

El Colegio de México, A.C.
CENTRO DE ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS Y DE DESARROLLO URBANO
(CEDDU)
Promoción 1999 -2001

**"EL DETERIORO DEL LAGO DE PÁTZCUARO Y EL PAPEL DE LA DINÁMICA
URBANA EN SU CUENCA"**

Tesis que para obtener el grado de
Maestro en Estudios Urbanos

Presenta:
José Manuel Rivas Ochoa

DIRECTOR DE TESIS
Prof. Alfonso Mercado

2002

LECTOR
Prof. Cuauhtémoc León Díez



A mis papás por cada año de su vida en la mía

A mis hermanos, Jorge y Flor porque los amo

A mis tías, Amalia y Rosa porque no nos dejaron caer

A mi Familia

A ti Paquito por lo que somos

A Jime y Elías porque nacimos de nuevo

Al Dr. Miguel García Reyes por su amistad.

Al Profesor Alfonso Mercado por su eterna paciencia y confianza.

Al Profesor Cuauhtémoc León por sus constantes cuestionamientos.

Al Dr. Alfonso Banderas Tarabay y a su esposa Rebeca González por su apoyo, asesoría y ayuda.

A Raúl Lemus Pérez por su ayuda en la realización del mapa.

A Liz Evia porque me adoptó durante 2 años

Índice

Introducción	1
1. La cuenca del Lago de Pátzcuaro	2
1.1 Descripción de la cuenca del Lago de Pátzcuaro.....	2
1.2 Los principales problemas del Lago y su relación con las actividades humanas	6
1.2.1 Disminución del nivel del Lago.....	7
1.2.2 Abundancia de plantas acuáticas.....	8
1.2.3 Menor calidad Disminución en la calidad del agua.....	8
1.2.4 Disminución de las pesquerías.....	9
1.2.5 Sustitución de especies pesqueras.....	10
1.3 Crecimiento de la población y grado de urbanización.....	11
2. Dinámica físico-química del lago	19
2.1 La eutrofización.....	19
2.2 Resistencia de los Lagos a la contaminación y a su restauración.....	26
2.3 Parámetros físico-químicos.....	27
2.3.1 La Transparencia.....	29
2.3.2 Oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno (pH).....	35
2.4 Estado trófico del Lago de Pátzcuaro.....	36
3. Planificación mejorar la calidad del agua del Lago de Pátzcuaro	38
3.1 Impacto de las actividades humanas en la calidad del agua de los lagos a nivel mundial.....	38
3.2 Métodos mundiales de restauración de Lagos.....	40
3.2.1 La biomanipulación.....	41
3.2.2 Los humedales.....	42
3.3 Estrategias de gestión de Lagos.....	43
4. Discusión y reflexiones finales	47
5. Referencias	52

Introducción

Uno de los problemas de la planificación urbana al adoptar un criterio de sustentabilidad es la falta de un análisis equilibrado entre lo regional-social y lo ecológico. Este trabajo fue originalmente motivado por la inquietud de contribuir en esta dirección. El objetivo es precisamente el de elaborar un estudio sobre las implicaciones de planificación regional sustentable que tome en cuenta de manera explícita la calidad del agua del Lago de Pátzcuaro y su interacción con su entorno social, económico y ecológico.

Más específicamente, el objetivo central del trabajo es proporcionar una idea lo suficientemente clara del estado actual del conocimiento sobre el ecosistema del Lago de Pátzcuaro y sus tendencias, tomando en consideración los factores urbanos y sociales de la cuenca, que permita llegar a propuestas de restauración viables.

La información sobre el Lago de Pátzcuaro se encuentra diseminada en diversas fuentes y responde a criterios y enfoques de diferentes disciplinas. Ante esta dificultad, el estudio también pretende incorporar, articular y analizar dicha información.

En atención a estos objetivos, se muestran tres capítulos: El primer capítulo presenta una breve descripción de las características físicas del Lago de Pátzcuaro y su entorno, así como la localización geográfica de los diversos asentamientos humanos ubicados en las cercanías al Lago, lo cual es de utilidad para entender sus procesos y problemas. Además, en este capítulo se describe la dinámica demográfica y urbana de los municipios inmersos en la problemática del Lago.

En el segundo capítulo se estudian los procesos relacionados con la disminución de la calidad del agua del Lago. Entre éstos, se pone especial atención a la eutrofización del Lago y las implicaciones de la dinámica urbano-rural antes descrita. El tercer capítulo se centra en una revisión de algunos estudios de caso de restauración de Lagos con problemas de eutrofización en el mundo, con el fin de contar con opciones de planificación orientadas a mejorar la calidad del agua en el Lago de Pátzcuaro. Se brinda al final una sección de discusión y reflexiones finales.

