y estimo que $1.7\text{gm}^{-2}\text{año}^{-1}$ de fósforo fue como se perdió por esta ruta química.

Kadlec y Knight, (1996) señalaron fuera de que la ciencia de humedales se ha involucrado a enfocar categorías de compuestos de fósforo que son definidos por métodos de análisis, de esos puntos de vista los autores distinguieron las siguientes formas predominantes de fósforo: disuelto en agua (fase acuosa); disuelto o suspendidos (agua más sólidos suspendidos asociados); adsorbido a la superficie de partículas de suelo; contenido en la estructura de la biomasa y contenido en le estructura de partículas de suelo.

Los humedales proporcionan un ambiente para la interconversión de todas las formas del fósforo, es fósforo reactivo soluble es capturado por plantas y transformado en tejido o puede ser absorbido por el suelo del humedal y sedimentos.

El fósforo estructural orgánico puede ser liberado como fósforo soluble si la matriz orgánica es oxidada, los precipitados insolubles se forman bajo algunas circunstancias, pero pueden redisolverse por alteraciones (Kadlec y Knight, 1996).

El fósforo que entra a la columna de agua del humedal es rápidamente absorbido por bacterias, perifiton y plantas. Estudios con radioisótopos de fósforo han demostrado que 10 a 20% del fósforo es controlado por captación de la biota inicialmente (Davis, 1982; Richardson, 1985).

Las transformaciones de fósforo inorgánico, las cuales son complejas, y la retención de fósforo en los suelos de los humedales y sedimentos son controlados por la interacción del potencial redox, pH, Fe, Al y minerales de calcio, complejos organometálicos, arcillas minerales y la cantidad de fósforo nativo en el suelo nativo (Richardson, 1985; Faulkner y Richardson, 1989; Vymazal, 1995).

Una gran cantidad de fósforo en el suelo y sedimentos están presentes en fracción orgánica, esto complica el sistema debido al equilibrio dinámico entre las formas de fósforo orgánico e inorgánico. La reducción del potencial redox seguida por inundación puede causar la transformación de minerales cristalinos de Al y Fe a especies amorfas, los hidróxidos amorfos de Al y Fe tiene más capacidad de adsorción de fósforo que los óxidos que son cristalinos debido a su gran número de grupos hidroxilos coordinados en su superficie (Richardson, 1999).

Trabajos recientes por Petrovic y Kastelan-Macan (1996) sugieren que la ligación de fósforo inorgánico puede implicar la formación de una asociación compleja de Ca, Mg, Fe y Al (dependiente del pH) ligado a sustancias húmicas. Los compuestos húmicos pueden actuar como puentes entre macromoléculas húmicas y iones fosfato. La otra posibilidad es un intercambio de ligandos de los complejos metálicos y la formación de fosfatos insolubles.

Petrovich y Kastelan-Macan (1996) han demostrado en experimentos de desorción que grandes concentraciones de ácidos fúlvicos compiten por los sitios de adsorción en las partículas minerales, tales ácidos fúlvicos pueden incrementar la desorción de fósforo en un 10 a 20 %. Estos hallazgos tienen importante consecuencias para almacenar y liberar el fósforo en el fondo de la turba de los humedales que han incrementado las acumulaciones de fósforo (Richardson, 1999).

En la mayoría de los humedales naturales hay una correspondiente acumulación de fósforo en los sedimentos, el fósforo es atrapado en los humedales que puede ser liberado bajo condiciones anaeróbicas o pH específico, bajo condiciones anaeróbicas, el fósforo asociado con óxido férrico (Mitsch y GosselinK, 1993).

Adicionalmente, las formas de adsorbidas del fósforo pueden ser liberadas, un pH alto puede incrementar la liberación de fósforo de los sedimentos, especialmente bajo condiciones oxidadas, por aumento de la desorción del fósforo a través de intercambio de ligandos o partículas de hidróxido de fiero (Anderson, 1975; Lee *et. al.*, 1977).

El fósforo también puede liberarse de los sedimentos por un pH bajo debido a la hidrólisis de fosfatos férricos y de aluminio y la liberación de fósforo adsorbido por arcillas y óxidos hídricos por intercambio de aniones (Ponnamperuma, 1972).

Parte del fósforo asimilado por macrófitas es también reciclado de nuevo hasta la columna de agua durante la captación (Carpenter, 1980; Smith y Adams, 1986; Reddy *et. al.*,1996).

La repartición de fósforo entre los sedimentos y la biota puede cambiar con el tiempo, y esto es importante para considerar las escalas de tiempo relevante cuando el fósforo está asociado a humedales.

Los humedales periódicamente pueden liberar fósforo, y bajo ciertas condiciones, la liberación de fósforo puede exceder su retención (Richarson, 1995; Mitsch y Gosselink, 1993; Elder, 1998; Geherels y Mulamoottil, 1989). En la rehabilitación de lagos y sus cuencas, los humedales naturales son a menudo empleados para continuar como deposito de fósforo hasta que después de que la carga de fósforo de la cuenca que ha sido reducida, el destino del fósforo que se acumula en el humedal, sin embargo, éste no es bien conocido.

2.10. Estudios en el lago de Pátzcuaro

Michoacán cuenta, entre sus recursos naturales, con un gran potencial acuícola: manantiales, ríos y lagos, a esto se debe que Michoacán signifique “Tierra de Señores que Pescan”.

Entre los lagos más importantes desde el punto de vista social, económico y pesquero está el de Pátzcuaro que se localiza en la parte centro-norte del Estado de Michoacán.

El lago de Pátzcuaro en el Estado de Michoacán representa uno de los más importantes cuerpos de agua en México. Su localización geográfica, su exclusiva fauna nativa de peces y los asentamientos de pueblos P´urhépechas en la ribera, identifican al lago de Pátzcuaro como una parte de la herencia nacional histórica, ecológica, social y de valor cultural.(Chacón, *et al* 1988).

El lago en su evolución natural posiblemente ha transitado de ser un sistema acuático oligotrófico de aguas claras y limpias a ser un lago eutrófico, proceso que ha sido acelerado por la acción del hombre. En la cuenca que es estrictamente endorréica la red de drenaje superficial converge al lago de manera radial, concentrando el agua de las lluvias y escurrimientos; otra fuente de agua son las aguas subterráneas que a manera de manantiales afloran tanto en el litoral como en su interior.

De todos los lagos mexicanos, el de Pátzcuaro ha sido objeto de un gran número de estudios biológicos, sociales, antropológicos e históricos, principalmente porque en sus márgenes se estableció la primera Estación Limnológica del país en el año de 1938. El objeto de la estación fue realizar estudios hidrobiológicos de los lagos de Pátzcuaro, Zirahuén, Cuitzeo y Chapala, así como de los ríos y presas del Estado de Michoacán y de los estados circunvecinos.

Existen más de 200 títulos de estudio y contribuciones acerca de este sistema lacustre, pero no obstante estas publicaciones y el esfuerzo de investigadores y dependencias, la región continúa sufriendo procesos de degradación ambiental y explotación inadecuada.

En la cuenca el balance hidrológico depende de la precipitación, evaporación, transpiración de las plantas, escurrimiento superficial, aguas subterráneas y extracciones. El agua llega al lago a través de corrientes superficiales y subterráneas, siendo los principales tributarios los arroyos de Chapultepec (Tzurumútar), Santa Fé, Quiroga, Ajuno y Huintzio (San Francisco Úrico).

En el año de 1982 se capturaron en Pátzcuaro 120 toneladas de pez blanco, en 1999 la captura total no alcanza ni siquiera las 8 toneladas de pez blanco. Se estima una pérdida económica anual superior a los 3 millones de dólares que afecta a una comunidad de 1500 pescadores y sus industrias anexas.

En el caso del lago de Pátzcuaro, uno de los lagos mexicanos con mayor diversidad de peces, la disminución de especies nativas es cada vez más evidente y la necesidad de crear alternativas de producción es cada vez más apremiante. Rosas (1970) proporciona información básica sobre el ciclo vital del pez blanco y un esquema para su cultivo, sin embargo la información proporcionada por este autor no fue suficiente ni sistematizada para hacer realidad el cultivo del pez blanco.

Lara (1974) reporta un crecimiento de pez blanco de hasta 250mm de longitud total, utilizando estanquería rústica como sistemas de cultivo. Armijo y Sasso (1976) proporcionan datos de incubación y sobrevivencia larvaria de charales mantenidos en acuarios.

García de León, (1985) y Pérez y García de León (1985) determinan la edad y crecimiento del pez blanco así como sus relaciones alimenticias y reproductivas de lobina negra. Estos autores sugieren la exigencia de híbridos entre charales y peces blancos en el lago de Pátzcuaro.

Morelos *et. al.* (1994) proporciona la información sobre el desarrollo embrionario del pez blanco en condiciones controladas, mientras que Rosas-Monje (1994), realiza ensayos para la producción de crías en jaulas de cultivo suministrando diversos alimentos.

Chacón y Rosas-Monge (1995), proponen un esquema de incubación y alimentación primaria de crías de pez blanco en condiciones semi-controladas, para actividades de restauración de poblaciones naturales de pez blanco y su cultivo piloto en canales de baja profundidad en el lago de Pátzcuaro.

A pesar que la biología de las especies nativas es conocida en lo general y de que existen condiciones favorables para el cultivo de las mismas, no existe hasta el momento reportes del cultivo intensivo o semi-intensivo, que incrementen la posibilidad de integrara estas especies a la acuicultura regional.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar la dinámica de nutrientes del ecosistema de humedal que forma parte del litoral sur del lago de Pátzcuaro, Michoacán.

3.2. Objetivos particulares

- 3.2.1.** Evaluar las principales variables ambientales del humedal de la ribera sur del lago de Pátzcuaro.
- 3.2.2.** Evaluar las características del agua en la zona de humedal
- 3.2.3.** Evaluar la concentración de materia orgánica
- 3.2.4.** Determinar el flujo de nutrientes a través del ecosistema de ribera en el lago de Pátzcuaro.

IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

4.1. Localización geográfica

El lago de Pátzcuaro se encuentra situado en la parte sur del Altiplanicie Mexicana. Los márgenes de la Altiplanicie son la Sierra Madre Occidental por el oeste; el límite sur lo marca la presencia del Eje Neovolcánico Transversal, el cual se extiende a lo largo de México de este a oeste en los paralelos latitudinales 19 y 20.

El lago de Pátzcuaro se encuentra situado en el Altiplano Mexicano a 360 km al noroeste de la Ciudad de México, coordenadas UTM: 245000E, 2185000N máxima y 197000E, 2140000N mínima (Figura 4.1)

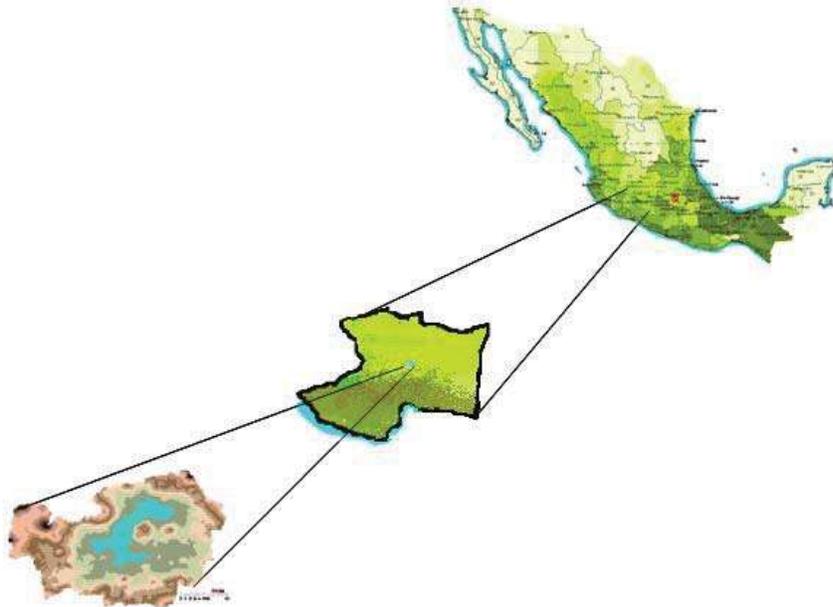


Figura 4.1. Ubicación de la cuenca y lago de Pátzcuaro, Michoacán.

El lago no posee efluentes ni ríos tributarios importantes, siendo alimentado por arroyos temporales superficiales durante la temporada lluviosa. Las entradas de agua al vaso lacustre derivan exclusivamente de la lluvia estacional y de la infiltración, por lo que las variaciones de nivel del agua son continuas. Sin embargo, se ha registrado un promedio de altitud de 2035 metros sobre el nivel del mar (De Buen, 1944c; Gorenstein y Pollard, 1983, Chacón *et al.*, 1991).

4.2. Fisiografía

La cuenca del lago de Pátzcuaro al igual que otros sistemas lacustres del Altiplano Mexicano se considera como un producto de la fragmentación del sistema Lerma- Santiago, una extensa y ancestral cuenca de drenaje que se localiza en el Cinturón Volcánico Transmexicano el cual se extiende desde la costa del Océano Pacífico hasta los márgenes de la Sierra Madre Oriental. La región es un graben originado por los procesos de tensión-distensión de las fallas principales (NE-EO) y las secundarias (NO-SE) del Cinturón Volcánica Transmexicano (Barrera, 1987).

Las cuencas endorréicas del Altiplano Mexicano se formaron a consecuencia de una intensa actividad tecto-volcánica que se presentó durante el Terciario Tardío y a principios del Cuaternario. El continuo vulcanismo que se manifiesta en el presente es uno de los resultados de la tectónica de placas que se presenta en la región específicamente del proceso de subducción de la placa de Cocos dentro de la placa Americana.

La cuenca constituye una depresión tectónica que se extiende sobre una superficie de 929 km² de los cuales 130 km² corresponden al vaso lacustre (Chacón-Torres *et al.*, 1989). La región se encuentra rodeada por un poco más de 200 volcanes de diferentes tipos y edades. En consecuencia, la región presenta una fisonomía de relieve muy compleja (Barrera, 1987).

Colinda al sur con las sierras de Santa Clara y Tingambato, al oeste con las sierras de Pichataro y de Comanja, al norte con el Pico del Zirate y el Cerro del Tigre, y al sur con los Cerros del Frijol y la Cantera.

Gorenstein y Pollard (1983) reconocen seis tipos de ambientes topográficos en la cuenca del lago de Pátzcuaro: a) aguas abiertas, representadas por el vaso lacustre libre de vegetación acuática, b) zonas pantanosas de tule, las cuales son extensas áreas litorales asociadas con la vegetación acuática marginal y que en la actualidad se reconocen como humedales, c) zona de riberas, localizada a un altitud de 2034-2035 metros sobre el nivel del mar incluyendo a islas, planicies inmediatas al lago y depósitos aluviales afectados por las oscilaciones estacionales del nivel de agua, d) pendientes bajas de la sierra, con un rango de altitud de 2100-2300 m, representadas por las pendientes menores de colinas y montañas así como de depósitos y flujos de lava, e) pendientes altas de la sierra, con un rango de altitud de 2300-2800 m, y f) caracterizado por las cumbres de las máximas elevaciones. La máxima elevación de la cuenca de drenaje está representada por el Pico de Zirate a 3300 metros sobre el nivel del mar.

4.3. Morfometría

Considerando la forma particular del vaso lacustre el lago de Pátzcuaro fue dividido por De Buen (1941; 1944) en cuatro grandes Senos o secciones:

- 1) El Seno Quiroga ó Seno Norte que cubre la porción norte-noreste del sistema, limitado por una línea imaginaria que parte de la punta de la población de Ichupio hasta la punta de mayor extensión de la península que De Buen denominó Italia, la zona delimitada presenta un amplitud máxima de 10 km en su eje sureste-noroeste y 3.5 km de longitud (noreste-suroeste).
- 2) El Cuello porción Central del vaso que se continúa hacia el sur siendo ésta la porción más angosta del lago. Sus límites aunque poco definidos están marcados por De Buen en una línea imaginaria entre la isla de la Pacanda y la población de Puácuaro, sigue la parte oriental de la cadena de las islas Pacanda, Yunuén, Tecuena y Janitzio finalizando en le estrecho que se forma entre la costa oriental de la Isla de Janitzio y la Punta de Santiago.

El Cuello presenta una amplitud promedio de 3.75 km en su eje sureste-noroeste y una longitud de 7.5 km en su eje noreste-suroeste.

- 3) El Seno Ihuatzio o Seno sureste que avanza hacia el oriente cubriendo las poblaciones de Ihuatzio, Tzurumútaró, Pátzcuaro, Huecorio y Tzentzenguaro hasta encontrar su frontera con una línea imaginaria que recorre de la isla de Jarácuaro a la isla de Janitzio. Debido a la continua oscilación del nivel del agua y a la pérdida de profundidad las dimensiones del Seno de Ihuatzio se modifican constantemente, sin embargo, se puede estimar una amplitud promedio en su eje sureste-noroeste de 8.25 km y una longitud promedio de 4 km en su eje noreste-suroeste.
- 4) Finalmente, el Seno Erongarícuaro o Seno suroeste, con sus límites definidos por el Seno Ihuatzio y el Cuello, con una amplitud promedio de 7.2 en su eje sureste-noroeste y una longitud promedio de 3.9 km en su eje noreste-suroeste.

La máxima longitud o eje mayor del lago es de 19.75 km medida en la dirección SSO-NNE. Su perímetro es de 114.1 km y la máxima amplitud o anchura es de 10.9 km.

Mediante cartografía computarizada integrando imágenes del satélite de recursos naturales SPOT-1 y la carta batimétrica a escala 1:25,000, se estima que para 1986-1988 la superficie de aguas abiertas libres de vegetación acuática era de 82.9 km², de los cuales 30.3 km² corresponden al Seno norte, 24.4 km² al Cuello y 28.2 km² a los Senos ubicados en el sur. Los 47.1 km² restantes de la superficie total del lago quedan repartidos en superficie de las islas (área insular), zonas de vegetación acuática emergente y áreas de anegamiento. Lo anterior significa que un 36% del área total del lago se encuentra sujeto a un estancamiento en áreas no navegables.

Las máximas profundidades se registran en el Seno norte del vaso lacustre mientras que las áreas someras se presentan en el sur. Las fronteras aguatierra se encuentran menos definidas en toda la región sur debido al incremento de la vegetación acuática, ambientes pantanosos y al desarrollo de pendientes más suaves entre las líneas de contorno.

La profundidad máxima registrada es de 12.0m en el Seno norte. De Buen (1944) reportaba una profundidad máxima de 15.0m para la misma zona. Esta cifra tiende a variar entre los autores, sin embargo, es evidente que el registro de profundidad máxima tiende a disminuir con el tiempo debido a los procesos de evaporación, extracción de agua por bombeo y azolve. Chacón *et al* (1988) utilizando la ecuación parabólica sugerida por Håkanson (1981), estimaron que el volumen total del lago de Pátzcuaro es de 628.4 millones de metros cúbicos.

Con el paso del tiempo algunas islas han venido a formar parte de tierra firme y nuevas islas han venido a aparecer a medida que el lago pierde su perfil de profundidad. Un ejemplo muy claro de lo anterior es la isla de Jarácuaro, la isla más grande del lago, la cual se encuentra conectada a tierra firme por un camino de terracería y piedra. Lo anterior, ha ocasionado una obstrucción en el sistema de circulación del agua en todo el Seno Erongarícuaro favoreciendo con ello el estancamiento del agua, el aumento de su temperatura y por consecuencia la pérdida del agua por evaporación. Cerca de la isla de Jarácuaro se encontraba la nueva isla de Pastora, la cual recientemente ha llegado a conectarse con la isla de Jarácuaro para formar en la actualidad un conjunto insular de mayores dimensiones. Una nueva isla conocida como La Pastora se ha unido en la parte central del Seno Erongarícuaro principalmente por el desarrollo de vegetación acuática y por los sedimentos acumulados durante los últimos años de estancamiento del agua en el Seno.

El perfil del terreno en la línea de costa del lago de Pátzcuaro se encuentra representado por gradientes mayores del 5% de pendiente.

Los perfiles suaves del terreno, es decir, menores del 5% se encuentran en su mayoría en el sur particularmente en las cercanías de la isla de Pastora y de las islas de Urandén de Morelos y Urandén de Morales.

Los perfiles más abruptos con pendientes hasta del 33% se encuentran localizados en el Seno norte y en las márgenes orientales del Cuello. Excepcionalmente la línea de costa cercana a la población de Quiroga presenta un perfil muy suave registrándose pendientes de hasta 0.97%. (Chacón *et al.*, 1988).

4.4. Geología y suelos

Dentro del Eje Neovolcánico Transversal existe una gran concentración de conos cineríticos, conos de lava y volcanes centrales (Demant, 1978; Robin y Demant, 1975). El más joven de éstos, el volcán del Parícutín, hizo erupción en 1943-1952, situado a 60 km al sur del lago de Pátzcuaro. Hasenka y Camichael (1985) estimaron que cerca de 1000 volcanes del Eje Neovolcánico Transversal se encuentra en terreno michoacano con una densidad máxima de 11 volcanes/100 km², ubicando esta zona en la región del Parícutín.

La intensa actividad volcánica que se presentó durante el Terciario Medio hasta el Cuaternario Tardío, la frecuente sismicidad y la alta inestabilidad del Cinturón Volcánico Transmexicano que continúan hasta el presente, han sido relacionado con el proceso de subducción que sufre la Placa de Cocos dentro de la Placa Norteamericana. Estos movimientos tectónicos se han presentado en la Trinchera Mesoamericana la cual se localiza a lo largo del margen continental del Océano Pacífico (Nixon, 1982; Canul y Rocha, 1985; Canul, 1985, en Chacón *et al.*, 1993).

Aunque el Altiplano Mexicano presenta una larga historia de inestabilidad, se considera que el origen del lago de Pátzcuaro es geológicamente reciente. Durante el Terciario y al inicio del Pleistoceno.

El ancestral río Lerma probablemente corrió hacia el oeste desde la región Central de México hacia el Océano Pacífico (De Buen, 1943; Alvarez, 1972). Un subsecuente levantamiento y actividad volcánica durante la última fase del Pleistoceno resultó en una serie de grandes lagos que ocuparon el sistema de drenaje del antiguo río Lerma (Maldonado-Koerdell, 1964; Barbour, 1973b).

La mayoría de estos lagos fueron eventualmente drenados por el actual río Lerma pero algunas cuenca permanecieron cerradas. Los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén fueron formados como un resultado de una sucesiva compartimentalización por flujos de lava en uno de los tributarios del antiguo río Lerma (De Buen, 1943a; Álvarez, 1972).

De Buen (1943a) sugirió que una ancestral conexión existió entre estos tres lagos en dirección norte comenzando en el lago de Zirahuén hacia el lago de Pátzcuaro corriendo en dirección noreste hacia el valle de la ciudad de Morelia siguiendo la cuenca del río Grande de Morelia y finalmente hacia la parte sur del lago de Cuitzeo, éste último conectado en pasado con el río Lerma.

El lago de Pátzcuaro con frecuentes variaciones de nivel de agua no tiene tributarios importantes a excepción del canal de Chapultepec cuyo volumen es regulado para fines agropecuarios, el lago sufre una continua pérdida del relieve de profundidad y anteriormente fue considerado por De Buen (1943a) como un lago geológicamente maduro.

El lago de Pátzcuaro se encuentra circundado por montañas de origen volcánico las cuales determinan una accidentada topografía del terreno con un alto grado de pendiente para la mayor parte de la cuenca de drenaje, de tal manera que en distancias horizontales relativamente cortas (1.5 km), la altitud se incrementa de 2035m a 2600 m (Gómez-Tagle, en preparación).

La naturaleza geológica del lago de Pátzcuaro como en la mayoría de su cuenca de drenaje consiste de rocas volcánicas de la era Cenozoica y de sedimentos lacustres de origen fluvial.

Las rocas volcánicas recientes son en su mayoría basaltos. Las rocas de la era Terciaria son principalmente andesitas que contienen olivina, albita, biotita, augita e hiperstenos (Villarello, 1909; Saporito, 1975; INEGI, 1985). Los tipos de suelo también están asociados con el origen volcánico de la región y estos se encuentran representados en su mayoría por andosoles y luvisoles.

Los suelos andosoles son suelos originados a partir de cenizas volcánicas, son oscuros de color con un alto contenido de fósforo y son muy susceptibles a la erosión (Toledo y Barrera-Bassols, 1984). Los suelos luvisoles son también suelos localizados en regiones volcánicas, de color rojizo, ricos en arcilla, ácidos y al igual que los andosoles muy susceptibles a la erosión. Otro tipo de suelos se localiza en áreas más pequeñas de la cuenca de drenaje particularmente sobre la región este del lago. Estos son principalmente suelos Acrisoles, Vertisoles y Gleysoles, éste último es un componente primario de las riberas del lago (Toledo y Barrera-Bassols, 1984; Gómez-Tagle, en preparación).

4.5. Hidrología

El relieve accidentado del Cinturón Volcánico Transmexicano ha dado origen a tres grandes vertientes en el Estado de Michoacán (Norte, Centro y Sur), las cuales han formado cuatro regiones hidrológicas, la Región Hidrológica de la Costa de Michoacán (No. 17) localizada en la porción sur del Estado, la región Hidrológica del río Balsas (No. 18) localizada en la porción Central y la Región Hidrológica Lerma-Chapala-Santiago (No. 12) localizada en la porción norte de Michoacán, en donde se incluye la región lacustre (Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén).

El lago de Pátzcuaro es una cuenca cerrada que colinda al Oriente con el Río Grande de Morelia, al poniente con el Río Lerma y al sur con el cuenca del lago de Zirahuén.

El lago de no cuenta con efluentes ni con ríos tributarios importantes, siendo alimentado ocasionalmente por arroyos temporales superficiales durante la temporada lluviosa como son el río San Gregorio, los arroyos de Santa Fé y Soto y por extremo sureste recibe las aguas de descarga agrícola del canal de Chapultepec.

Por lo tanto, las entradas de agua al vaso lacustre se derivan exclusivamente de la lluvia estacional y de la infiltración, por lo que las variaciones de nivel son continuas.

El patrón de drenaje no se encuentra integrado debido en primer lugar a la utilización de los escurrimientos en los diferentes sistemas de irrigación y en segundo al proceso de infiltración del agua hacia el subsuelo. Sin embargo, se observa un tipo de drenaje radial centrípeto debido a que la mayoría de las corrientes convergen eventualmente en el vaso lacustre, aunque en las partes altas de la cuenca se observa un patrón de drenaje de tipo dendrítico.

La precipitación pluvial permite que el lago reciba aproximadamente 1000 Mm³ anuales, de los cuales 800 Mm³ se pierden por evapotranspiración; esto significa un aporte real al lago de aproximadamente 200 Mm³ (Barrera-Bassols, 1986). Sin embargo, la Comisión Nacional del Agua calculó que se aporta al lago un volumen medio anual de 111 Mm³ (CNA, 1991).

Con base en los cambios anuales del ciclo hidrológico, los niveles de agua del lago han mostrado variaciones; el primer registro de agua correspondiente al año de 1939 (De Buen y Zozaya, 1942) y fue de 2,035.80 msnm. Posteriormente los registros muestran cambios importantes, destacando el nivel de 2,035.88 msnm para 1955, que después subió a 2,039.46 msnm en 1977 y luego descendió a 2,036.81 msnm durante 1991 (CNA, 1991).

La profundidad del lago ha variado debido a su evolución natural y a los efectos de la actividad humana. La deforestación ha provocado de que aproximadamente el 50% de su superficie se encuentre sin cubierta vegetal, que las lluvias arrastren la tierra y que lleguen al lago más de 85,000 m³ anuales de azolve (Flores, et al, 1992), con la consiguiente pérdida de profundidad y volumen para el lago.

De la comparación realizada entre los estudios batimétricos realizados por De Buen (1944), y por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH, 1984) se observa la pérdida en la columna del agua de la siguiente manera:

	De Buen (1944)	SARH(1984)
Seno de Quiroga	15.0 m.	12.0 m.
Cuello del algo	10.2 m.	10.0 m.
Seno del Erongarícuaro	6.7 m.	4.0 m.
Seno de Ihuatzio	5.2 m.	3.0 m.

Estos cambios demuestran que en 40 años, el transporte de azolves ha provocado tanto la acelerada disminución en la profundidad del lago así como la pérdida en su superficie. Esto se observa en la parte sur con la sustitución del agua que rodeaba a las ex islas Tzurumútaró y Erongarícuaro por llanuras lacustres. De manera que el lago perdió área de inundación y en cambio avanzó la tierra firme incorporando a las islas en áreas peninsulares.

4.6. Clima

El clima del Altiplano Mexicano está determinado principalmente por la interacción de la circulación general de la atmósfera con el accidentado relieve de la región volcánica de México.

Los registros históricos del clima sugieren que las variaciones regionales de precipitación de un año para otro están determinadas básicamente por cambios en la circulación atmosférica la cual afecta a la mayor parte del país. Por consecuencia, es de esperar que la cuenca del lago de Pátzcuaro se encuentre sujeta frecuentemente a grandes variaciones en la cantidad de lluvia recibida.

El clima predominante es templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano. El régimen térmico es de verano fresco y largo, con poca oscilación térmica; la temperatura máxima se presenta antes del solsticio de verano, con clave C (W')(W)b (i')g (Barrera, 1986).

El área se caracteriza por temperaturas medias de 16°C, máximas de 37°C y mínimas de 5°C, y tienen una precipitación anual de 900 a 1400 milímetros, la mayor parte de la cual ocurren durante el periodo que va de fines de mayo a octubre y que alterna con una estación seca, de noviembre a principios de mayo (Toledo, *et al.*, 1980).

Aunque algunos parámetros climáticos como la temperatura media anual han sido relativamente constantes durante el último siglo, se ha observado una disminución en la cantidad de lluvia para el periodo de 1970-1987. El cociente de precipitación sobre temperatura indica que la humedad se ha reducido considerablemente. Lo anterior, ha tenido profundos efectos sobre la oscilación de nivel del agua. Aunque la disminución en la cantidad de lluvia es posiblemente un reflejo de la presencia de los periodos secos prolongados que afectan a la mayor parte del país, la disminución en el nivel del lago es también un efecto en la reducción de los volúmenes infiltración debido al acelerado proceso de erosión que presenta la cuenca de drenaje (Chacón *et al.*, 1991).

4.7. Vegetación

En la actualidad el tipo de vegetación que predomina en la cuenca del lago de Pátzcuaro es un resultado directo o indirecto de varios siglos de influencia antropogénica.

Sin embargo, existen evidencias antropológicas y paleolimnológicas (Watts y Bradbury, 1982; Gorenstein y Pollard, 1983) que indican el grado de explotación de los recursos naturales de la cuenca durante el siglo XV, antes de la llegada de los españoles y durante la influencia de la civilización P'urhépecha. Los resultados de estos estudios establecen que la cuenca del lago de Pátzcuaro estuvo sujeta a un tipo de manejo diversificado y de uso múltiple de recursos en donde la magnitud del disturbio ecológico era mínima. Aunque las actividades antropogénicas han estado presentes por varios siglos, el cambio ambiental más drástico se ha observado durante el presente siglo con la introducción de sistemas de producción pero también poco apropiados para la región (Argueta y Cuello, 1985; Caballero *et al.*, 1985; Gorenstein y Pollard, 1983; Toledo *et al.*, 1980; Toledo y Barrera, 1984).

En la mayor parte de la ribera del lago la vegetación ha sido retirada y el área ha sido usada para la agricultura y el pastoreo. La vegetación de la sierra media y alta no presenta un patrón de distribución particular sino que ofrece un complejo mosaico de asociaciones vegetales que se encuentran determinados por una combinación de factores edáficos, topográficos, mesoclimáticos y de uso de la tierra (Caballero *et al.*, 1981; Barrera, 1986).

La siguiente descripción es solamente una descripción de la vegetación más abundante en la cuenca, una información botánica más detallada ha sido proporcionada por Caballero *et al.* (1981), Leavenworth (1946), Rzedowski (1978) y Toledo *et al.* (1980).

Las máximas elevaciones o ambientes alpinos (2800-3200m) se encuentran representadas por bosques de pinabete (*Abies religiosa*) con algunas asociaciones de pino (*Pinus pseudostrobus*) y aile (*Alnus arguta*).

El disturbio ecológico en estas áreas ha estimulado el crecimiento del pasto alpino (*Festuca spp* y *Muhlenbergia spp*).

Las pendientes altas de la sierra (2300-2800 m) están presentadas por el bosque de pino (*Pinus leiophylla*, *P. michoacana*, *P. Pseudostrobus* y *P. montezumae*), bosque de encino (*Quercus rugosa*, *Q. castanea*, *Q. laurina*) y los bosques de pino-encino (*P. leiophylla* y *Q. castanea*; *P. montezumae* y *Q. rugosa*).

Otras especies arbóreas de interés comercial son el sirimo (*Tilia mexicana*), el jaboncillo (*Clethra mexicana*) y el limoncillo (*Ternstroemia pringlei*), éstos últimos casi erradicados de la región.

Áreas deforestadas y erosionadas ubicadas en estas elevaciones y pendientes pronunciadas sostienen vegetación menos robusta (*Bursera cunneata*), maguey (*Agave spp*), palo santo (*Sencio preacox*) y (*Clusia salvini*).

En la sierra de pendientes bajas (2100-2300m) se encuentran asociadas principalmente pastos y vegetación secundaria herbácea como el huizache (*Acacia pannatula*), tsambas (*Yuca filiferra*), paré (*Opuntia spp*), maguey (*Agave spp*), uña de gato (*Mimosa buncifera*), chiquito (*Cortón calvenscens*) y la vegetación de agricultura (maíz, frijol, trigo, lenteja y otros más). La ribera (2035-2100 m) se encuentra en su mayor parte bajo producción agrícola/alfalfa, garbanzo, chícharo, lenteja, y otros).

La vegetación acuática se encuentra representada por 49 especies incluidas en 23 familias (Lot y Novelo, 1988). Las comunidades de plantas acuáticas emergentes están representadas por tules (*Scirpus americanus*, *Typha latifolia*, *Sagitaria gramínea*, *Cyperus níger*). Estas especies bajo condiciones favorables de pendiente del terreno y de nutrientes pueden encontrarse hasta 4.0 metros de profundidad.

La vegetación acuática sumergida con hojas flotantes se encuentra representada por únicamente dos comunidades dominadas por *Nymphaea mexicana* y *Potamogeton illinoensis*, éstas se encuentran frecuentemente asociadas con vegetación acuática típicamente sumergida (*Potamogetum latifolius*, *Najas guadalupensis*, *Ceratophyllum demersum*, *Utricularia gibba* y *U. vulgaris*). Algunas de las anteriores han sido localizadas hasta 7.0 metros de profundidad en aguas transparentes (Caballero *et al.*, 1981).

4.8. Asentamientos humanos

Esta región es el asiento de la cultura P'urhépecha y prevalecen aún grupos indígenas herederos esta cultura ancestral, en la actualidad se estima que aproximadamente el 17% del total de la población, que rodea la cuenca del lago de Pátzcuaro, es P'urhépecha, la cual representa a una de las grandes culturas lacustres de la antigua mesoamérica. Para el año de 1986 se registraron 28 poblaciones ribereñas y 8 islas con asentamientos humanos.

Se reconoce además que la presencia del hombre en la región lacustre data de por lo menos el siglo XII. Lo anterior debido a los descubrimientos de polen de maíz en el fondo del lago que hace pensar que la práctica de la agricultura en la región tiene por lo menos 3,500 años (Watts y Bradbury, 1982).

Las prácticas agrícolas, en el Estado P'urhépecha, cubrieron hasta un 45% del territorio de la cuenca, comercialmente alimentaban a 94 asentamientos con distintos rangos de población. Esta economía se basaba principalmente en el cultivo de maíz, frijol, calabaza, chía y chile, y de los ingresos obtenidos se pagaban tributos.

A partir del proceso de industrialización del país la región lacustre sufrió una grave explotación irracional de sus recursos naturales, debido en principio a la aceleración de extracción de los mismos, como principales y únicas actividades productivas de la región.

Por esta razón se ha generado el proceso de eutroficación, debido a la falta de medidas adecuadas para contener este efecto, este fenómeno natural se ha acelerado debido también a las actividades agrícolas de los poblados que integran la cuenca.

A mediados de los años 80s, la mayoría de la producción se realizaba en la parte baja y media de la cuenca, en suelo de tipo matorrales y pastizales. Adicionalmente las comunidades de vegetación como la chuspatal, la paxkurinda y las potamogetonáceas que son utilizadas para producir algunos artículos artesanales, característicos por los poblados aledaños al lago.

Pátzcuaro posee aún una cultura pesquera heredada por la cultura Purépecha que aporta los conocimientos sobre el instrumental, ya sea original o adaptado, aunque la riqueza pesquera ha venido disminuyendo. La introducción de 4 especies distintas al hábitat del lago originó una alteración en el ecosistema del lago, ya que se afectó la ecología de la biodiversidad nativa.