1. La cuenca del Lago de Pátzcuaro

En este capítulo se describen las principales características físicas del Lago y su entorno, así como la dinámica demográfica y urbana de la cuenca durante las últimas décadas.

1.1 Descripción de la cuenca del Lago de Pátzcuaro

En términos de la evolución geológica de la corteza terrestre, el Lago de Pátzcuaro es un Lago maduro (aproximadamente 44,000 años) y forma parte de una cuenca de drenado endorreica. Se entiende por cuenca al territorio rodeado de montañas cuyas aguas fluyen a un mismo punto, en este caso, el Lago de Pátzcuaro. El término endorreica significa que un lago no tiene ninguna salida natural; así todo lo que llegue a depositarse o a ingresar en la cubeta del lago se quedará dentro del mismo (por ejemplo, los sedimentos que acarrear los escurrimientos o las descargas residuales provenientes de los centros urbanos).

Además, el carácter endorréico (cerrado) de la cuenca del Lago de Pátzcuaro es precisamente el que ocasiona que los ecosistemas naturales incluidos en ella estén estrechamente vinculados y que, por lo tanto, cualquier modificación en alguno de ellos tendrá consecuencias directas o indirectas en toda la cuenca, principalmente en su base: el Lago de Pátzcuaro (López et al., 2000).

Esta característica de ser un sistema cerrado también determina que los aportes de agua al Lago se limiten a la precipitación estacional y a la infiltración y escurrimientos de la cuenca, mientras que sus principales pérdidas se deben a la evaporación y a la evapotranspiración.¹

La delimitación más reciente de la cuenca del Lago fue establecida por Brena (2000) quien utilizó imágenes del satélite LANDSAT para establecer el polígono de la cuenca.

¹ La evapotranspiración es básicamente la traspiración de las plantas más la evaporación física

Al contar con este polígono, se procedió a georreferenciarlo para sobreponerle la división municipal así como las localidades rurales y centros urbanos de los municipios establecidos dentro de esta área geográfica (Mapa 1).

El Mapa 1 nos permite establecer los municipios que están (así sea parcialmente) en el polígono de la cuenca. Esta información también se presenta en el Cuadro 1.

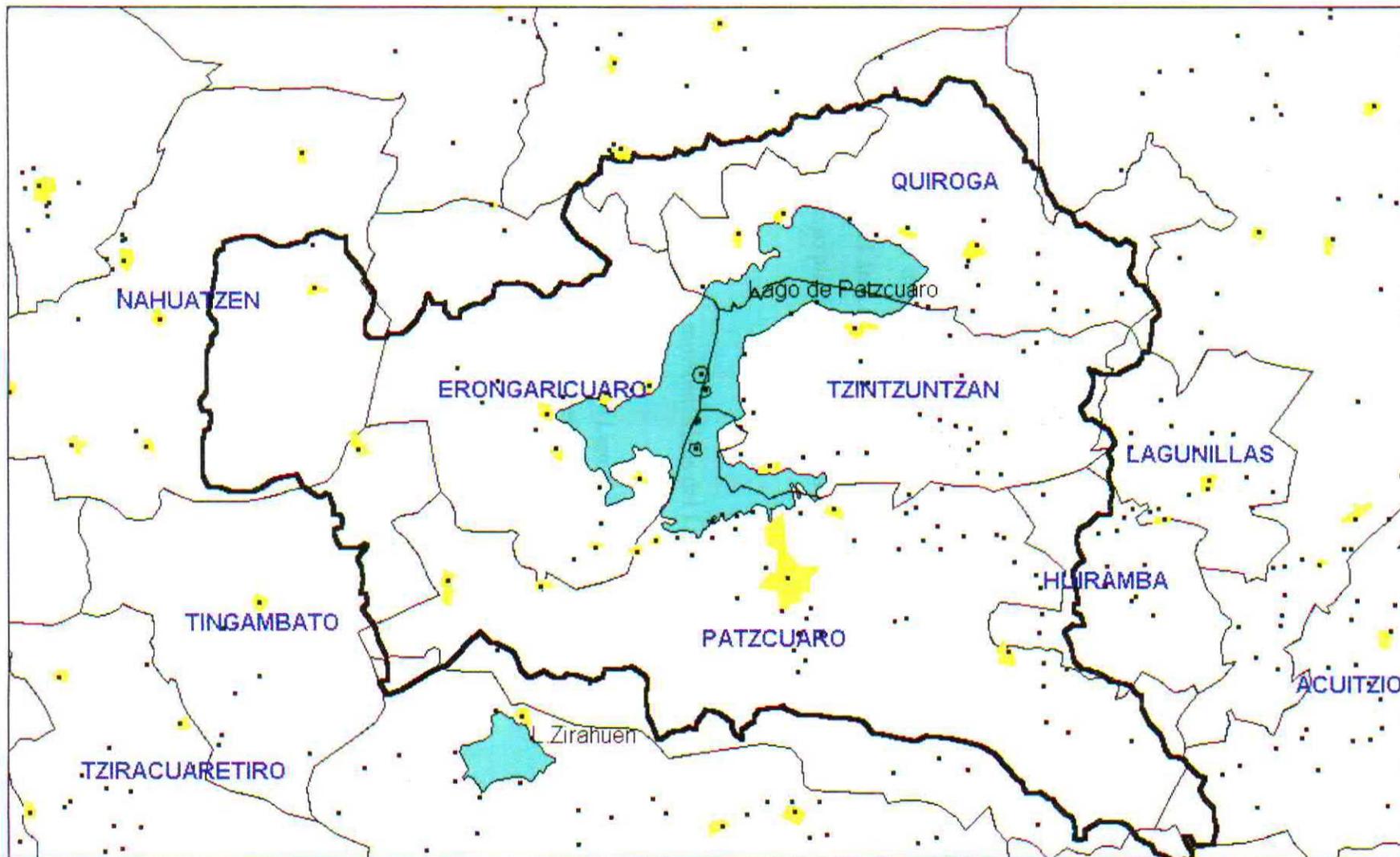
Cuadro 1: Municipios dentro del polígono de la cuenca y su participación en el área de la misma

MUNICIPIO	ÁREA DEL MUNICIPIO DENTRO DE LA CUENCA SIN INCLUIR EL ÁREA DEL LAGO (%)	ÁREA DEL MUNICIPIO DENTRO DE LA CUENCA INCLUYENDO EL ÁREA DEL LAGO (%)	PARTICIPACIÓN DEL MUNICIPIO EN EL ÁREA DE LA CUENCA (%)	LOCALIDADES DENTRO DEL ÁREA DE LA CUENCA
PATZCUARO	76.20	79.90	33.39	sí
ERONGARICUARO	67.76	79.71	16.61	sí
TZINTZUNTZAN	84.71	98.92	14.45	si
QUIROGA	65.43	77.92	14.37	sí
NAHUATZEN	30.46	30.46	9.37	sí
TINGAMBATO	19.36	19.36	3.70	sí
COENEO	8.96	8.96	3.60	no
HUIRAMBA	30.97	30.97	2.52	sí
ACUITZIO	3.61	3.61	0.65	no
TACAMBARO	0.71	0.71	0.57	no
LAGUNILLAS	4.88	4.88	0.41	no
SALVADOR ESCALANTE	0.72	0.72	0.36	no
TOTAL			100	

Fuente: Elaboración propia con base en los datos cartográficos del INEGI (1995)

El Cuadro 1 incluye el porcentaje del territorio del municipio que se encuentra dentro del polígono de la cuenca. Una de las columnas señala este porcentaje excluyendo el área del Lago y otra columna incluyéndola. Esto es con el fin de tener la información precisa; como es el caso del municipio de Tzintzuntzan, que aunque se encuentra casi en su totalidad dentro del área de la cuenca (98.92%), la columna que no considera el área del Lago podría causar confusión al indicar que únicamente el 84% del territorio de este municipio se encuentra dentro de esta área.

MAPA 1 CUENCA DEL LAGO DE PATZCUARO Y DIVISION MUNICIPAL



Fuente: Brena 2000 nota la línea continua negra demarca la cuenca del lago de Patzcuaro, los puntos las localidades rurales y las áreas urbanas en amarillo.

Otro aspecto importante que se observa en el Cuadro 1 es la columna que señala la participación del municipio en el área de la cuenca, es decir, la proporción que representa cada municipio al conformar dicha área. El municipio de Pátzcuaro es el más importante en este respecto, ya que el 76% de su territorio representa el 33% del área de la cuenca.

Los municipios más significativos, en cuanto al área dentro del polígono, son los cuatro colindantes al Lago: Pátzcuaro, Erongarícuaro, Tzintzuntzan y Quiroga, los cuales conforman el 78% del área de la cuenca. Por otra parte, si observamos las localidades rurales y las áreas urbanas en el Mapa 1, podemos establecer que estos cuatro municipios son también los más importantes en cuanto a población dentro de la cuenca.