En lo que a especies acuáticas se refiere, antes de los 80s existían solamente el pescado blanco, el charal, el huerepo, el charal rayado, el chehua, el tirhú, el choromu y el panza azul. Y ya para mediados de los 80s quedaban solamente el blanco, el huerepo, la trucha, la acúmara, y casi desaparecieron el choromu, la chehua, el tirhú y el panza azul. Las técnicas más utilizadas en la pesca eran tsikiata, cherémekua (red agallera), parákatecha y uarokua keri (chinchorro).

La cuenca del lago de Pátzcuaro la integran seis municipios, que son: Pátzcuaro, Quiroga, Tzintzuntzan, Erongarícuaro, Tingambato, Huiramba y Nahuatzen, sin embargo es necesario aclarar que los tres últimos administrativamente ocupan una porción muy pequeña de la cuenca, la distribución se sitúa de la siguiente manera: 47 poblados de los 114 que se encuentran ubicados en esta cuenca pertenecen al municipio de Pátzcuaro, 16 al municipio de Erongarícuaro, 14 al municipio de Quiroga, 32 al municipio de Tzintzuntzan, dos de Nahuatzen, uno de Tingambato y dos de Huiramba.

Sin embargo, los municipios que inciden directamente en la cuenca porque abarcan una mayor proporción tanto en superficie como en territorio son los primeros cuatro. Estos involucran directamente el 95.6% de los asentamientos humanos situados en la cuenca a la vez que más del 95% de la población de la misma.

4.9. Calidad del agua

La calidad del agua está determinada principalmente por el balance entre los materiales que ingresan y egresan del sistema, en Pátzcuaro los ingresos corresponden a los materiales introducidos por las escorrentías temporales y permanentes a partir de la cuenca y las aguas residuales de las poblaciones, siendo un lago endorreico, acumula dentro de la cubeta materiales disueltos y suspendidos, por lo que es muy susceptible a los incrementos en tales ingresos, por la deforestación, tormentas, deslaves, aplicación de fertilizantes, aguas residuales municipales, agrícolas e industriales sin tratamiento. En segundo término intervienen las interacciones químicas entre los sólidos suspendidos y disueltos, con el agua y los organismos del ecosistema (Banderas *et. al.*, 2000).

Los primeros estudios incluyen determinaciones de variables fisicoquímicas del agua del lago de Pátzcuaro fueron elaborados durante la época del florecimiento de la Limnología en Norteamérica y tuvieron su auge después de la puesta en marcha en 1939, de la primera estación hidrobiológica que se estableció en México, precisamente a orillas del lago y que actualmente se conoce como Centro Regional de Investigaciones Pesqueras dependiente de la SEMARTAT (Banderas, *et. al.*) y actualmente de SAGARPA.

Chacón (1993) señala que los valores de pH manifiestan básicamente aguas alcalinas con un valor promedio de 9.3. Sin embargo, se registran valores de pH bajos hasta de 7.8 cerca de las descargas de aguas negras.

Valores más bajos de pH registrados particularmente en el Seno Norte son resultado de la acción combinada de los procesos nocturnos de respiración y degradación de la materia orgánica así como influencia de la contaminación por ácidos que se reciben por las descargas de aguas negras sin tratamiento alguno de la artesanía peletera localizada en la ciudad de Quiroga.

Además indica que la alcalinidad total en el lago de Pátzcuaro es principalmente resultado de la acción de iones bicarbonato y carbonato. El valor promedio de alcalinidad total es de 400 mg/L. Debido a que se presentan valores relativamente bajos de calcio y magnesio es muy probable que los bicarbonatos y los carbonatos se encuentren asociados con el sodio y el potasio. Esta asociación parece evidente al observar que la alcalinidad es más alta que la dureza total del agua. Utilizando la clasificación descrita por Sawyer y MacCarty (1967) se considera que las concentraciones de dureza total son moderadas en el lago de Pátzcuaro (125.26 mg/L).

Al comparar las concentraciones individuales de cationes se observa que el sodio es el catión dominante en la serie de cationes analizados siendo el gradiente de dominancia en el siguiente orden: $Na > Mg > K > Ca > Fe$. Por lo tanto, la mayor parte de la dureza moderada que representa el lago de Pátzcuaro es muy probable que se atribuya al magnesio y muy poco al calcio.

También obtuvo como resultado que valores de oxígeno disuelto son cercanos a la saturación siendo el valor promedio de 7.2 mg/l equivalente a 92.0 % de saturación de oxígeno. Sin embargo, se detectan valores más bajos dentro de un rango de 3 a 5 mg/l especialmente en el Seno Norte y en la porción Oriental del Cuello del Lago.

Las concentraciones de amonio y nitratos se observan dentro de un rango relativamente bajo con un promedio de 0.1 mg/L y 0.2 mg/L respectivamente indicando que los procesos de nitrificación son eficientes en toda la columna del agua.

Utilizando las tablas de Trussell (1972) se estima que para un pH de 9.4 y una temperatura media de 16° C cerca del 42.67 % de la concentración de amonía se encuentra en estado de ionizado, es decir como amoníaco. Este porcentaje se encuentra determinado principalmente por el alto pH y la del lago y se puede incrementar aún más con las temperaturas más altas siendo a 28° C un porcentaje de de ionización de 63.79 %.

De incrementarse las concentraciones de amonía en el agua entonces se presentarán condiciones de toxicidad para las especies de peces sensibles a la contaminación orgánica como es el caso del pez blanco.

Las concentraciones de nitratos que se registran en el lago son muy bajas a lo largo del año presentando valores promedio de 0.12 mg/L. En general, estas bajas concentraciones de nitratos en el lago indican que existe una continua utilización del nitrógeno por parte de las algas. Por lo tanto, en el lago de Pátzcuaro se encuentra limitado principalmente por nitrógeno.

Por el contrario, el fósforo, la clorofila-a y los sólidos suspendidos claramente muestran variaciones horizontales de concentración en el vaso lacustre. Estas variaciones se manifiestan como un gradiente de valores máximos en el Seno Norte a un mínimo de concentraciones en el Seno Sur.

Los promedios de concentración de fósforo reactivo disuelto son relativamente altos registrando un valor de 39.2 μ g/L indicando una constante disponibilidad de ortofosfato para el crecimiento del fitoplancton. Las máximas concentraciones de fósforo reactivo disuelto se detectan en el Cuello y en el Seno Sur con valores hasta de 48.8 μ g/L mientras que los valores de mínimos de 26.2 μ g/L se registran en el Seno Norte. La distribución de la clorofila-a y de los sólidos suspendidos ha sido evaluada con mayor detalle utilizando imágenes multiespectrales de satélite (Chacón-Torres, 1989; Chacón-Torres *et al.*, 1992).

Alcocer et al. (2002) estudian el lago mediante el análisis de 13 variables físicas y químicas de enero 1998 a enero de 1999. El análisis temporal separa cuatro intervalos de tiempo, siendo esto: frío/seco, templado/seco, lluvioso y muy lluvioso y concluye que aunque el lago de Pátzcuaro es un lago polimíctico templado continuo, los resultados demuestran su heterogeneidad ambiental como un mosaico físico y químico. El residuo total, la conductancia, la alcalinidad y la dureza explican la mayoría de la variación asociada a los datos mensuales, espacial o temporal. El residuo total fue el más importante para la variación espacial, mientras que la conductancia fue la más importante para la variación temporal.

La tabla 4.1 muestra los parámetros de calidad de agua obtenidos por Chacón (1993) y Alcocer *et al.* (2002).

PARÁMETROS	1993	2002
Transparencia (m)	0.4	0.36
Temperatura (°C)	16.3	20.21
Conductividad (µS/cm)	820.00	762.00
Potencial de hidrógeno	9.30	8.77
Acidez al CO ₂	0.00	0.00
Alcalinidad Total (mg/L)	400.00	8.92 (meq/L)
Carbonatos (mg/L)	118.60	
Bicarbonatos (mg/L)	272.10	
Dureza Total (mg/L)	125.30	187.83
Oxígeno disuelto (mg/L)	7.10	5.08
Fósforo reactivo disuelto (µg/L)	39.20	13.67
Fósforo total (µg/L)	64.40	134.25
Clorofila a (µg/L)	59.80	27.83
Sólidos suspendidos (mg/L)	21.10	70.33
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	10.80	
Nitratos (mg/L)	0.10	
Nitritos (mg/L)	0.20	
Amonio (mg/L)	0.10	
Calcio (mg/L)	13.80	18.67
Magnesio (mg/L)	22.10	

4.10. Ictiofauna y pesquerías

Desde tiempos anteriores a la conquista, el lago de Pátzcuaro ha sustentado a las comunidades ribereñas e islas del pueblo P'urhépecha, mismo que asentó su centro imperial en la ribera de lo que actualmente es Tzintzuntzan. De manera que aún perdura en el recuerdo de los actuales pescadores, el uso de algunas artes de pesca que fueron utilizadas en épocas prehispánicas, como la tzikiata o cestillo que se hunde en las orillas para atrapar peces (actualmente en desuso).

Los herederos de esta cultura han aprendido sobre el comportamiento de los peces y la distribución de éstos en el lago, elementos indispensables para asegurar las captura, pero los requerimientos para satisfacer el consumo regional, que ha aumentado considerablemente por la afluencia turística, ha provocado la sobrepesca en la especies de mayor atractivo, como los charales y el pescado blanco, últimamente también sobre un pez introducido la trucha o lobina negra; por lo que sus poblaciones han sido diezmadas y junto a lo anterior la introducción de especies mal seleccionadas que han agravado las condiciones de extinción sobre las nativas de gran importancia cultural y económica, como es el caso del ya citado pescado blanco y otros quizás menos relevantes para el hombre, pero gran consideración biológica como algunas especies de la familia Goodeidae, entre ellos *Goodea atripinnis luitpoldi* (endémica del lago) y *Neophorus diazi* que prácticamente ha desaparecido, por efecto de la predación de dila trucha (*Micropterus salmoides*).

Aunque actualmente se reconocen en el lago 14 especies ícticas de las cuales 10 son nativas y 4 introducidas. Diferentes autores han reportado un mayor número de especies, como el caso de *Chirostoma michoacane*, *Chirostoma regani* y *Chirostoma estor Pacanda* reportados por De Buen en 1944 y que ahora no se reconoce su existencia en las aguas del lago de acuerdo con Barbour (1973), así como, *Chirostoma humboldtianun* y *Chirostoma lucius* reportados por Ayale (1988). Esto puede ocurrir debido a la determinación de híbridos del género *Chirostoma* como especies distintas.

Según Argueta *et. al* (1986) en las aguas del lago existen 14 especies distribuidas en 4 familias (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Fauna íctica del lago de Pátzcuaro.

NOMBRE LOCAL	ESPECIE	FAMILIA	NATIVA/ INTRODUCIDA
Choromu	<i>Neophorus diazi</i>	Goodeidae	N
Chegua	<i>Allophorus robustus</i>	''	N
Tirhú	<i>Skiffia lermæ</i>	''	N
Tirhú sapichu	<i>Allotoca vivípara</i>	''	N
Tirhú pitsupiti	<i>Goodea atripinnis luitpoldi</i>	''	N
Chakuami	<i>Chirostoma grandocule</i>	Atherinidae	N
Kuerepo	<i>Chirostoma Pátzcuaro</i>	''	N
Kuerepo turipiti	<i>Ch. bartoni (=attenuatum)</i>	''	N
Kurucha urapiti	<i>Ch. Estor</i>	''	N
Akumara	<i>Algansea lacustris</i>	Cyprinidae	N
Carpa herbívora	<i>Ctenopharingodon idellus</i>	''	I
Carpa de Israel	<i>Cyprinus carpio especularis</i>	''	I
Mojarrita	<i>Tilapia melanopleura (=rendalli)</i>	Cichlidae	I
Trucha o lobina negra	<i>Micropterus salmoides</i>	Centrarchidae	I

Barbour (1973) nomenclatura a la especie *Ch. bartoni* como *Ch. attenuatum*. Estas especies han enfrentado diferentes grados de adaptación al medio y muestran particularidades importantes para cada una, por lo que se considera necesario hacer las siguientes consideraciones.

Entre los años de 1929 y 1930 fue introducida en el embalse la lobina negra o trucha (*Micropterus salmoides*), la cual es un pez carnívoro y competidor del pescado blanco, lo que ha traído como consecuencia una considerable reducción en las poblaciones de los Atherinidos en el lago, además de la sobrepesca que éstos han sufrido, especialmente el pescado blanco. Mientras que los goodeidos han sido fuertemente depredados por la trucha y algunos de ellos como *Goodea atripininis luitpoldi* y *Neophorus diazi* se encuentran prácticamente extintas del lago pues las crías de estas familias constituyen un importante artículo en la dieta de la trucha (De buen, 1944; García de León, 1984; Pérez y García de León, 1985; Argueta et al, 1986; Toledo, 1986 y Campos, 1987).

Lo anterior invita a pensar en la erradicación de las trucha del lago, sin embargo, Henderson (1974) estima que la productividad pesquera del lago es soportada por individuos pequeños de lobina negra y no por el pescado blanco y ya que los cultivos de esta última especie tienen entre los objetivos de elevar la cantidad de pesca disponible en la región o aumentar la utilidad económica para el pescado y los abastecimientos de pescado blanco destinado a la industria turística.

A partir de la idea arriba citada Campos (1987) menciona que la sobrepesca que sufre la lobina negra puede provocar una baja sensible en la productividad pesquera y hace notar que en este lago la especie tiene una mejor condición que en otros cuerpos de agua. Además de reproducirse todo el año por lo que propone que la pesca se realice sobre individuos mayores de 25 cm de longitud patrón que ya han aportado al reclutamiento de juveniles.

Por otro lado, la distribución de los peces en el lago ha variado considerablemente en épocas distintas. De Buen (1944) hace notar que los charales y el pescado blanco se distribuyen principalmente en el seno Ihuatzio y cerca de la isla de Janitzio, la ácumara en el seno Quiroga y la trucha en casi todo el lago, abundando en el seno Ihuatzio.

Lara (1980) muestra un mapa de distribución de las especies ícticas, donde considera que el pescado blanco y el charal se distribuyen en la parte norte (Seno Quiroga) y no hay presencia de ellos en la parte sur (Seno Sur) y suroeste (Seno Erongarícuaro), la lobina negra se encuentra en las partes sur y suroeste este autor no considera a la carpa en su mapa de distribución.

Según Lizárraga y Tamayo (1988) la ictiofauna en la actualidad se ha distribuido por todo el lago con una menor abundancia en la parte norte y más abundante en la parte sur.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Cartografía

Mediante el empleo de las fuentes cartográficas disponibles incluyendo mapas topográficos, fotografía aérea e imágenes de satélite se seleccionaron sitios de estudio que incluyen áreas naturales del litoral del lago de Pátzcuaro. Así como áreas sujetas al dragado o recuperación del litoral que también representan un potencial para el aprovechamiento acuícola.

Se elaboró un mapa base de escala 1:25,000 para delimitar las diferentes zonas de humedal del litoral del lago de Pátzcuaro (Figura 5.1).

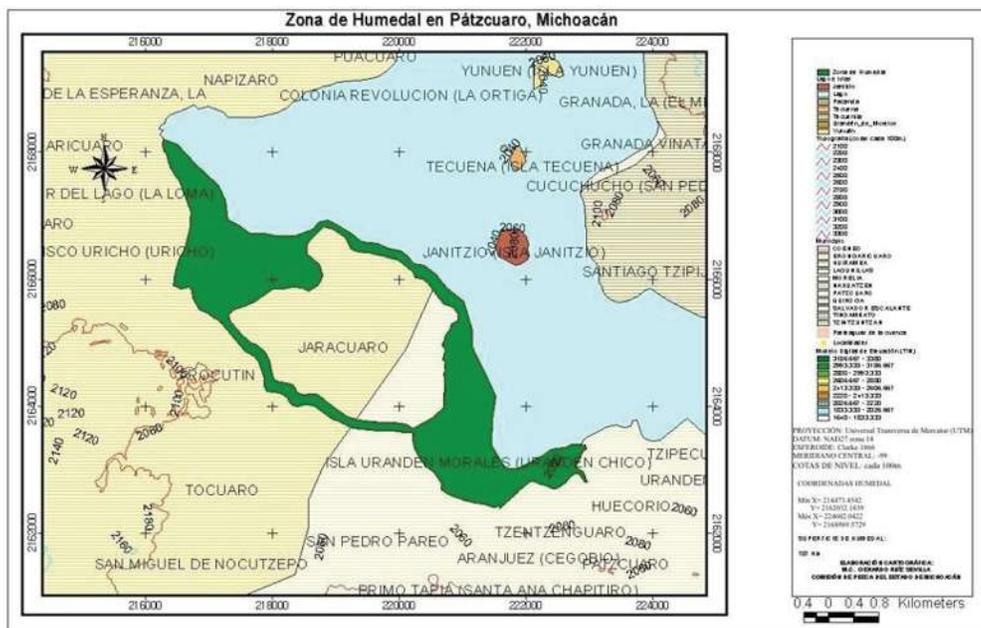


Figura 5.1. Mapa base del lago de Pátzcuaro, Michoacán (Elaborado por Gerardo Ruíz Sevilla, 2005).

5.2. Sitios de muestreo

Mediante el uso del mapa base se ubicaron sitios de muestreo que incluyeron los siguientes criterios de selección:

- a) Baja profundidad o gradiente de profundidad
- b) Gradiente de pendiente
- c) Transición entre sistema acuático y terrestre
- d) Interacción cercana entre agua y sedimentos
- e) Perfil de vegetación semi-acuática y acuática
- f) Penetración de luz hasta el fondo
- g) Disponibilidad de nutrientes en agua-sedimentos

Las coordenadas de los sitios de muestreo se ubicaron mediante el uso de un geoposicionador satelital registrando su localización en unidades del sistema de proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM), siendo las siguientes: Urandén de Morelos, San Pedro Pareo y zona limnética del lago de Pátzcuaro (Tabla 5.1)

Tabla 5.1 Ubicación de las estaciones

POBLADO	SITIO	Nombre	X UTM	Y UTM
San Pedro Pareo	1	Inicio humedal	220929	2162020
	2	Parte media del humedal	221020	2162200
	3	Salida humedal	220991	2162288
Urandén de Morelos	4	Canal perimetral	221850	2162509
	5	Reserva de Uradén*	221801	2162758
	6	Zona Limnética	223030	2163510
Zona Limnética	7	Muelle de Urandén*	222914	2162721

* Sitios donde se encuentran manantiales

5.3. Morfometría

Se realizó una evaluación batimétrica utilizando una ecosonda gráfica marca “Furuno” modelo 808 instalada en un vehículo acuático con un transductor de 200 Mhz de potencia.