Así mismo, se pueden descartar varios municipios del análisis de población y crecimiento urbano que se realizará más adelante, debido a que muchos de los municipios que están parcialmente dentro del área de la cuenca no tienen o cuentan con muy pocas localidades en la misma y, como se explicó, lo que se encuentra fuera del polígono no tiene una influencia directa sobre el Lago.

Las principales características morfométricas del Lago se presentan en Cuadro 1-A.

Cuadro 1-A: Características morfométricas del Lago de Pátzcuaro

Área cuenca de drenaje incluyendo el Lago (km ²)	929.0
Longitud máxima (km)	19.8
Anchura máxima (km)	10.9
Profundidad máxima (m)	12.2
Profundidad media (m)	4.9
Area total Lago (km ²)	130.0
Volúmen (x 10 ⁶ m ³)	628.0

Fuente: Chacón (1993)

Estas características denotan al Lago de Pátzcuaro como un Lago poco profundo con una razón área de la cuenca / área del Lago de 7:1, es decir, el territorio que anteriormente se especificó como de alta influencia sobre el Lago involucra un área siete veces mayor al mismo.

El Mapa 1 y el Cuadro 1 también nos permiten comparar algunos de los datos morfométricos reportados anteriormente; por ejemplo, el área del Lago que se obtuvo con datos del INEGI (1995) fue de 93.86 km², que es un área bastante menor a los 130 km² reportados 2 años atrás. Así mismo, el área de la cuenca, incluyendo el área del Lago, fue de 1059 km² y excluyendo el área del mismo, fue de 965 km², ambas áreas son superiores a la reportada por Chacón (1993) de 929 km².

Al respecto, Chacón (1993) realiza una comparación entre los diferentes reportes sobre la morfometría del Lago, los cuales presentan resultados con diferencias significativas en cuanto al área total del Lago y al área de la cuenca de drenaje.

Esta diferencia de resultados es un problema debido a que tanto el cálculo del balance hidrológico como la estimación del volumen del Lago se realiza con base en ellos. Así, por ejemplo, diferencias de pocos metros en el área del Lago significan sobreestimaciones de miles de m³ en el volumen del Lago y, por tanto, en los coeficientes de evaporación del mismo.

Por su parte, las clases de uso de suelo identificadas en la cuenca en 1996 (Cuadro 2) corresponden a lo reportado por Brena (2000) quien utilizó nuevamente imágenes de satélite LANDSAT para este propósito.

El Cuadro 2 muestra que el suelo urbano de la cuenca representa el 2.4 % del total, y como se observará más adelante, las descargas residuales de estas áreas son responsables de una buena parte del deterioro del Lago.

El suelo agrícola utilizado (cultivo en pie) representa 4.69% del total de la cuenca, mientras que el restante suelo agrícola -22.18% del total- se encuentra en descanso u ocioso. Es

importante aclarar que una gran parte de este suelo ocioso o abandonado es consecuencia de infructuosas prácticas de deforestación con fines agrícolas o ganaderos, y/o de un sobreaprovechamiento del recurso forestal, y/o de la emigración de campesinos hacia Estados Unidos.

Cuadro 2: Clases de uso de suelo de la cuenca del Lago de Pátzcuaro 1996

TIPO DE COBERTURA	SUPERFICIE (ha)	% del total
Bosque	22,758.12	22.54
Pasto-Bosque	7,649.88	7.58
Cultivo en pie	4,744.69	4.70
Matorral	22,100.22	21.89
Pasto	7,582.11	7.51
Agrícola	22,397.34	22.18
Hidrófita	788.04	0.78
Urbano	2,459.15	2.44
Cuerpos de agua	8,944.34	8.86
Sombra	1,174.50	1.16
No clasificado	395.82	0.39
TOTAL DE LA CUENCA	100,964.20	100

Fuente: Brena (2000)

Finalmente, la superficie de bosque (pino-encino) representa el 22.54% del territorio de la cuenca. Este espacio es vulnerable a incendios provocados por propietarios ganaderos, a la tala clandestina, a diferentes tipos de plagas (como el gusano descortezador), y a los requerimientos de los hogares y ladrilleras locales.

1.2 Los principales problemas del Lago y su relación con las actividades humanas

En el Lago y su entorno se desarrollan actividades pesqueras, agrícolas, turísticas, comerciales, forestales y artesanales, las cuales han experimentado un rápido crecimiento

en los últimos 30 años, lo que se ha traducido en una serie de afectaciones o efectos exógenos que interfieren negativamente con el ecosistema lacustre.