Los transectos se realizaron en línea recta mediante un trazado reticular navegando en paralelo y de manera horizontal a la longitud de costa y a velocidad constante. Cada transecto y zona de litoral serán ubicados y delimitados por medio de un geoposicionador satelital marca “Garmin” modelo V Plus. Con los registros obtenidos se realizaron una descripción batimétrica del área de estudio y se estimaron los principales valores morfométricos de acuerdo con los criterios sugeridos por Hakansön (1980).

5.4. Hidrodinámica

Se evaluaron los efectos de las corrientes locales sobre las tasas de renovación hidráulica en la zona litoral. Se llevaron a cabo mediciones de corriente de deriva superficial a una profundidad de 0.25 m, utilizando veletas de corriente con pesos con el objeto de mantener la posición vertical y suspendidas con boyas de pesca. Las veletas de corriente se ubicaron por medio del geoposicionador al principio y al final de cada transecto además de registrar la dirección y la velocidad de corriente mediante el empleo de un anemómetro de campo. Para evaluar el efecto de los vientos dominantes sobre la hidrodinámica del sistema se estimó la longitud máxima de viento de acuerdo con los criterios sugeridos por Håkanson (1981) utilizando para ellos una plantilla de rumbos (Figura 5.2).



Figura 5.3. Toma de muestras de agua

Las muestras fueron almacenadas en recipientes de plástico de 3.0L de capacidad, previamente tratados con detergente libre de fosfatos y agua destilada. Los recipientes fueron transportados en hielo inmediatamente al laboratorio para su posterior análisis.

5.6. Análisis de sedimentos

Se colectaron muestras de sedimentos en los sitios de muestreo dentro del humedal, en la zona cercana a la línea de costa y en las cercanías de la zona limnética o de aguas abiertas, con el empleo de una draga tipo Ekman de 2kg de capacidad. (Figura 5.4)

5.7. Registros de campo

De manera simultánea a la toma de muestras de agua y sedimento, se realizaron registro de variables ambientales incluyendo:

VARIABLE	TÉCNICA
Nubosidad (%)	Observación directa
Viento dominante (rumbo)	Anemómetro de campo
Velocidad del viento (m/s)	Anemómetro de campo
Profundidad (m)	Sondaleza
Temperatura ambiental (°C)	Termistor
Temperatura del agua (°C)	Termistor
Transparencia (m)	Disco de Secchi
Turbidez (UNT)	Nefelometría
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conductivímetro PC-18
Potencia de hidrógeno (adimensional)	Potenciómetro PC-18
Oxígeno disuelto (mg/L)	Técnica Winkler modificada

5.8. Trabajo de laboratorio

Una vez que las muestras de agua y sedimentos llegaron al laboratorio, éstas fueron colocadas en congeladores donde permanecieron para su análisis inmediato. Previo al análisis de laboratorio fueron extraídas del congelador y colocadas a temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura de habitación.

5.8.1. Análisis de agua

Posteriormente las muestras de agua fueron sometidas a análisis incluyendo los siguientes parámetros:

Parámetro	Técnica
Turbidez (NTU)	Técnica nefelométrica de Nessler
Sólidos suspendidos (mg/L)	Técnica gravimétrica de diferencia de peso
Sólidos sedimentables (mL/L)	Técnica de sedimentación del cono Imhoff
Alcalinidad a la fenolftaleína (mg/L)	Técnica volumétrica con fenolftaleína
Alcalinidad total (mg/L)	Técnica volumétrica
Dureza total (mg/L)	Técnica volumétrica con EDTA y eriocromo negro T
Dureza de calcio (mg/L)	Técnica volumétrica con EDTA y murexida
Dureza de magnesio (mg/L)	Técnica de espectrofotometría de absorción atómica
Amoníaco (mg/L)	Técnica colorimétrica de Nessler a 425 nm
Nitritos (mg/L)	Técnica colorimétrica
Nitratos (mg/L)	Técnica colorimétrica
Fósforo reactivo disuelto ($\mu\text{g/L}$)	Técnica colorimétrica de ácido ascórbico
Fósforo total ($\mu\text{g/L}$)	Técnica colorimétrica de ácido ascórbico
Materia orgánica disuelta (mg/L)	Técnica de la demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)
Materia orgánica total (mg/L)	Técnica de la Demanda Química de Oxígeno
Clorofila a (mg/m^3)	Técnica espectrofotométrica a 650 nm

Alcalinidad total y de fenolftaleína utilizando la técnica volumétrica (APHA, 1995).

Dureza total, cálcica y magnésica utilizando la técnica volumétrica de EDTA como solución titulante y usando como indicador negro de ericromo y murexida respectivamente, expresando el resultado en mg/L (APHA, 1995).

Nitratos y nitritos. Por medio de espectrofotometría utilizando un espectrofótometro tipo Lambda 10 UV/VIS, leyendo las muestras a 220 y 275 nm utilizando curvas de calibración con un rango de 0.01 a 0.30 mg/L ($r=0.97$) (Figura 5.5) y 540 nm utilizando curvas de calibración con un rango de 0.018 a 1.02 mg/L ($r=0.99$) respectivamente, expresando la concentración en unidades de mg/L (Figura 5.6), (APHA, 1995).

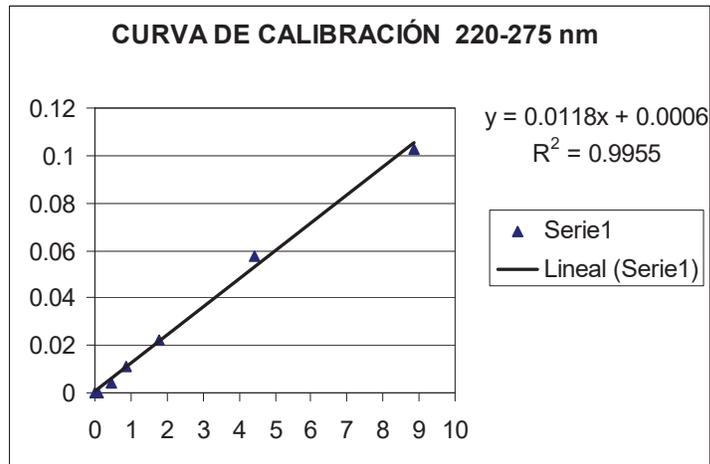


Figura 5.5 Curva de calibración para la determinación de nitratos.

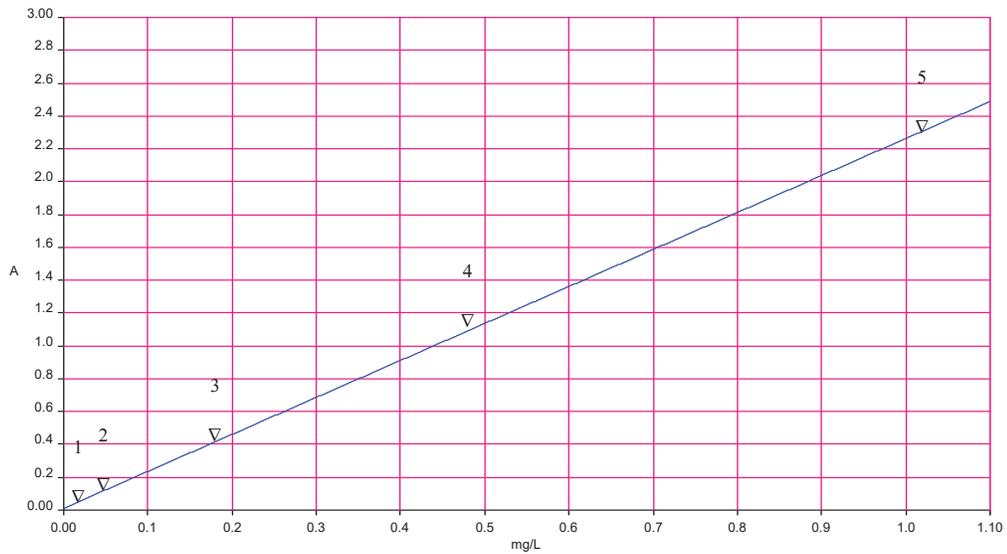


Figura 5.6 Curva de calibración para la determinación de nitritos

Amonio. Mediante la técnica de Nessler leído a 425 nm con espectrofotómetro modelo Lambda 10 UV/VIS. Utilizando una curva con un rango de concentración de 0.05 a 1 mg/L ($r = 0.997$) (Figura 5.7) (APHA, 1995).

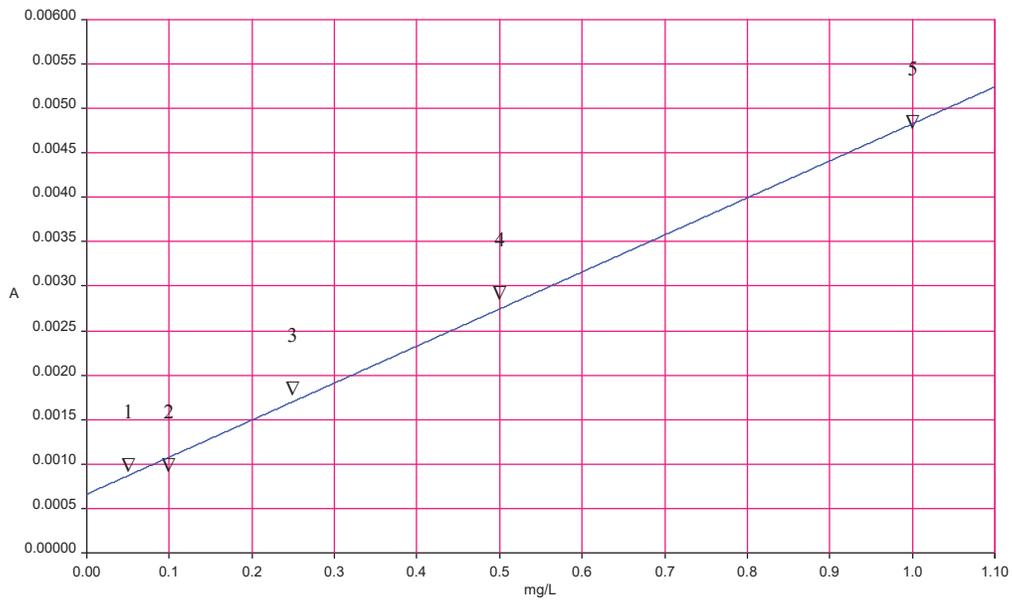


Figura 5.7 Curva de calibración para determinación de amonio

Ortofosfato y Fosfatos total. Por medio de espectrofotometría utilizando un espectrofotómetro modelo Lambda 10 UV/VIS, leyendo las muestras a 880nm. Para el caso de fósforo total se utilizó como digestor persulfato de potasio en una autoclave; los resultado se expresan en microgramos por litro (Figuras 5.8 y 5.9) (APHA, 1995).

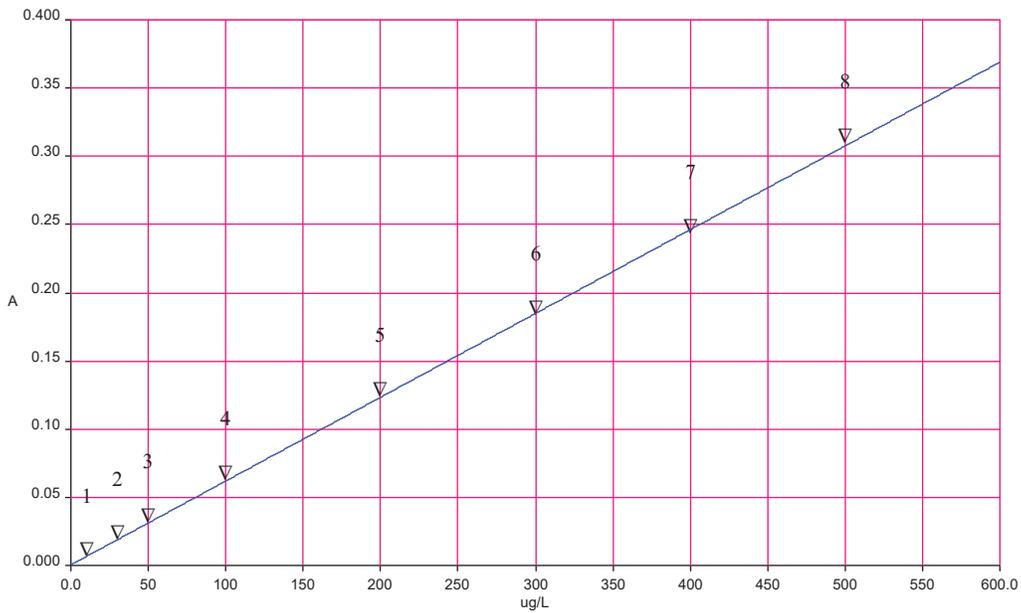


Figura 5.8 Curva de calibración para determinación de Ortofosfato (Coeficiente de correlación: 0.999924).

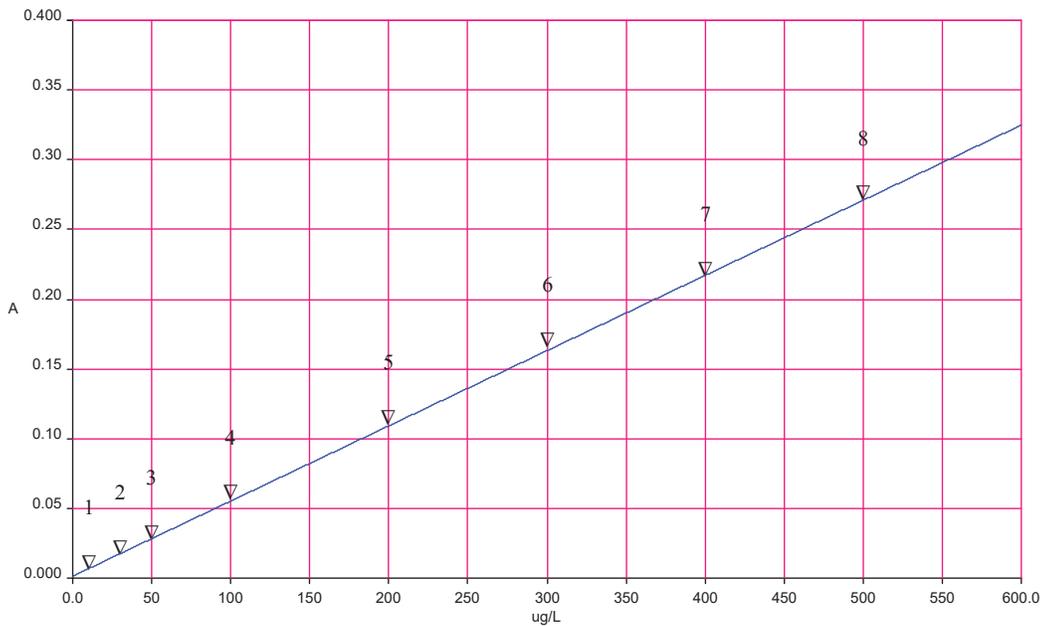


Figura 5.9 Curva de calibración para determinación de fósforo total (Coeficiente de correlación: 0.999942)

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Se aplicó el método generalizado para estimar el grado de contaminación de los sistemas de suministro de agua especialmente aquellos que reciben los residuos y desechos urbanos e industriales.

Los resultados se expresan como la cantidad de oxígeno disuelto (mg/L) que se requieren durante la estabilización de la materia orgánica descomponibles por medio de la acción bacteriana aeróbica (APHA, 1995).

Demanda química de oxígeno (DQO). Corresponde al contenido de materiales orgánicos biodegradables o no, oxidables mediante reactivos químicos (APHA, 1995).

Sólidos sedimentables (SSed). Método volumétrico de acuerdo a la propiedad que tienen los sólidos de sedimentarse de acuerdo con sus densidades (cono de sedimentación tipo Imhoff) (APHA, 1995).

Sólidos suspendidos totales (SST). Mediante filtración de un volumen conocido de muestra a través de un disco de fibra de vidrio y secado a 105°C hasta un peso constante. (APHA).

Turbidez. Utilizando un turbidímetro marca HACH 2100P calibrado con una suspensión de referencia de formacina, en unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

Clorofila-a. por espectrofotometría, después de una extracción con acetona, las muestras se leyeron a 750, 663, 665 y 630 nm, expresada en mg/m³ (Lind, 1985).

5.8.2. Análisis sedimentos

Las muestras de sedimento se sometieron a un tratamiento previo de secado, que consiste en secar las muestras de sedimento húmedo en una estufa a una temperatura de 50°C por espacio de dos días anotando el color y olor original de la muestra de campo y los posibles cambios subsecuentes que se puedan presentar durante proceso de secado (Folk, 1969 *En*: Pedraza, 1995).

Una vez que los sedimentos se obtuvieron libres de humedad se pesaron hasta alcanzar el peso constante y se procedió a determinar las siguientes variables:

a) Textura

La textura se realizó por medio de la técnica de Bouyoucos utilizando un hidrómetro con duración de 2h y determinándose por medio del triángulo de texturas la cual muestra los límites de contenido de arena, limo y arcilla en los distintos clases de textura (Foth, 1986).

b) Nitrógeno como nitrato

Este análisis se realizó previamente extraído el nitrato de los sedimentos con cloruro de calcio y leído en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 210nm utilizando curva de calibración con un rango de 0.0 a 2.0 mg/L, expresando la concentración en unidades de mg/L (Mudroch 1996).

c) Nitrógeno como nitritos

La determinación de la concentración de nitritos se realizó por medio de espectrofotometría utilizando un espectrofotómetro Marca "Perkin Elmer" modelo Lambda 10 UV/Vis, previamente extraído el nitrito con solución salina de KCl y leyendo las muestras a 540nm utilizando curva de calibración con un rango de 0 a 0.45 mg/L, expresando la concentración en unidades de mg/L (Mudroch 1996).

d) Fósforo total

Se realizó el análisis realizando una extracción previa a con agua desionizada y llevando el extracto a digestión con persulfato de sodio y posteriormente se midió con el método calorimétrico con ácido ascórbico.

g) Fósforo reactivo soluble

La muestra de sedimento previamente seca se trató con agua desionizada para hacer la extracción de ortofosfato el cual se determinó con el método colorimétrico utilizando como reactivo ácido ascórbico.

VI. RESULTADOS

6.1. Cartografía

Tomando en consideración los resultados obtenidos por planimetría y las observaciones de las visitas de campo, se estima que el lago de Pátzcuaro posee un total de 42 km² de cobertura de vegetación acuática incluyendo en los perfiles a) plantas acuáticas enraizadas emergentes; b) plantas acuáticas enraizadas sumergidas de hojas flotantes; c) plantas acuáticas enraizadas sumergidas y d) plantas acuáticas de hojas flotantes. Del total de cobertura estimada en el lago de Pátzcuaro la ribera sur presenta una superficie de 28 km² con cobertura de vegetación acuática incluyendo a la totalidad de las comunidades emergente, sumergida de hojas flotantes, sumergida y de hojas flotantes.