En particular, actualmente el Lago de Pátzcuaro presenta un deterioro caracterizado por los siguientes aspectos: la disminución del nivel del Lago, la abundancia de plantas acuáticas, la disminución de la calidad del agua, la disminución de las pesquerías y la sustitución de especies pesqueras. A continuación se detalla cada uno de estos aspectos.

1.2.1 Disminución del nivel del Lago

En la actualidad, el nivel del Lago ha disminuido a causa de diferentes factores. El primero de ellos, obedece a variaciones estacionales o a eventos climatológicos de gran escala como el fenómeno de “El Niño”, que afectan al balance hidrológico de la cuenca.

Estas variaciones fueron estudiadas por Morales (2000) quien determinó que en el Lago existen fluctuaciones en los ciclos de las lluvias de 4 años y de hasta 20 a 22 años, así como un ciclo de 45-46 años en el nivel del mismo.

Las extracciones de agua que se hacen al Lago para el consumo doméstico y la irrigación significan otras fuentes de esta disminución del nivel. En particular, ya que cuando se usa el agua para riego, ésta tiene una elevada tasa de evaporación y lo que llega a infiltrarse es absorbido por las plantas y posteriormente es evapotraspirado por las mismas, lo que genera que la infiltración hacia el Lago sea nula o muy poca y esto, a su vez, impide que el Lago se recargue mediante esta fuente.

Otra causa de la disminución en el nivel del Lago es la cantidad de azolve que ingresa al mismo a causa, principalmente, de la deforestación de la cuenca. Debido a esta deforestación, un 70% de la superficie de la cuenca presenta un alto grado de erosión (Morales, 2000). Un suelo erosionado es incapaz de retener los sedimentos que arrastran las corrientes pluviales hacia el Lago, por lo que éstos se depositan en el fondo del mismo reduciendo su profundidad y por tanto su nivel o volumen.

1.2.2 Abundancia de plantas acuáticas

El crecimiento de plantas acuáticas en el Lago se debe a un factor que se aborda con mayor profundidad más adelante. Sin embargo, a manera de introducción, se puede señalar que esta abundancia de flora acuática es consecuencia de un exceso de nutrientes diluïdos en el cuerpo de agua.

Estos nutrientes provienen de dos fuentes principales: las llamadas fuentes puntuales, que son aquellas que se tienen bien identificadas y que por tanto son más susceptibles a ser monitoreadas, evaluadas y sometidas a diversos métodos de tratamiento. Las principales fuentes puntuales hacia el Lago de Pátzcuaro son las aguas residuales urbanas provenientes de los sistemas de drenaje y alcantarillado de diferentes localidades de los municipios de la cuenca.

Por otra parte, las fuentes no puntuales, derivadas de la agricultura, son aquellas que llevan o acarrear fertilizantes al Lago mediante escurrimientos pluviales y lluvia ácida principalmente, situación que provoca que su medición sea aproximada y los métodos directos para su tratamiento sean casi imposibles.

Uno de los problemas que genera la abundancia de plantas acuáticas es que al morir, demandan una gran cantidad de oxígeno durante su proceso de descomposición lo que disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua.

De la misma manera, el exceso de estas plantas limita la penetración de la luz solar al agua disminuyendo los procesos fotosintéticos que lleva a cabo el fitoplancton en el Lago, restringiendo la cantidad de oxígeno disponible.

1.2.3 Disminución en la calidad del agua

El deterioro en la calidad del agua que ha venido experimentando el Lago de Pátzcuaro no es más que el reflejo de una de las principales contradicciones que enfrenta. Por un lado, funge como base regional para la reproducción directa e indirecta de las actividades que,

como se señaló anteriormente, se realizan en el Lago y su entorno -lo que ha generado toda una serie de investigaciones y acciones para protegerlo y restaurarlo- y, por el otro, es utilizado como receptor de afluentes de distinto tipo que continúan deteriorando su estado y disminuyendo la cantidad de usos que el hombre podría darle a este cuerpo de agua.

Es importante mencionar que en la actualidad el Lago de Pátzcuaro recibe en crudo (sin tratamiento previo) todos los afluentes de las localidades que cuentan con sistemas de drenaje y alcantarillado a excepción de la localidad de Quiroga (21,917 habitantes*) que cuenta con una pequeña planta de tratamiento de 10 l/s aprox. y varias fosas sépticas.

Por su parte, los tributarios naturales (ríos y arroyos) que llegan al Lago son utilizados como basureros y/o receptores de aguas residuales de pequeñas localidades que contienen, además de desechos humanos, contaminantes como gasolina, solventes, aceites y diversas clases de pinturas que se utilizan en las diversas actividades expuestas anteriormente.

Los procesos que han disminuido las posibilidades de uso del agua por parte del hombre así como algunas de las variables físico-químicas que se utilizan para evaluar la calidad del agua del Lago se abordan más adelante.

1.2.4 Disminución de las pesquerías

El Cuadro 3 muestra la disminución que la producción pesquera del Lago de Pátzcuaro ha venido experimentando en las últimas décadas. Este problema se debe a tres aspectos principales. El primero y más importante es la sobreexplotación que los pescadores practican sobre las especies del Lago, los cuales no respetan las épocas de veda establecidas por la SAGARPA. El segundo, es la creciente contaminación que el Lago experimenta por causa de las fuentes puntuales y no puntuales.

Finalmente, el tercer aspecto que interfiere en la producción pesquera es la introducción de especies exóticas al ecosistema lacustre -la carpa y la lobina principalmente- lo que tiene

* Códice 90, INEGI. Censo General de Población (1990)

como consecuencia una disminución de las especies endémicas (locales), debido a que las especies introducidas compiten con las locales por el nicho que les corresponde, tanto por espacio como por alimento.

1.2.5 Substitución de especies pesqueras

Este desequilibrio obedece nuevamente a la introducción de especies exóticas al Lago debido a que éstas (carpa y lobina) han desplazado a las especies locales. Específicamente, la lobina ha desplazado a la especie más característica del Lago de Pátzcuaro: el pescado blanco, variedad muy apreciada a nivel nacional como lo refleja su precio de US\$18 el kg.

En el Cuadro 3 puede verse el desplazamiento de la lobina sobre el pescado blanco durante la década de los ochenta, donde la producción de pescado blanco disminuyó de 136 toneladas al año en 1981 a 42 toneladas en 1990 mientras que la producción de lobina se incrementó de 198 toneladas en 1981 a 434 toneladas en 1989.

El Cuadro 3 también refleja los esfuerzos que la acuacultura realizó en los noventa para reducir la población de la lobina y fomentar la reproducción y recuperar, en la medida de lo posible, la producción de pescado blanco en el Lago, esta producción se ha logrado mantener en un promedio de nueve toneladas al año.

Las especies que en la actualidad se comercializan tienen un precio de venta inferior al pescado blanco y, como se aprecia en el Cuadro 3, en la actualidad la producción pesquera es tan pequeña que en muchas ocasiones no es suficiente para satisfacer siquiera los requerimientos alimenticios de los pescadores y sus familias, lo que significa que una de las actividades más antiguas y mejor remuneradas en el Lago está desapareciendo al no generar al menos, niveles de autosuficiencia en la producción

Cuadro 3. Producción pesquera del Lago de Pátzcuaro (ton / año)

Año	Acúmura	Blanco	Carpa	Charal	Chehua	Lobina	Mojarra	Achoque	Total
1981	163	136	56	162	7	198	15		738
1982	130	159	343	212	12	295	48		1189
1983	174	94	323	157	8	244	39		1039
1984	190	76	219	216	2	207	36		946
1985	377	98	376	523	35	304	87	14	1814
1986	381	83	321	330	17	342	60	18	1552
1987	333	84	407	306	155	243	163	19	1710
1988	660	81	637	397	224	269	243	13	2524
1989	406	69	483	442	258	434	225	2	2319
1990	235	42	246	233	203	123	171		1253
1991	242	22	149	221	169	2	166	2	973
1992	187	24	282	402	264	3	188	4	1354
1993	122	20	80	278	137	1	80	2	720
1994	74	9	61	158	73	1	60	1	437
1995	116	8	62	181	79	0.3	60	2	508
1996	98	9	68	262	71	2	54	2	566
1997	97	9	77	271	82	1	52	3	592
1998	85	10	51	157	44	0.2	31	3	381

Fuente: Orbe y Acevedo, en prensa (García, 2000)

1.3 Crecimiento de la población y grado de urbanización en la cuenca

A través de un enfoque urbanista, en este apartado se pretende describir la dinámica demográfica y urbana de los municipios colindantes al Lago de Pátzcuaro, los cuales, como se estableció anteriormente, son los más significativos en cuanto a territorio y población dentro del área de la cuenca

El objetivo de esta parte descriptiva es presentar los datos que serán utilizados en el análisis sobre la relación del crecimiento demográfico y urbano en el deterioro del Lago, así como señalar los cambios que estas dos variables han presentado y sus posibles consecuencias e implicaciones en el mismo.