El área considerada para el presente estudio fue delimitada en un total de 50 ha, presentada en la (Figura 5.1).

Los resultados de la delimitación geográfica del presente estudio así como los fundamentos metodológicos y jurídicos nacionales e internacionales permitieron que un total de 187 ha de la ribera sur del lago de Pátzcuaro fueran decretados como sitio de conservación y protección bajo los términos de la Convención Ramsar, el día 2 de febrero de 2005.

6.2. Morfometría

Para este análisis se estableció un total de 1250 registros en la extensión de la ribera sur del lago de Pátzcuaro en cuadrantes de 200 x 200 m. En el presente estudio se registraron profundidades máximas de 4.25 m en la zona cercana a las islas centrales del lago, mientras que las profundidades mínimas se localizaron principalmente en la zona sur siendo éstas de hasta 0.15m (Figura 6.1)

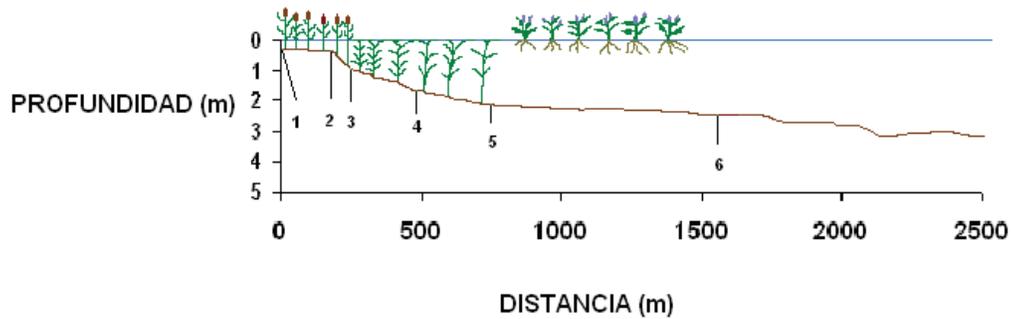


Figura 6.1. Perfil de profundidades en los diferentes sitios de muestreo

Se observa que la mayor parte del sur del lago tiene un mayor impacto sobre el ciclo hidrológico regional debido a la acentuada someridad de esta zona, la presencia excesiva de la cubierta vegetal impide en parte la navegación y los movimientos de corrientes superficiales, especialmente en la región de Erongarícuaro.

En la zona sur se realizó una comparación del estudio batimétrico realizado por Chacón *et al* (1989) en donde se muestra que la isolínea de 1.0m registrada en el año de 1989 se encuentra recorrida hasta la isolínea de 3.0m, mostrando un aparente desplazamiento de la ribera sur hacia el norte. De acuerdo al análisis planimétrico digital de las isolíneas de la zona sur del lago de Pátzcuaro se estima que actualmente existe una extensión de 19 km² con profundidades menores a un metro. De la misma manera se ha estimado una distancia máxima de 540 metros entre la isla de Janitzio y la isla de Jarácuaro en donde las profundidades son menores a los tres metros y en una gran extensión no supera el 1.5 m de profundidad con extensa cobertura de vegetación acuática. Lo anterior representa un riesgo de estancamiento hidráulico y la consecuente evaporación del agua disminuyendo aún más el nivel del lago.

6.3. Hidrodinámica

Los resultados del estudio hidrodinámico del área de estudio indican la predominancia de corrientes superficiales conocidas como deriva superficial. Este tipo de movimiento es generado por la acción del viento sobre la superficie del agua y su intensidad depende de la fuerza del viento ejercida sobre el agua, su duración y la distancia sobre la cual ejerce su fuerza sin obstáculos en la superficie. A este último se reconoce como longitud de viento.

6.3.1. Frecuencia de vientos

En el lago de Pátzcuaro, predominan los vientos del suroeste (SO) y del sureste con una velocidad máxima de 12.15m/s. La frecuencia de los vientos del suroeste equivale a un 43.5% del promedio anual, mientras que para los vientos del sureste existe una ocurrencia de un 27.0%. Sumando la frecuencia de los vientos que proceden de estas dos direcciones existe un 70.5% de incidencia de vientos de la región sur de la cuenca.

6.3.2. Deriva superficial

La deriva superficial generada en el sistema se observó en un intervalo de 0.31cm/s como mínimo y 23.4 cm/s como máximo. El valor promedio estimado es de 11.8 cm/s. Existe un incremento proporcional en la velocidad de la deriva superficial y la velocidad del viento.

Sin embargo, a medida que se alcanzan valores altos en la velocidad del viento la curva de asociación entre estos dos parámetros registra un coeficiente de correlación de 0.79. Lo anterior sugiere que la velocidad del viento presenta una eficiencia máxima en función de las variables de tiempo y distancia.

6.3.3. Longitud de viento

En la Tabla 6.1 se presentan los valores de longitud de viento estimados para el área de estudio con relación a los diferentes rumbos de la rosa de los vientos expresados en grados. Se estimó una longitud máxima de viento de 7.10 km en dirección noroeste (318°), mientras que la longitud de viento mínima estimada fue aquella orientada hacia el suroeste (228°) con una distancia de 1.85 km. Tomando en consideración de que los vientos dominantes son aquellos procedentes del suroeste se considera que el sitio en donde se ubica el sistema de cultivo es un área protegida durante la mayor parte del año ya que los vientos dominantes disminuyen su fuerza por la corta distancia que recorren sobre la superficie del agua hasta el sitio de estudio. Lo anterior coincide con las observaciones realizadas por Rosas-Monge (1994). La máxima longitud de viento (7.10km) se encuentra orientada hacia entrada de los vientos del norte (318°). En este rumbo se presentan vientos hasta de 6.5 m/s con frecuencia de 3.6% en el año.

Por lo tanto, la generación de corrientes superficiales en la ribera sur del lago de Pátzcuaro se encuentra limitada por la longitud de viento. Sin embargo, los vientos que proceden del sur son frecuentes y con mayor duración que aquellos que se presentan del resto de las direcciones a lo largo del año. Lo anterior necesariamente implica la necesidad de generar mediante un manejo estratégico de la zona condiciones para impulsar una acción hidrodinámica en la ribera sur.

Tomando en consideración los resultados del estudio hidrodinámico realizado en campo la generación de corrientes en la ribera sur de Pátzcuaro a partir de la influencia del viento que se presenta a los 220° grados bajando por la ladera de montañas ubicadas entre Ajuno y San Pedro Pareo.

Tabla 6.1. Longitud de viento estimada en la ribera sur del lago de Pátzcuaro.

Rumbo (°)	Longitud de viento (km)	Rumbo (°)	Longitud de viento (km)
6	2.95	258	4.42
12	2.55	264	4.56
18	2.25	270	3.90
24	2.44	276	2.44
30	2.64	282	2.41
36	2.86	288	2.43
42	2.98	294	2.31
48	3.19	300	2.20
54	3.34	306	2.10
60	3.62	312	2.20
66	4.61	318	7.10
228	1.85	324	6.60
234	2.10	330	6.60
240	2.35	336	2.86
246	2.78	342	2.97
252	3.10	348	5.61

Una vez establecido el viento dominante por espacio de una hora como mínimo la ribera sur del lago inicia un movimiento hidrodinámico que renueva la masa de agua a partir de la zona de Erongarícuaro y el seno de Ihuatzio. Estas corrientes adquieren velocidad a partir de las islas y se orientan principalmente hacia el norte del lago.

Al llegar a la zona norte del lago las masas de agua inician una corriente de retorno diferencial ya sea por el centro del lago o por los costados del vaso lacustre de acuerdo a las condiciones de viento que se presentan en determinado periodo de tiempo.

Los movimientos de agua no presentan diferencias significativas entre la época seca y la época húmeda, sin embargo el patrón de movimientos de agua es significativo de la influencia del viento como inductor de corrientes superficiales.

El estancamiento hidráulico que se presenta en la ribera sur del lago tiene repercusiones esencialmente en el aumento de temperatura y evidentemente en el proceso de evaporación del agua en la zona. Por otro lado, al disminuir la corriente del agua en la ribera sur se presenta una mayor dispersión de plantas acuáticas emergentes y sumergidas lo que intensifica el estancamiento hidráulico de la zona.

Finalmente, este proceso se ha intensificado con la construcción del camino que comunica a la ex-isla de Jarácuaro con tierra firme. El diseño original de piedraplén y de puente con limitada comunicación hidráulica entre el seno Erongarícuaro y el resto de la ribera sur ha pronunciado los efectos del estancamiento. En este sentido el impacto del estancamiento hidráulico se acentúa en las zonas de las islas de Urandén de Morelos, Urandén Morales, Carián, así como las áreas de litoral de Tzetzénguaro, Huecorio, San Pedro Pareo y otros.

6.4. Características del agua

Los resultados obtenidos sobre las características del agua de la zona limnética y de la zona litoral (humedal) del sur del lago de Pátzcuaro se presentan en la (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Características del agua de la zona limnética y del litoral de la parte sur del lago de Pátzcuaro.

VARIABLE	Sito 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7
Temperatura °C	16.63	17.13	18.38	20.73	19.88	20.65	20.88
Conductividad (µS/cm)	496.25	390.50	360.75	423.50	330.25	755.75	351.00
Potencial de hidrógeno	7.07	7.34	6.74	8.07	7.31	8.08	8.69
Turbidez (NTU)	4.00	5.42	2.01	19.65	6.33	73.23	10.25
Sólidos suspendidos (mg/L)	10.21	21.33	5.12	20.99	9.30	48.56	20.50
Sólidos sedimentables (mL/L)	1.18	1.00	0.10	0.08	0.05	0.10	0.05
Alcalinidad fenolftaleína(mg/L)	0.00	0.00	0.00	5.22	0.92	14.25	3.00
Alcalinidad total (mg/L)	221.58	214.15	173.92	181.96	149.15	364.99	119.40
Oxígeno disuelto (mg/L)	3.35	2.70	1.88	7.04	2.73	4.55	11.00
Dureza total (mg/L)	225.75	154.07	105.42	110.82	104.59	166.67	82.00
Dureza de calcio (mg/L)	46.41	29.38	18.12	18.91	17.19	18.24	14.15
Dureza de magnesio (mg/L)	26.64	19.54	14.58	15.24	14.83	29.39	11.34
Amonio (mg/L)	0.41	0.10	0.23	0.06	0.05	0.12	0.06
Nitritos (mg/L)	0.21	0.01	0.003	0.08	0.00	0.02	0.30
Nitratos (mg/L)	1.87	1.50	0.49	0.74	0.60	1.62	0.59
Nitrógeno inorgánico total (mg/L)	2.50	1.61	0.73	0.88	0.66	1.77	0.95
Ortofosfato (µg/L)	238.67	183.98	68.00	20.65	96.34	78.53	17.18
Fosfato total (µg/L)	454.46	323.09	147.69	114.70	174.74	196.79	161.39
DBO (mg/L)	119.62	101.01	113.16	127.62	113.07	132.90	158.52
DQO (mg/L)	102.80	91.20	59.80	63.07	64.20	55.80	98.80
Clorofila a (mg/m ³)	192.82	35.49	79.86	87.51	43.58	54.25	133.52

6.4.1. Temperatura

Con relación a los registros de temperatura es posible observar una mínima variación espacial desde la zona de humedales hasta aguas abiertas que van desde los 21.5°C a 23.5°C en la época calida que corresponden a las máximas temperatura registradas, las temperaturas más bajas se registraron en la época de invierno con un rango espacial del humedal a la parte limnética que va de 9.0°C a 17°C.

En los valores obtenidos de las lecturas de temperatura se obtuvo un promedio mínimo de 14.14 °C durante el mes de enero mientras que el valor máximo promedio fue de 23.07°C durante el mes de mayo.

El valor promedio durante el periodo de estudio fue de 19.18°C, la cual se observa con una variación mayor con respecto a los valores registrados por otros autores como es el estudio de Chacón (1993) que reportó una temperatura promedio del lago de 16.0°C, mientras que Rosas-Monge reportó una temperatura promedio en la ribera sur de Pátzcuaro de 20.0°C, lo cual muestra valores muy próximos comparado con este estudio.

6.4.2. Conductividad eléctrica

La conductividad se mostró afectada en la época de lluvias fuertes en el mes de agosto (270.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 553.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$), no así para la estación 7 (Muelle de Urandén) en el cual se registro un valor de 711.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para esta época del año. Cabe señalar que los mayores valores se encontraron en el sitio 6 que corresponde a las aguas abiertas o zona limnética con una conductividad de 876.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al comienzo de lluvias en el mes de mayo.

Para la zona de humedales la conductividad eléctrica presenta variaciones espaciales como temporales, siendo el valor máximo registrado de 643 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la estación No. 2 (porción media del humedal), mientras que el valor mínimo registrado fue de 192 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el mismo sitio de muestreo.

Los valores promedio mínimos se encontraron en sitios donde se encuentran manantiales 330.25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sitio No. 5 (Reserva acuícola) y 351.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el sitio 7 (Muelle de Urandén).

6.4.3. pH

Los valores de pH registrados durante el estudio muestran como la zona de humedales mantienen valores de pH 7 en temporadas de secas (6.63-6.98), el pH aumentó en esta zonas en época de lluvias (7.14-8.24).

Las lecturas que se hicieron en sitios cercanos a la parte litoral y en la zona limnética muestran valores que están dentro de los lagos de tipo volcánico pues los valores oscilan desde 8.69 a 8.08.

6.4.4. Sólidos suspendidos

En los tres sitios de muestreo en la parte de humedales, los valores de los sólidos suspendidos fueron afectados cuando pasan a través del dicha zona (10.21 mg/L-5.42 mg/L) (Figura 6.2). En la zona limnética se obtuvo la cantidad promedio máxima, pues en la parte de aguas abiertas el resultado fue de 48.56 mg/L. Al comparar este valor con el registrado hace doce años se observa que existe un aumento (19.5 mg/L). Lo anterior un incremento en la concentración de sólidos suspendidos con el tiempo.

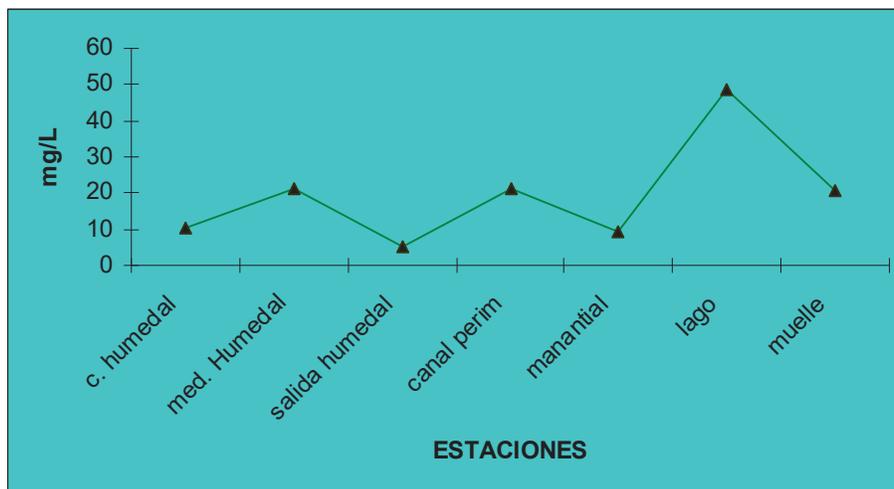


Figura 6.2. Variaciones espaciales sólidos suspendidos.

6.4.5. Alcalinidad

La alcalinidad total promedio de la zona sur es de 203.59 mg/L, mientras que la dureza total es de 135.61 mg/L siendo una dureza moderada de acuerdo a la clasificación descrita por Sawyer y MacCarty (1967). Al comparar en el lago de Pátzcuaro las concentraciones de cationes analizados en este estudio el gradiente de concentración es en el siguiente orden: Na>K>Mg>Ca>Fe. Por lo tanto, la mayor parte de la dureza es muy probable que se atribuya al magnesio (29.39 mg/L) y muy poco al calcio (18.24 mg/L).

6.4.6. Oxígeno disuelto

Los valores de oxígeno disuelto se consideran que son bajos para la zona limnética con un valor máximo de 6.3 mg/L mientras que el valor más alto reportado hace 12 años oscila entre 6.0 y 7.1mg/L en la zona Norte y Cuello respectivamente. No así para el sitio 7 (Muelle de Urandén) en el cual se observan variaciones temporales y un registro de máximos valores (14.0 mg/L) en el mes de mayo, este mismo sitio presentó un promedio máximo durante todo el estudio (11.0 mg/L) (Figura 6.3). Lo anterior sugiere que existe una menor capacidad de retención de oxígeno disuelto en la parte limnética que en otros espacios del lago, en principio por un mayor estancamiento hidráulico o alternativamente por una mayor tasa de degradación de la materia orgánica.

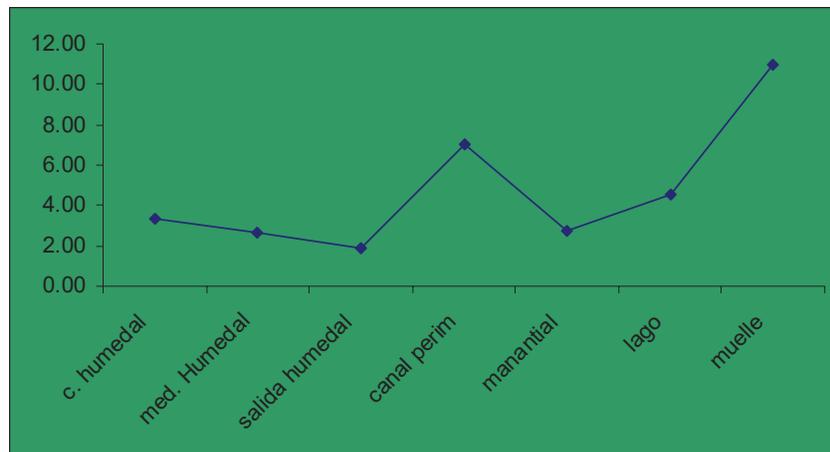


Figura 6.3. Variaciones espaciales en la concentración de oxígeno disuelto.

6.4.7. Clorofila a

La mayor concentración de clorofila-a se registró en el sitio No.1 la cual es la cabecera del humedal con una cantidad de 490.8 mg/m³ en el mes de mayo y con un valor promedio de 192.82 mg/m³. En la parte media del humedal se encontró el valor promedio menor (35.49 mg/m³). Referente a la zona limnética la cantidad que se obtuvo como promedio fue de 54.25 mg/m³ (Figura 6.4).