El Cuadro 4 y la Gráfica 1 muestran el crecimiento demográfico de los municipios colindantes al Lago de 1930 hasta las proyecciones del 2010. Los municipios de Pátzcuaro y Quiroga son los de mayor población y contienen entre ambos, aproximadamente al 80% de la población de la cuenca (Banderas, 2000).

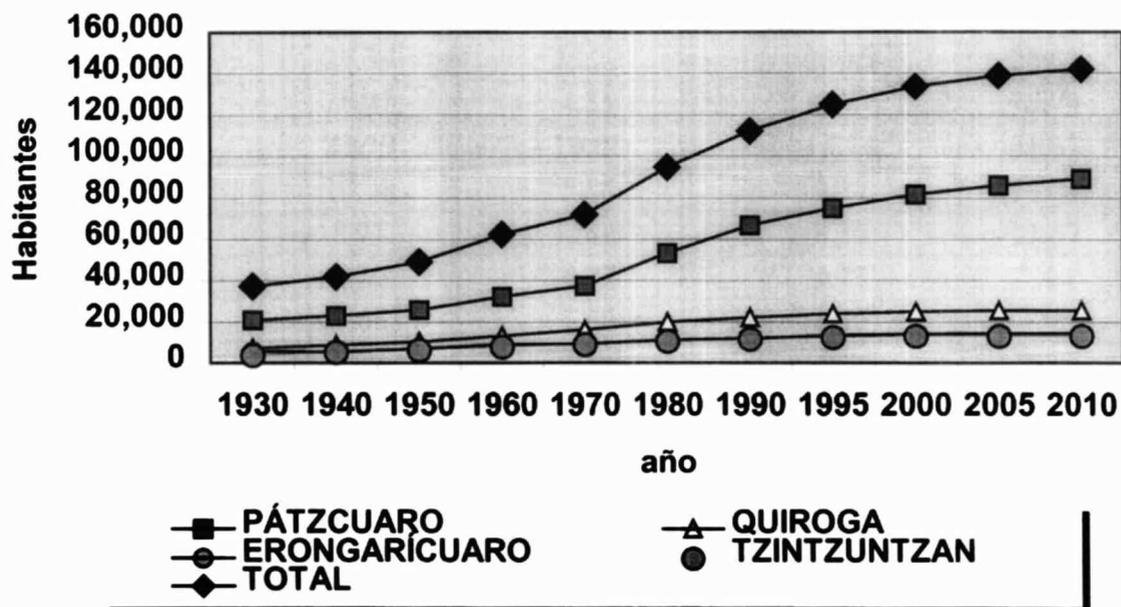
Cuadro 4: Dinámica de la población de los municipios colindantes al Lago de Pátzcuaro

AÑO	PÁTZCUARO	QUIROGA	ERONGARÍCUARO	TZINTZUNTZAN	TOTAL
1930	20,820	7,077	5,726	3,802	37,425
1940	22,929	8,672	5,244	5,249	42,094
1950	25,879	10,263	6,714	6,350	49,206
1960	32,430	13,074	9,079	7,820	62,403
1970	37,615	16,004	9,470	9,139	72,228
1980	53,287	19,748	11,270	10,440	94,745
1990	66,736	21,917	11,930	11,439	112,022
1995	75,176	23,825	13,368	12,394	124,763
2000	81,650	24,945	14,006	12,943	133,544
2005*	86,125	25,363	14,230	13,111	138,829
2010*	89,277	25,396	14,218	13,066	141,957

Fuente: Banderas (2000)

*Proyección, Banderas (2000)

Gráfica 1: Dinámica de la población en la cuenca de Pátzcuaro (1930-2010)



Por su parte, el Cuadro 5 y la Gráfica 2 muestran la tasa de crecimiento de la población de cada municipio y del total aproximado de toda la cuenca. El mayor crecimiento demográfico se presentó en la década de los setenta, en la cual el municipio de Pátzcuaro creció a una tasa superior al 40%, mientras que la población de toda la cuenca creció en más del 30%.

En el Cuadro 5 también podemos apreciar una disminución en las tasas de crecimiento demográfico de 1995 a la fecha, aunque en términos absolutos Pátzcuaro continua incrementando considerablemente su población, por ejemplo, en la década de los noventa este municipio incrementó su población en más de catorce mil habitantes, población que representa aproximadamente al 11% del total de habitantes de la cuenca en el año 2000.