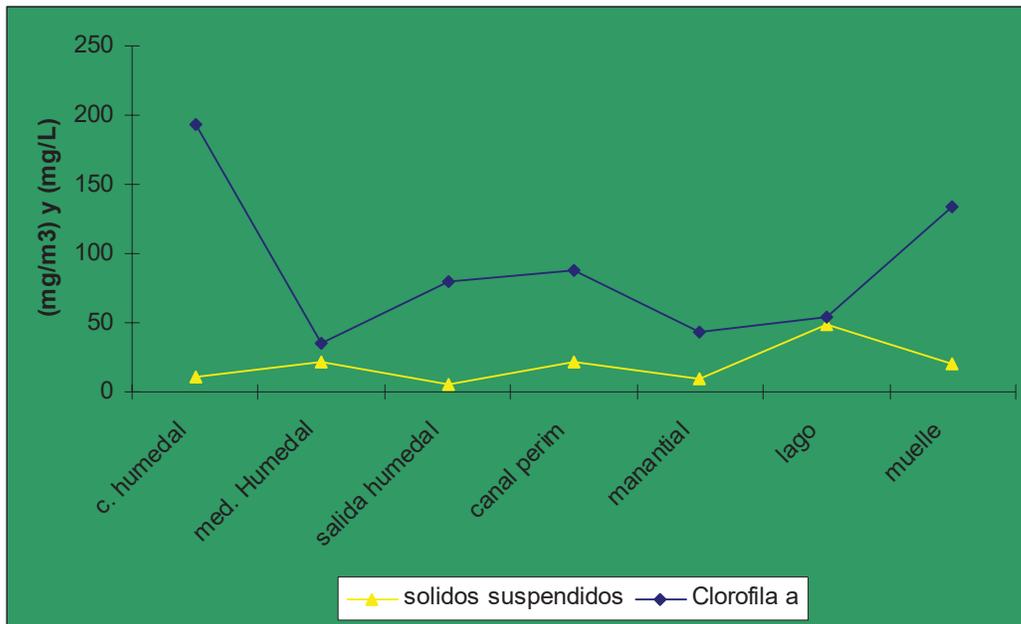


Figura 6.4. Promedio de concentraciones de Clorofila-a comparadas con sólidos suspendidos.

6.4.8. Nitrógeno

Las concentraciones promedio de nitritos se obtuvieron de una forma gradual, desde el sitio No. 1 hasta el sitio No. 3 (0.21mg/L; 0.01 mg/L y 0.003 mg/L, respectivamente). Las concentraciones promedio de nitratos fueron afectadas de una forma semejante en estos sitios (1.87 mg/L; 1.50 mg/L y 0.49 mg/L, respectivamente). Para los sitios restantes las cantidades halladas de nitratos fueron diferentes donde el promedio máximo lo presentó el sitio No. 6 que pertenece a la Reserva acuícola (1.62 mg/L) y referente a los valores de nitritos en el canal perimetral de la reserva se registraron valores promedio de 0.08 mg/L (Figura 6.5).

Las concentraciones de amoníaco presentaron una marcada diferencia a través de las estaciones del humedal (0.41 mg/L; 0.10 mg/L y 0.23 mg/L, respectivamente), pero como se puede observar en la parte media del humedal hubo menos cantidad que en la estación No. 3, que es segmento en donde termina el humedal.

Para las partes que corresponden a aguas abiertas la cantidad mayor se presentó en la zona limnética (0.12 mg/L) y las restantes también están cercanas a la concentración letal para especies de peces (0.02 mg/L). Sawyer y McCarty (1978) indican que en aguas con pH menor de 8 la toxicidad no es problema a niveles de $\text{NH}_3\text{-N}$ menores de 1 mg/L; esto debido a que a pH debajo de 9 predomina el NH_4^+ o ion amonio y a pH alto predomina el NH_3 o gas no ionizado, pero, por otra parte, las aguas ricas en nitrógeno pueden causar problemas de eutroficación (Figura 6.5).

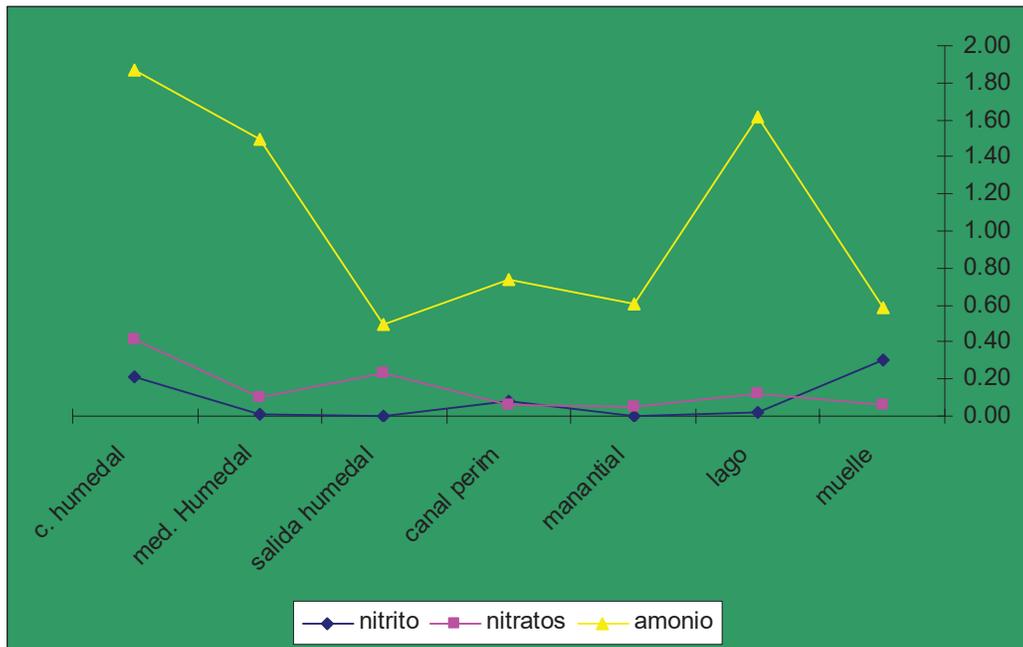


Figura 6.5. Variaciones espaciales en la concentración de especies inorgánicas de nitrógeno.

6.4.9. Fósforo

Referente a las concentraciones de fosfato soluble en las tres primeras estaciones presentaron una disminución gradual, desde el sitio No. 1 hasta el sitio No. 3 (238.67 $\mu\text{g/L}$; 183.98 $\mu\text{g/L}$ y 68.00 $\mu\text{g/L}$, respectivamente).

Para las estaciones que corresponden a aguas abiertas se obtuvieron valores que muestran una variación espacial, la mayor concentración se encontró en el sitio No. 5 el cual corresponde a la zona de la reserva acuícola (96.4 $\mu\text{g/L}$), seguida por el sitio No. 6 que corresponde a la zona limnética (78.53 $\mu\text{g/L}$).

En el análisis de fosfato total las concentraciones que se hallaron para los sitios No. 1,2 y 3 fueron, 454.46 $\mu\text{g/L}$, 323.09 $\mu\text{g/L}$ y 147.69 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. Esto sugiere que también hay una gradación desde el comienzo del humedal hasta donde termina éste hacia la parte litoral. En los sitios que se encuentran en aguas abiertas la mayor concentración se encontró en el sitio No. 6 (196.79 $\mu\text{g/L}$) que es el que corresponde a la zona limnética, en los sitios restantes se observó una variación especial, (Figura 6.6).

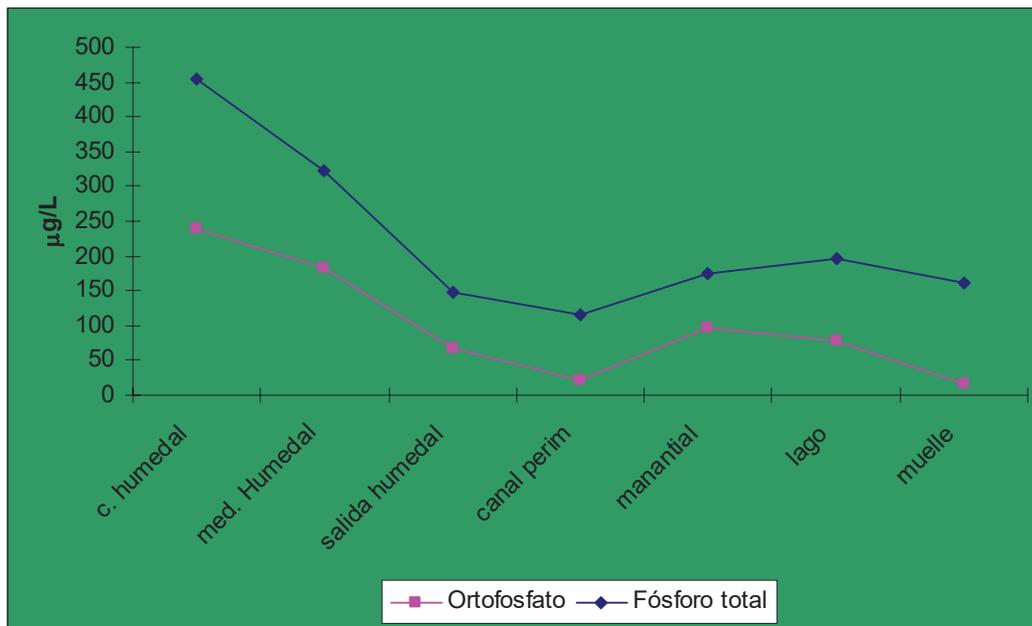


Figura 6.6. Variaciones espaciales en la concentración de ortofosfato y fósforo total.

6.4.10. Productividad primaria

Los análisis de productividad primaria bruta y neta aportada por el fitoplancton en el lago de Pátzcuaro con base a la técnica de las botellas clara y oscura también presentan cambios. Como puede observarse en la zona sur del lago presenta una tasa considerablemente más baja de productividad primaria con respecto a la región norte. Los valores superficiales de productividad son generalmente más altos que los registrados a 2.0 m de profundidad. La productividad primaria neta promedio para la superficie del agua fue de 492.4 mgC/m²/día en el norte y de 255.5 mgC/día en el sur. Los valores máximos de productividad primaria neta (135.0 mgC/m²/día) fueron registrados en la región sur del vaso lacustre. Mostrando una disminución de ésta debido a la limitación de luz por parte de los sólidos suspendidos en el medio acuático.

6.5. Sedimentos

En los trabajos realizados por O'Hara *et al.*, (1993) los autores consideran que en el lago se acumuló aproximadamente 1 mm por año en tiempos prehispánicos. Por otro lado, Fisher *et al.* (1999) considerando sus datos concluye que para que se acumulara un metro de sedimentos tuvo que pasar un periodo de 655 años. Estos datos fueron obtenidos en la parte sur del lago. En la parte norte cercana a Tzintzunzan, Garduño (2002) obtuvo que por año no se depositó más de medio milímetro.

Sin embargo existen áreas en la ribera sur en donde los sedimentos se encuentran con un alto grado de humedad y con bajas tasas de sedimentación los que aumentan la turbidez y disminuye la velocidad de compactación de azolve.

Tabla 6.3. Concentraciones de los nutrientes en sedimento.

Parámetros	1	2	3	4	5	6	7
Amonio (mg/kg)	88.58	66.73	69.64	118.65	96.34	134.98	99.76
Nitritos (mg/kg)	0.96	1.52	0.97	1.14	1.09	1.87	0.83
Nitratos (mg/kg)	127.64	104.93	112.19	173.30	97.64	123.75	100.17
Nitrógeno inorgánico total (mg/kg)	217.18	173.18	182.80	293.09	195.07	260.60	200.76
Ortofosfato (mg/kg)	18.88	32.97	19.02	28.74	11.25	29.81	23.11
Fosfato total (mg/kg)	37.25	50.81	38.03	49.08	33.44	56.40	41.92
Materia orgánica (g/kg)	101.48	81.90	123.28	103.03	120.47	129.03	95.20

6.5.1. Nitrógeno en sedimento.

El amonio presentó variaciones de concentraciones en los diferentes sitios. En la zona del humedal se registraron las cantidades más bajas (66.73 mg/kg-88.58 mg/kg), las concentraciones más altas se hallaron en la zona limnética (134.98 mg/kg). Los sitios restantes, también correspondientes a aguas abiertas, se obtuvieron cantidades en un rango de 96.34 mg/Kg-118.65 mg/kg.

Las cantidades de nitritos que se obtuvieron fueron relativamente bajas con un rango de 0.83 mg/kg en el sitio No. 7, que corresponde a zona de manantiales, a 1.87 mg/kg, cantidad registrada para la zona limnética.

Referente a nitratos, el rango de las cantidades halladas fue de 97.64 mg/kg a 173.30 mg/kg. El menor valor fue para el sitio número 5 que corresponde al manantial de la Reserva de Urandén y el mayor para el sitio número 4 que pertenece al canal perimetral de la reserva. En los sitios dentro del humedal no se observó mucha diferencia en las cantidades de nitratos (Figura 6.7).

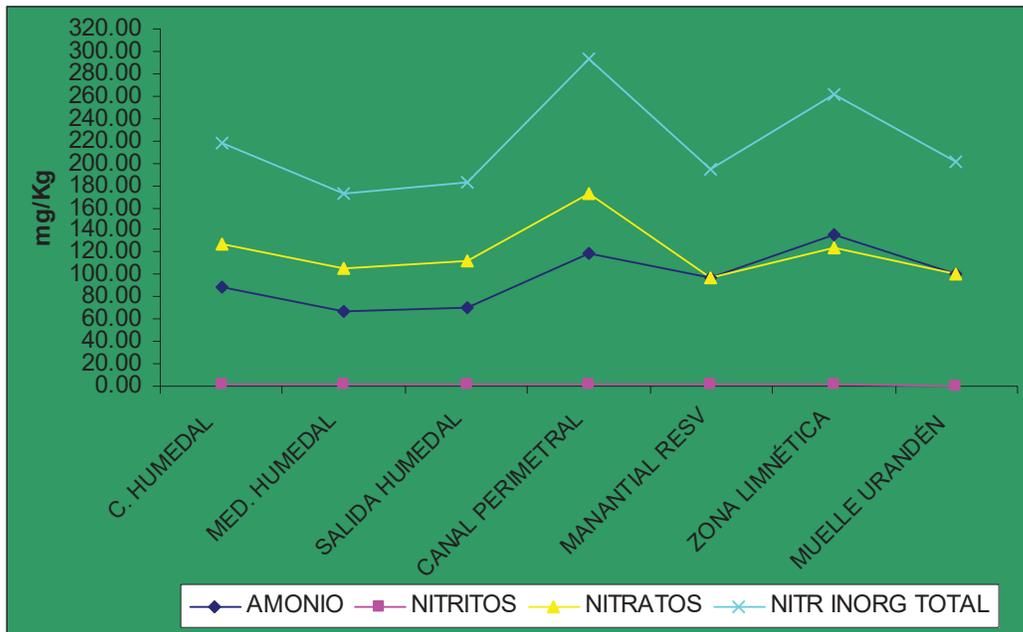


Figura 6.7. Variaciones espaciales en las especies inorgánicas de nitrógeno en sedimento.

6.5.2. Fósforo en sedimento.

Las cantidades de ortofosfato fueron variables de acuerdo al lugar de muestreo y presentaron un rango de 11.25 mg/kg a 32.97 mg/kg. La menor cantidad se encontró en la zona de la reserva y el valor mayor perteneció al sitio 2, que corresponde a la parte media del humedal.

El fosfato total se comportó de manera similar al ortofosfato, especialmente, el valor máximo fue para el sitio No. 6 que es la zona limnética (56.40 mg/kg) y el mínimo se presentó en la zona de la reserva (33.44 mg/kg), en el sitio No. 5 (Figura 6.8)

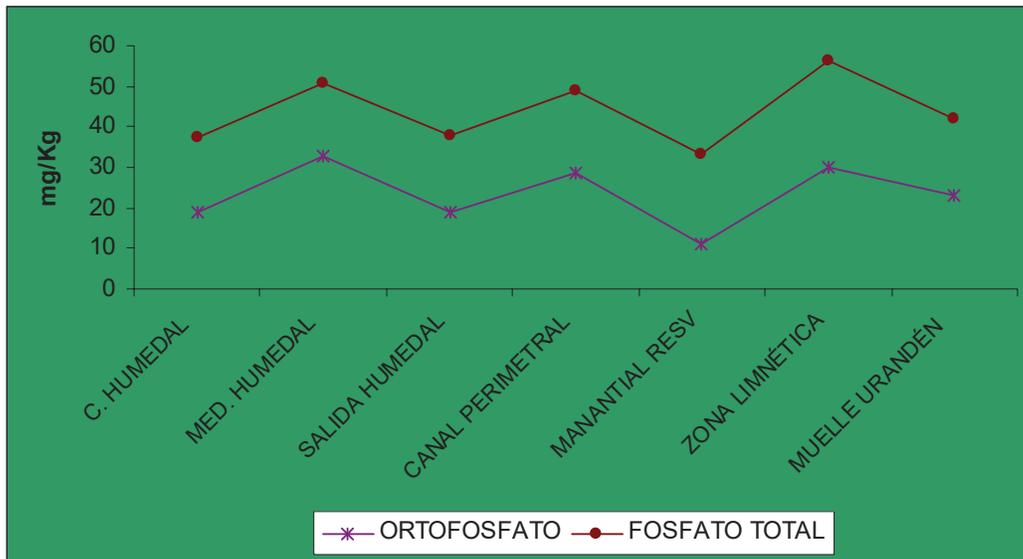


Figura 6.8. Variaciones espaciales en las especies de fosfato en sedimento.

6.5.3. Materia orgánica en sedimento

Las cantidades de materia orgánica presentaron poca variación a lo largo de las zonas muestreadas. Los valores que se obtuvieron oscilan de 81.90 g/kg, cantidad registrada para el sitio No. 2 que es la parte media del humedal, hasta 129.03 g/kg para la zona limnética, es decir el sitio No. 6 (Figura 6.9)

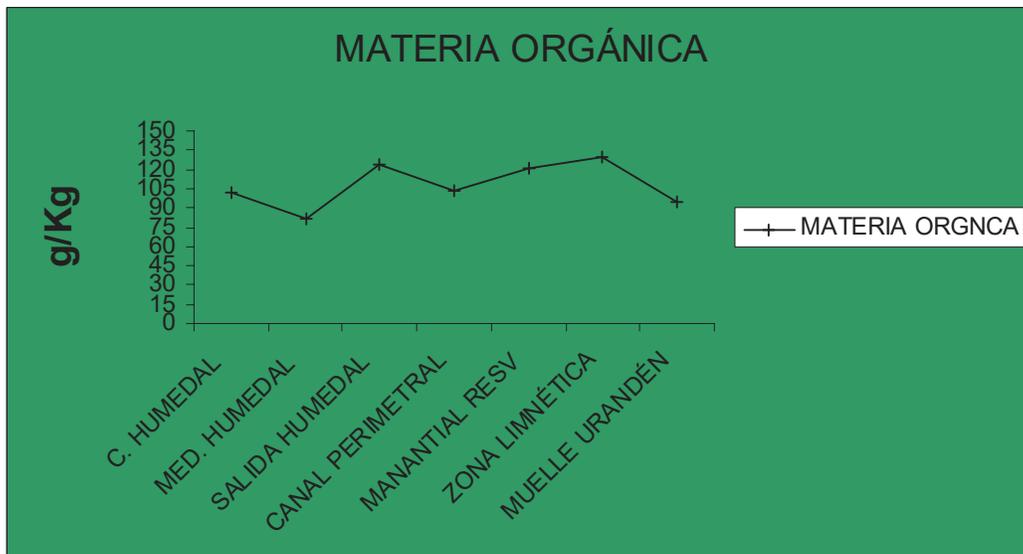


Figura 6.9. Variaciones espaciales de materia orgánica.

VII. DISCUSIÓN

Los lagos michoacanos de Zirahuén y de Pátzcuaro a diferencia del lago de Cuitzeo se encuentran más asociados a eventos de origen volcánico, no obstante en el lago de Pátzcuaro la actividad tectónica ha hecho variar la morfometría del lago con los deslizamientos en masa y las intrusiones. El lago de Cuitzeo con su asociación fuertemente tectónica y la dinámica de su movimiento es un sistema antiguo con una gran acumulación de sedimentos.

Por la geometría del fondo los lagos de Zirahuén y de Pátzcuaro son más jóvenes destacando que sus fondos no se encuentran aún tan colmatados como es el caso de Zacapu y Cuitzeo.

En el caso específico de Pátzcuaro existe un marcado deterioro en la zona sur que se encuentra asociado básicamente a eventos geológicos, como derrumbes y deslizamientos masivos que ha azolvado una porción significativa de la región sur.

Lo anterior se ha manifestado en un alto índice de insularidad que asociado a los procesos de erosión y azolve de la cuenca se ha favorecido el establecimiento de grandes extensiones de vegetación acuática.

Con relación al balance hidrológico el lago de Pátzcuaro ha sufrido periodos de sequía mayores que el actual, como la ocurrida a mediados del siglo XIX en donde el nivel del lago fue inferior a la cota actual. En 1858 el lago alcanzó uno de los niveles más altos en su historia, con una altura mayor de 2040m. Este ascenso del nivel del agua fue el resultado del sismo del 19 de junio que hizo aumentar el nivel del lago en más de 6 m, inundando a más de 120 construcciones asentadas en la ribera las cuales eventualmente por los efectos de la humedad se colapsaron.

Después del nacimiento del volcán Parícutín a finales del año de 1943 el lago inicia su actual regresión. Durante los años de 1944 y 1945 la avanzada regresión descubrió antiguos linderos de parcelas, construidos probablemente durante la regresión de mediados del siglo XIX.

Existen acuíferos profundos o de aguas fósiles mayores a 1000 años recuperables con pozos profundos mayores de 100 metros y que se encuentran alojados en andesitas fracturadas del Mioceno. Estos manantiales pueden llegar al lago a través de fracturas o fallas.

Existen también acuíferos intermedios alojados en los aparatos monogenéticos y productos volcánicos Pliocuatnarios. Sus aguas llegan a la superficie a través de manantiales que se encuentran a alturas entre 2300 y 2600 msnm o bien con manantiales tipo artesianos. La antigüedad de esta fuente de agua es de aproximadamente 50 años.

Existen también acuíferos someros con manantiales que surgen en el contacto de lavas o brechas volcánicas y avalanchas con los sedimentos lacustres. La mayor parte de los niveles estáticos de las norias de las poblaciones del sur del lago se encuentran asociadas con el nivel del espejo de agua del lago. No obstante se identificó circulación de agua por encima de este nivel, sobre todo en la zona de Urandén que corresponde a la zona afectada por la avalancha. Como alimentación hidrológica del lago se reconocen a los acuíferos anteriormente señalados además de las lluvias directas sobre el espejo del lago y los escurrimientos superficiales de la cuenca.

Por lo tanto, los ingresos al balance hidrológico que dependen básicamente de la lluvia y de la aportación de agua subterránea influyen fundamentalmente en el mantenimiento del nivel del lago. Las variaciones negativas se manifiestan como resultado de periodos de años secos y el deterioro de manantiales que llegan a ocluirse por los efectos de la erosión y el azolve.

Cuando se presentan periodos largos de sequía disminuyen los ingresos superficiales y las tasas de recarga e infiltración lo que en consecuencia influyen en los bajos niveles del lago.

En consecuencia se favorece el crecimiento de vegetación acuática generando ambientes de humedal que en la actualidad caracterizan a la ribera sur del lago de Pátzcuaro.

La cuenca de Pátzcuaro se caracteriza por presentar suelos derivados de cenizas volcánicas con tamaños de partículas pequeños incluyendo los suelos de tipo andosol y las arcillas. En consecuencia los sólidos que ingresan al lago de Pátzcuaro poseen largos tiempos de sedimentación ocasionando la permanencia de las condiciones de turbidez o disminución de la transparencia natural del agua. En estas condiciones de alta turbidez los rayos solares no ingresan con la eficiencia que se requiere en el ecosistema acuático. Altas concentraciones de sólidos suspendidos incrementan la dispersión y absorción de la luz disminuyendo a su vez la penetración eficiente de la luz en la columna del agua. Lo anterior significa que la luz llega a menos profundidad y en baja calidad.

En estas condiciones disminuye sustancialmente la productividad natural acuática del lago, especialmente en lo que se refiere a la producción de biomasa vegetal de las algas microscópicas que sustentan la pirámide alimenticia del lago. Al aumentar la turbidez las especies de algas menos tolerantes desaparecen y son sustituidas por especies más resistentes que a su vez pueden ser tóxicas o poco aprovechadas por los siguientes niveles de consumo. Por otro lado las especies de peces depredadores que requieren de condiciones de transparencia de agua mínimas son afectadas en su actividad de alimentación debido a que su capacidad visual para situar a la presa disminuye y al mismo tiempo los sólidos derivados de las cenizas volcánicas son un riesgo potencial de ocasionar daños en las branquias de los peces ocasionando irritaciones en lamelas de intercambio gaseoso y en consecuencia riesgos de infección y mortandad.

Los sedimentos cuando son resuspendidos ya sea por la acción del oleaje o por las acciones de dragado también incrementan la cantidad de materia orgánica que se resuspende y se diluye en el agua. Al incrementar la disolución de materia orgánica se consume más oxígeno disuelto del agua y por lo tanto se resta capacidad de carga para las poblaciones de organismos que requieren del oxígeno como gas de intercambio. Lo anterior es especialmente crítico para especies como los charales y el pez blanco que son poco tolerantes a la disminución de oxígeno disuelto en el agua.

Al descomponer la materia orgánica disuelta se incrementa la cantidad de fósforo y nitrógeno que se incorpora al agua y por lo tanto se aumenta el riesgo de generar floraciones masivas de algas indeseables en el sistema que a su vez pueden representar niveles de toxicidad o de competencia ecológica para algunas especies más sensibles en el ecosistema.

La disminución en los valores de potencial de hidrógeno disminuye también la movilidad química de elementos y compuestos químicos. El potencial de hidrógeno disminuye cuando existe una alta actividad bacteriana. Esto es típico en áreas de estancamiento hidráulico y se caracteriza por la producción de metano al agotarse el oxígeno disuelto. Si se incrementa la movilidad química por los efectos del potencial de oxido-reducción entonces es posible que tóxicos como productos secundarios de agroquímicos, pesticidas, detergentes y pinturas o solventes se disuelvan en el agua. Estos compuestos a su vez son incorporados a la biomasa por procesos de fotosíntesis y consumo de los herbívoros siendo acumulativos a medida que se transfieren en la pirámide alimenticia del ecosistema. Lo anterior representa necesariamente un nivel de riesgo en la toxicidad para el consumo de alimentos procedentes del lago.

Las modificaciones físicas en las pendientes del litoral, en el piso del lago y en la nueva distribución de los sedimentos generan también cambios sustanciales en la dinámica del litoral.

Estas modificaciones tienen consecuencias en las áreas de desove, de refugio y de alimentación de diferentes especies biológicas incluyendo aves, peces y especialmente el achoque del lago de Pátzcuaro.

Las modificaciones en la zona litoral se magnifican ya que la mayor parte de las especies biológicas de Pátzcuaro requieren de aguas cristalinas, oxigenadas y de oleaje para su desove y alimentación.

En estas condiciones de deterioro ecológico la formación de ambientes de humedal representa un sistema de amortiguamiento entre el medio terrestre y el medio acuático. De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio se distingue claramente una disminución sustancial entre las altas concentraciones de sólidos, nutrientes y materia orgánica que ingresan del medio terrestre y aquellas que se generan dentro del lago por los efectos de la eutroficación cultural.

La presencia de la vegetación acuática así como la interfase agua-sustrato induce el asentamiento de sólidos, acelera la descomposición orgánica y liberación de nutrientes que a su vez son absorbidos por las propias plantas para producir tejido vegetal.

De la misma manera, la presencia de un perfil de vegetación establece un gradiente de hábitat para diferentes especies que utilizan el ambiente de humedal para procesos biológicos como protección, alimentación, anidamiento, reproducción y metamorfosis.

Sin embargo, el crecimiento poco controlado de comunidades vegetales también generan efectos negativos especialmente el estancamiento hidráulico, el incremento en la tasa evapotranspiración, incremento en la temperatura por la insolación, pérdidas en el nivel del lago y el aumento de la frontera terrestre.

Lo anterior representa un avance en el deterioro del sistema lacustre, la pérdida en la capacidad de volumen y la modificación de la estructura y relaciones funcionales del sistema acuático.

Por lo tanto, es necesario diseñar estrategias de manejo y aprovechamiento de los humedales que permitan incrementar la frontera acuícola y al mismo tiempo aseguren la existencia de los procesos inherentes a la dinámica de humedal.

Para ello, es necesario integrar criterios que aseguren procesos como el ingreso permanente de agua, mejoramiento de la calidad de la misma, incremento en la hidrodinámica local, así como el incremento en la productividad acuática y la optimización del flujo de energía.

VIII. CONCLUSIONES

1. La batimetría del lago de Pátzcuaro sugiere un fuerte desplazamiento de las líneas de profundidad por la pérdida de nivel de agua, más que a la contribución de azolve al vaso lacustre.
2. Gran parte de las curvas de nivel en la región sur se encuentran bastante suavizadas sugiriendo que gran parte de los depósitos de azolve se distribuyen de manera espacial en delgadas capas de asentamiento diferencial. La hipótesis de que exista un menor ingreso por la disminución en la tasa de infiltración y una alta tasa de evaporación a consecuencia de un periodo de años secos parece la razón más probable de la pérdida de profundidad del agua.
3. Los sedimentos que se presentan en estas áreas del sur del lago se caracterizan por su alta humedad y tamaño de partícula pequeño. Lo anterior significa una baja velocidad de sedimentación, una alta turbidez y poca compactación del piso del lago.
4. A consecuencia de la baja de nivel del lago y a los aportes del azolve en la ribera sur se observa un extenso crecimiento de la vegetación acuática, incluyendo en una secuencia de pendiente de litoral las plantas acuáticas emergentes, plantas acuáticas sumergidas y la plantas de hojas flotantes.
5. El estancamiento hidráulico de la ribera sur del lago se ha acentuado por la construcción del camino que comunica a la ex-isla de Jarácuaro con tierra firme. Las consecuencias de esta obra se reflejan en una disminución y oclusión de manantiales así como un pronunciado estancamiento hidráulico que magnifica las tasas de evaporación local.

6. Los resultados del estudio de hidrodinámica reflejan que los vientos dominantes del suroeste son los que originan los movimientos de agua en el ambiente de humedal. Estos movimientos se presentan tanto en la época de lluvias como en la época de estiaje.
7. Una consecuencia del estancamiento hidráulico se manifiesta en la disminución del corredor de Jarácuaro y la isla de Janitzio con una longitud total de 540 metros y una avanzada disminución de la profundidad promedio, es decir menor al 1.5 metros. Este estancamiento hidráulico también se acentúa con el arraigo de las plantas acuáticas sumergidas y el establecimiento de plantas acuáticas emergentes en zonas de mínima profundidad.
8. El análisis de calidad del agua sugiere que el ambiente de humedal es de fundamental importancia como un sistema de amortiguamiento ecológico entre el medio terrestre y el medio acuático.
9. Los análisis de los sedimentos indican que la dinámica del sustrato es más dinámica que los sedimentos lacustres, lo que en consecuencia, sugiere el mantenimiento de altas concentraciones de oxígeno disuelto para el mantenimiento eficiente de los procesos de óxido reducción.
10. Es pertinente iniciar esquemas que permitan el manejo productivo y conservación del ecosistema de humedal de manera que se evite su crecimiento poco controlado con pérdidas sobre el ecosistema lacustre. En cambio un ecosistema de humedal permitirá proteger la zona federal de invasiones ilegales en asentamientos humanos, permitirá asegurar los incrementos de agua necesarios a través de la infiltración así como un mejoramiento del hábitat para el mantenimiento de la diversidad biológica.

11. Existe una paulatina invasión de las zonas federales por parte de asentamientos irregulares, cultivos y comercios en la ribera generando conflictos de acceso y uso de las zonas litorales además del permanente riesgo de ilegalidad en la posesión de la tierra.

IX. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que la Comisión Nacional del Agua cumpla con su responsabilidad de deslindar las aguas nacionales y el derecho de zona federal para proteger las zonas de litoral que pertenecen al lago de Pátzcuaro. Se recomienda que la cota máxima de zona federal se fije en el nivel máximo de nivel de agua registrado durante el siglo pasado.
2. Es de fundamental importancia realizar un estudio verificativo de bancos de nivel y geodesia con el propósito de establecer un punto de referencia geodésico y los bancos de nivel requeridos para definir la zona federal de aguas nacionales. Lo anterior permitirá la delimitación de las zonas de litoral así como de los humedales para su conservación y manejo sustentable.
3. De la misma manera es necesario establecer instrumental de registro continuo para la obtención permanente de valores de los niveles de agua en el lago. Se recomienda la instalación de un sitio de registro continuo en la ribera sur mientras que el segundo en la ribera norte con el objeto de registrar las oscilaciones de masas de agua por efecto de los vientos.
4. Es necesario realizar a la brevedad posible una evaluación cuantitativa de las fuentes de agua que ingresan a través de los manantiales. Es decir conocer sus gastos y sus efectos en el balance hidrológico local.
5. En consecuencia se recomienda un programa prioritario de obra para la limpieza y rehabilitación de todos los manantiales favoreciendo que sus gastos se incorporen al lago.

6. Para evitar su deterioro es necesario que los manantiales se encuentren protegidos especialmente en su área de nacimiento, con obra civil de bajo impacto y malla ciclónica.
7. Considerando los bajos rendimientos que existen actualmente en los manantiales toda obra que se pretenda realizar en la ribera del lago debe respetar la presencia de los manantiales, por ningún motivo éstos podrán ser cubiertos por sedimento u otro material.
8. Se recomienda que para conocer con mayor precisión la fuente de los manantiales, la posible existencia de otros así como el tiempo de recarga de acuíferos, es necesario realizar estudios de isótopos tanto del agua de lluvia como de los manantiales. De la misma manera se recomienda realizar un trabajo con trazadores para establecer el flujo subterráneo.
9. Es necesario establecer de manera permanente un programa de registro y estimación del balance hidrológico de la cuenca que tome en cuenta el gasto de los manantiales, la precipitación pluvial, los escurrimientos superficiales, la infiltración además de la evaporación, la humedad regional y las variaciones del nivel del lago.
10. Considerando la pérdida de las características originales del agua del lago y el riesgo de extinción de especies biológicas regionales se considera importante realizar un proyecto para que las zonas alimentadas por manantiales sean aprovechadas para el cultivo y protección de fauna acuática nativa.
11. Los nuevos canales que se tengan proyectados en construcción o las zonas de desazolve deben de considerar cuidadosamente la presencia de los manantiales evitando su oclusión.

12. De acuerdo con los resultados obtenidos por César (2003) los sedimentos y las actividades derivadas del dragado representan un riesgo moderado para la salud humana, especialmente en lo que se refiere a las concentraciones de metales pesados incluyendo el Cadmio, Cobre y Plomo. Entonces su posible manejo en la cuenca puede incluir un riesgo para la salud de las comunidades asentadas en la ribera sur. Si los sedimentos extraídos y las actividades de dragado se manejan de manera puntual y con estudios preventivos de diagnóstico, entonces existe el potencial de generar actividades productivas que apoyen la economía de las comunidades indígenas de la ribera. Además al generar nuevas fuentes de trabajo orientadas a la restauración del litoral de Pátzcuaro también se disminuye la presión de aprovechamiento de otros recursos como son la pesca en el lago de Pátzcuaro.
13. Es necesario asignar un papel más ecológico a las nuevas máquinas de dragado mediante el diseño de estrategias controladas para rehabilitar manantiales azolvados, incrementar la hidrodinámica del sistema en áreas de evidente estancamiento hidráulico como son las áreas cercanas al camino asfaltado de Jarácuaro, generar espacios lacustres para el cultivo de especies nativas mediante el manejo y cosecha de la vegetación como una alternativa al dragado intensivo, aprovechar los pocos sedimentos lacustres del dragado puntual en una actividad supervisada de viveros para especies forestales regionales. Se recomienda el aprovechamiento de estas máquinas especialmente en áreas bajo la influencia de manantiales para estimar los tiempos de dispersión de sólidos.
14. Se considera que la propuesta de establecer los denominados camellones agroecológicos no representa una alternativa viable para disminuir la presión sobre la pesca y aprovechar las actividades de restauración para mejorar el ciclo hidrológico regional.

Estos camellones agroecológicos tienen el riesgo de quedar en tierra firme si el periodo de años secos se prolonga durante el inicio del presente siglo. Si se opta por la construcción de ellos se sugiere se seleccionen en áreas experimentales como la zona de Urandén de Morelos en donde existe una mayor recirculación del agua, es posible integrar actividades productivas en tres vertientes dependiendo de la toxicidad o inocuidad de los sedimentos que se extraigan:

- a) Si los sedimentos son tóxicos como es el caso de la desembocadura del río Guani entonces los camellones pueden utilizar lodos en actividades de producción de especies forestales bajo condiciones controladas y supervisadas en riesgos a la salud. Si la toxicidad no permitiera este tipo de actividades entonces es posible sugerir la fabricación de tabiques y cimentación para la construcción. Lo anterior dependiendo de la composición del sedimento y a condición de que existan medidas de seguridad para los trabajadores.
- b) Si los sedimentos tienen una toxicidad baja como es el caso de la zona de San Pedro Pareo, Santa Ana Chapitiro y Erongarícuaro entonces se pueden plantear actividades productivas como la floricultura, cultivo de cactáceas regionales y el cultivo de la orquídea de la cuenca del lago de Pátzcuaro bajo condiciones de invernadero.
- c) Si los sedimentos muestran una clara evidencia de inocuidad como es el caso de los transectos hacia la isla de Janitzio será necesario realizar estudios de factibilidad para producir suelo orgánico en función de la composición del sedimento. Otras actividades pueden ser el cultivo de granos, alimento para ganado o algunas verduras.

Sin embargo, esta alternativa deberá de ser estudiada y reflexionada con cuidado debido a la necesidad de reglamentar los espacios de producción ya que se encuentran en aguas nacionales y existe el riesgo potencial de la tenencia de la tierra frente a las comunidades ribereñas.

15. Es de fundamental importancia establecer un esquema eficiente de manejo y aprovechamiento de la vegetación acuática emergente y sumergida. En principio es necesario delimitar las zonas de humedales como zonas de filtración y aprovechamiento natural de nutrientes particularmente en zonas de litoral. Por otro lado, en zonas de navegación como es el caso del callejón Janitzio-Jarácuaro es necesario realizar labores de limpieza para facilitar los flujos de corriente y la disipación de calor.
16. Se recomienda utilizar las dragas en zonas experimentales para diagnosticar la naturaleza del sedimento, la eficiencia de extracción y los efectos sobre circulación del agua, la turbidez y el agotamiento del oxígeno disuelto, así como en la resuspensión de materia orgánica y la disolución de metales depositados en el sedimento.
17. Tomando en consideración de que no se ha demostrado científicamente la existencia de la sedimentación y columna de azolve del lago se recomienda continuar con los estudios pertinentes para lograr un núcleo del sedimento con el objeto de evaluar la ocurrencia de tasas de azolve en el lago y sus efectos en la capacidad de volumen del mismo.
18. Se requiere de un estudio de capacidad y eficiencia del equipo de dragado disponible. Una draga con una bomba de succión de 30 centímetros de capacidad debe de presentar una eficiencia de descarga de sedimentos de hasta 420 metros cúbicos por hora en condiciones ideales, con un promedio de 365 metros cúbicos por hora en una línea

de 300 metros de longitud. Si la línea de descarga es de 600 metros entonces el rendimiento disminuye hasta 255 metros cúbicos por hora.

19. A partir de un estudio de rendimientos es necesario estimar los costos del dragado como una alternativa de rehabilitación y limpieza en el lago de Pátzcuaro. De acuerdo a un estudio de costos realizados en 20 lagos de los Estados Unidos de Norteamérica, existen costos desde \$3,205 dólares americanos por hectárea en el lago de la Media Luna en Wisconsin con un volumen de extracción total de 250,000 metros cúbicos, hasta el caso de el estanque de la calle 59th en la ciudad de Nueva York en donde un volumen de 13,000 metros cúbicos en una superficie de 1.8 hectáreas se obtuvieron con un costo de \$ 150,900 dólares americanos y en donde el costo mayor fue la disposición final de los sedimentos.

20. Se considera de fundamental importancia evaluar la factibilidad de reconstruir el puente de Jarácuaro bajo un nuevo diseño de ingeniería y en donde se incrementen los espacios de comunicación entre el seno de Erongarícuaro y la ribera sur del lago de Pátzcuaro con el objeto de incrementar el espacio de inundación y de generación de corrientes superficiales.

X. REFERENCIAS

- Abarca, F. J. (2002). Tipos de humedales en México. **En:** F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.). Manual para el Manejo y la Conservación de los Humedales en México. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game& Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional.
- Abarca, F. J. y M. Cervantes (1996).Defición y Claificación de los Humedales. **En:** F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.). Manual para el Manejo y la Conservación de los Humedales en México. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game& Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional.
- Abarca, F. J. y M. Herzing. (2002). Manual para el manejo y conservación de los humedales en México. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game& Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional. Tercera edición.
- Álvarez V.J. (1972) Ictiología michoacana. V. Origen y distribución de la Ictiofauna dulceacuícola de Michoacán. **Anales Escuela Nacional Ciencias Biológicas** México 19, 155-161.
- APHA (1995). **Standard methods for the examination of water and wastewater.**_American Public Health Association. Washington DC, 16th edition.
- Argueta, A. M.; Merino, M; Zubieta, T.; Campos, P. S.; Chávez, J .L.; Rauda, J. y Peña, E. (1986). Japondarhu Anapu o de la pesca en los lagos Michoacanos. **En:** la pesca en los lagos interiores. **En:** Los pescadores de México. Ed. Por A. Argueta, D. Cuello y F. Lartigue. Cuadernos de la casa chata 122. CIESAS, SEP. 13: 1-129 p.
- Banderas T., González V. y Morales P. (2000). **Diagnostico ambiental del algo de Pázcuaru, Michoacán, México. Primera etapa.** Proyecto HC-2025 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. **En:** Corona M.A., (2003). Efecto de la Operaciones de Dragado en la Calidad de Agua y en la Sobrevivencia de Alevines de Pez Blanco (*Chirostoma*

- estor estor*) del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. Tesis Profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás e Hidalgo.
- Barbour C.D. (1973b) a Biogeographical history of *Chirostoma* (Pisces: Atherinidae): A especies flock from the Mexican Plateau. **Copeia** 1973(3), 533-555.
- Barrera B.N. (1986) La cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán: Aproximación al análisis de una región natural. Tesis Profesional. Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM, 393 p.
- Barrera, B. N. (1987) El balance morfogénesis de una cuenca lacustre del Eje Neovolcánico Transmexicano: La región natural de Pátzcuaro, Michoacán. **En:** (Ed. Geissert y J. Rossignol) *Morfología en la ordenación de los paisajes naturales. Conceptos y primeras aplicaciones en México.* Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos e Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación, 67-65.
- Brinson, M.M. (1993). A hydrogeomorphic classification for wetland. U.S. Army Corps Engineers, Waterways Experiment Station, Wetlands Research Program Technical Report YDE4. 79 pp.
- Caballero J., Barrera N., Lot A. y Mapes C. (1981) Excursión a la cuenca de Pátzcuaro. **En:** Guías botánicas de Excursiones en México V. Congreso Mexicano de Botánica. Morelia. Mich., Sociedad Botánica de México. México. 79-91.
- Cooke D.G, Welch E.B., Peterson S.A. y Newroth (1993) **Restoration and mangement of lakes and reservoirs.** Second Edition. Lewis CRC Press. 548p.
- Chacón, T. A. (1989) A limnological study of Lake Pátzcuaro, México, with a consideration of the applicability of remote sesing techniques. Tesis Doctoral, Instituto de Acuacultura, University of Stirling, Escocia, Gran Bretaña. 340 p.
- Chacón Torres A., (1993). **Pátzcuaro un lago amenazado, Bosquejo Limnológico.** UMSNH 144 p.

- Chacón Torres A. (1993) Lake Pátzcuaro, México: watershed and water quality deterioration in a tropical high altitude Latin American lake. **Lake and Reservoir Management** 8(1): 37-47.
- Chacón Torres A. y Múzquiz Iribe L.E. (1997) Climatic trends, water balance and Lake Pátzcuaro, a tropical high altitude lake. **Quaternary International**. 43/44: 43-51.
- Chacón Torres A, L.G. Ross y M.C.M. Beveridge, (1988). Lake Pátzcuaro, México: results of a new morphometric study and its implications for productivity assessments. **Hydrobiologia**. 1984: 125-132. Kluwer Academic Pluvisher, Bélgica.
- Chacón-Torres A., Múzquiz I.L.E. y Pérez M.R. (1991) **Síntesis Limnológica de Pátzcuaro, Michoacán, México. Biología Acuática 1**. Laboratorio de Biología Acuática. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Editorial Universitaria.
- Chacón T. A. y Rosas-Monge C., (1995). A restoration plan for pez blanco in lake Pátzcuaro, Mexico. **En: Uses and effects of cultures fishes**. North American Fisheries Managment, U.S.A.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), (1991). Estudio básico del comportamiento Hidráulico del lago de Pátzcuaro y sus causas. CNA 106 p.
- Contreras, E. F. (1993). Ecosistemas Costeros Mexicanos. CONABIO, UNAM-México, D.F. 415 pp. **En: F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.). Manual para el Manejo y la Conservación de los Humedales en México**. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game & Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional.
- Contreras, Francisco. (2002). Los humedales costeros de México. **En: Manual para el Manejo y Conservación de los Humedales de México**.
- Cowardin, (1979). **La importancia de un inventario y clasificación de humedales**. DUMAC. 2002
- Cowardin, (1979). **Wetland definitions**. EPA regulations 40 CFR 230.3

- Cowardin, *et al.*, (1979). Wetland Clasification. **En:** (Ed. Donald M. K.) Applied Wetlands Science and Tecnology. Lewis Publishers. U.S.A. 2001. 454 p.
- Crowe, Allan. (Ed) 2000. Abstracts from Québec 2000: Millennium Wetland Event Québec, Canada. 527 p.
- De Buen, F. (1943). Los lagos michoacanos. I. Caracteres generales. El lago de Zirahuén. **Revista Sociedad Mexicana Historia Natural**, México, 4(3-4): 211-232.
- De Buen, F. (1943 a). Los lagos Michoacanos. I. Caracteres generales. El lago de Zirahuén. **Revista Sociedad Mexicana Historia Natural** 4, 11-232.
- De Buen, F. (1944). Los lagos Michoacanos. II. Pátzcuaro. **Revista Sociedad Mexicana Historia Natural, México**, 5:99-125.
- De Buen, F. y Zozaya, M., (1942). Variaciones del nivel de la superficie del lago de Pátzcuaro durante los años 1939 a 1941, Investigaciones de la Estación Limnológica de Pátzcuaro, II(1): 1-16 p.
- De la Lanza E. G. y J. L. García-Calderón. 1995. **Lagos y presas de México**. Centro de Ecología y Desarrollo. 320 p. **En:** (Ed: Abarca F.J. y Herzig M.) Manual para el Manejo y Conservación del los Humedales en México. Junio 2002.
- De la Lanza-Epino, G. (1999). **Lagos, Presas y Ríos de México**. **En:** F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.). Manual para el Manejo y la Conservación de los Humedales en México. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game& Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional.
- De la Lanza Espino G. y García J.L., (2002). **Lagos y presas de México**. AGT Editores S.A. México. 680p.
- Demant A. (1978) Característica del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. **Revista Instituto Geología Universidad Nacional Autónoma de México** 2(2), 172-187.
- Domínguez-Parra S. (1995). Criterios de calidad de agua para usos diversos en Zonas Costeras. Aportes de la Universidad Autónoma de Colima.

- Fisher T.C., (2000). Landscapes of the Lake Pátzcuaro Basin. Tesis de Doctor en Filosofía (Antropología). Universidad de Wisconsin-Madison. 157p.
- Fisher C.T. Pollard H. And Frederick Ch., (1999). Intensive agriculture and socio-political development in the Lake Pátzcuaro Basin, Michoacán, México. **Antiquity** 73.642-649p.
- Flores R., Magallanes V. y Mestre J.E. (1992). Evaluación **de las técnicas para el control de la erosión**. CNA. Gerencia regional Lerma-Balsas. 47p.
- García de León F.J., (1985). Relaciones alimenticias y **reproductivas entre *Chirostoma estor estor* y *Chirostoma granducule*** (Peces: Atherinidae) del Lago de Pátzcuaro, Michoacán, Mexico. **Boletín de la Coordinación de la Investigación Científica** 8: 8-15.
- Garduño V. (2000) Estudio geohidrológico de la ribera sur del lago de Pátzcuaro. Informe presentado al Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza.
- Golet y Larson, (1974). **En:** (Ed. Donald M. K.) Applied Wetlands Science and Tecnology. Lewis Publishers. U.S.A. 2001. 454 p.
- Gómez-Tagle R. A. Características de erosión de los suelos de la cuenca de Pátzcuaro y sus relaciones con la vegetación. Centro de Investigaciones Forestales de Occidente (CIFO-SARH). Uruapan, Michoacán, México. (en preparación).
- Gorenstein, S. and Pollard, H. P. (1983). **The Tarascan Civilization: A late prehispanic cultural system**. Vanderbilt University. Publications Antropology No. 28. Nashville, Tennessee, U.S.A. 199 p.
- Hakanson L. (1981) **A manual of lake morphometry**. Springer-Verlag, Berlín. 78pp.
- Hasenaka T. y Carmichael, I. S. E. (1985) The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, Central México: their age, volumen and distribution, and magma discharge rate. **Journal Volacnology Geothermal Research** 25, 104-124.

- I.N.E.G.I. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (1985) **Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán**, México, D.F., 316p.
- Ksuffman J.B., Beacha R.L., Otting N.Y., Lytjen d. (1997) An ecological perspective of riparian ans stream restoration in the west United Status. **Fisheries** 22(5):12-24
- Lara J. (1987). **La Percepción Remota**. SEP. La Ciencia desde México. México.
- Leavenworth W. C. (1946) A preliminary study of vegetation of the region between cerro Tancítaro and río Tepalcatepec, Michoacán, México. **American Midland Naturalist** 36, 137-205.
- Likens, G. E. (ed), 1972. Nutrients and eutrophication. *Limnol. Oceanogr.* Pub. Esp. 1. 378 p.
- Maldonado-Koerdell M. (1964) Geohistory and paleogeography of Middle America. **En:** Hanbook of Middle American Indians (ed. By R. Wauchope). Vol 1, Natural enviroment and early cultures. University of Texas Press, Austin, USA. 3-32 pp.
- Maltby, W. 1991. Wetlnads- their status and role in the biosphere. M.B. Jackson, D.D.Davies y H. Lambers (Ed). Plant life under oxygen deprivation. Academic Publ. The Hague: 3-12.
- Martier *et. al.*, (1953). **En:** (Ed. Donald M. K.) Applied Wetlands Science and Tecnology. Lewis Publishers. U.S.A. 2001. 454 p.
- Metcalfe S.E., Street-Perrott F.A. Brown R.B., Hales P.E. Hales, Perrott R.A. y Steininger, (1989). Late Holocene Human Impact on Lake Basins in Central México. **Geoarcheology**, vol.4, no. 2, 119-141p.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink (2000). *Wetlands*. Third Edition. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink (2000). *Wetlands*. **En:** F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.). Manual para el Manejo y la Conservación de los Humedales en México. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game& Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional.

- Moore, P.D. (1984). The classification of mires: An introduction. En. European mires. Editado por: P.D. Moore. Academic Press, London. P. 1 -10.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Environmental Protection Agency (EPA), Army Corps of Engineers, Fish and Wildlife Service (USFWS) and Natural Resource Conservation Service (NRCS), 2002. What are Wetlands?. U.S. Environmental Protection Agency. www.epa.gov/wetlands/vital/what.html
- Niering, W.A. (1985). Wetlands. The Audubon Society nature guides. Alfred A. Knopf, Inc. New York. Pp.638. **En:** F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.). Manual para el Manejo y la Conservación de los Humedales en México. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game & Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional.
- Odum *et al.*, (1974). **En:** (Ed. Donald M. K.) Applied Wetlands Science and Technology. Lewis Publishers. U.S.A. 2001. 454 p.
- Olmsted, I. (1993). Wetlands of Mexico. 637-677 p. In: Wetlands of the World I. D.F. Whigham *et al.*(eds), Kluwer Academic Publishers. **En:** F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.). Manual para el Manejo y la Conservación de los Humedales en México. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game & Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional.
- O'Hara S.L., (1993). Historical evidence of fluctuations in the level of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México over the last 600 years. **The geographical Journal**. Vol. 159, no.1. pp. 51-62.
- Orbe, A. y J. Acevedo, (1991) Análisis de la selectividad de las artes de pesca y el esfuerzo pesquero en el lago de Pátzcuaro, Michoacán. Secretaria de Pesca. México.
- Robin C. and Demant A. (1975) Les quatre provinces e; dudu Mexique; relatons avec l'évolution geodynamique depuis le Cretace: synthese Miocene-Quaternaire. **Comptes Rendus Academie Science** Paris. Serie D, t. 280, 2437-2440.

- Rosas, M.M. 1970. **Pescado blanco (*Chirostoma estor*). Su fomento y cultivo en México.** Serie Divulgación 2. Instituto Nacional de Investigación en Biología Pesquera. Secretaría de Industria y Comercio. 79 p.
- Rzedowski J. (1978) **Vegetación de México.** Editorial Limusa, México. 423 pp.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). (1984). Estudio batimétrico del lago de Pátzcuaro. Residencia de Estudios de Erongarícuaro, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Inédito.
- Saporito M. S. (1975) Chemical and mineral studies of a core from Lake Pátzcuaro, México. Msc. Thesis, University of Minnesota.
- Stewart y Kantrud, (1971). **En:** (Ed. Donald M. K.) Applied Wetlands Science and Tecnology. Lewis Publishers. U.S.A. 2001. 454 p.
- Tamayo P., R.Juárez, 1983. Monografía del lago de Pátzcuaro **En:** Vázquez-Borges E. (1993). Contaminación Microbiológica del Agua potable. La revista de saneamiento ambiental en México, 9:10-13.
- Toledo, V. M., V. Caballero, C. Mates, N. Barrera, A. Argueta, Núñez, M. A., (1980). Los P´urhépechas de Pátzcuaro: una aproximación ecológica. **América Indígena.** 40(1): 17-55
- Toledo V. M., y N. Barrera-Bassols, (1984). **Ecología y desarrollo rural en Pátzcuaro.** Instituto de Biología UNAM. Mexico. 224pags.
- Villarello J. (1909) Hidrología subterránea de los alrededores de Pátzcuaro. Parergones, 9,339-362. Instituto Geología . México.
- Warner, B.G. (2002). Clasificación de humedales. **En:** F.J. Abarca y M. Herzig (Eds.). Manual para el Manejo y la Conservación de los Humedales en México. Publicación especial. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, Arizona Game& Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service y Wetlands Internacional.
- Watts W. A. and Bradbury J. P. (1982). Paleoecological studies at Lake Patzcuaro en the West-Central Mexican Plateau and at Chalco in basin of Mexico. **Quaternary Research** 17, 56-70.

Zolta *et. al.*, (1975). **En:** (Ed. Donald M. K.) Applied Wetlands Science and
Tecnology. Lewis Publishers. U.S.A. 2001. 454 p.