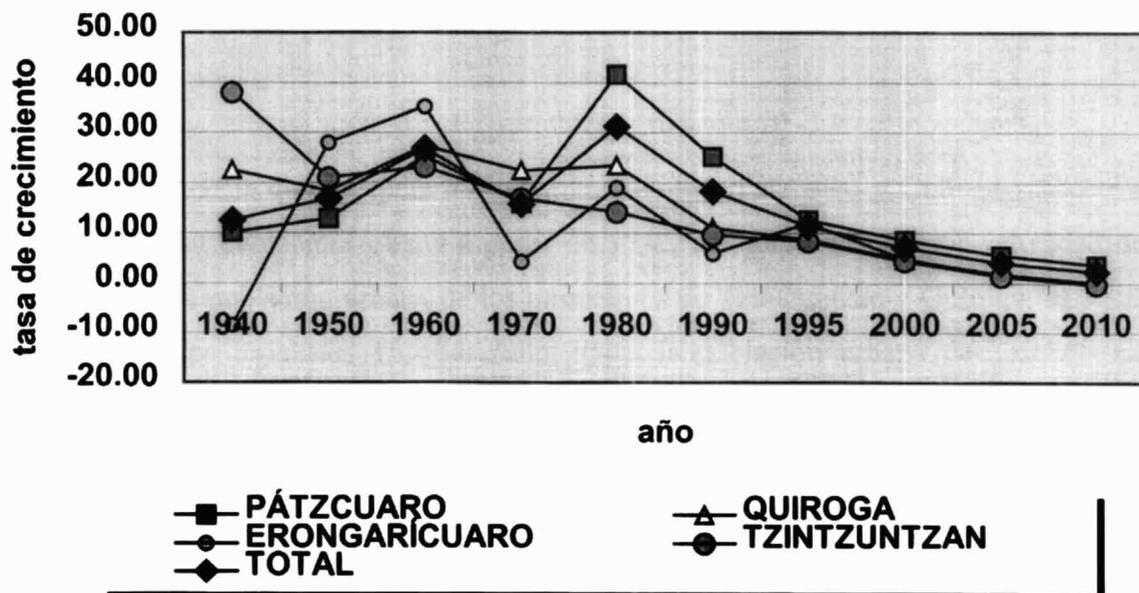
Cuadro 5: Tasa de crecimiento de los principales municipios colindantes al Lago de Pátzcuaro

AÑO	PÁTZCUARO	QUIROGA	ERONGARÍCUARO	TZINTZUNTZAN	TOTAL
1940	10.13	22.54	-8.42	38.06	12.48
1950	12.87	18.35	28.03	20.98	16.90
1960	25.31	27.39	35.22	23.15	26.82
1970	15.99	22.41	4.31	16.87	15.74
1980	41.66	23.39	19.01	14.24	31.17
1990	25.24	10.98	5.86	9.57	18.24
1995	12.65	8.71	12.05	8.35	11.37
2000	8.61	4.70	4.77	4.43	7.04
2005*	5.48	1.68	1.60	1.30	3.96
2010*	3.66	0.13	-0.08	-0.34	2.25

Fuente: Elaboración propia con base en Banderas (2000)

*Proyección Banderas (2000)

Gráfica 2: Tasa de crecimiento de la población de los municipios colindantes al lago (1940-2010)



Una gran parte de esta creciente población nace o ha tenido una tendencia a emigrar hacia los centros urbanos de estos municipios como lo muestra el Cuadro 6 y las Gráficas 3, 4, 5 y 6, donde se presenta la dinámica urbana de los municipios colindantes al Lago de 1940 a 1995.

En 1940 únicamente el 19% de la población habitaba en alguno de los centros urbanos de la cuenca, mientras que para 1995 (55 años después) el porcentaje se ha incrementado y la población urbana aproximada de la cuenca supera el 60%.

En las Gráficas 3 a 6 se puede apreciar con mayor claridad el creciente porcentaje de población urbana de estos municipios. Cabe señalar que aunque Tzintzuntzan y Erongarícuaro comenzaron recientemente (de 1980 a la fecha) su tendencia a urbanizarse, la velocidad de este proceso ha sido mayor en estos dos municipios que en los de Pátzcuaro y Quiroga.

Tzintzuntzan de 1960 a 1980 (20 años) incrementó su población urbana de 0% a 25% y para 1995 (15 años después) la proporción de la población urbana en el municipio superó el 60%. Por su parte, la población urbana de Erongarícuaro se incrementó en más del 20% de 1980 a 1995 (15 años).

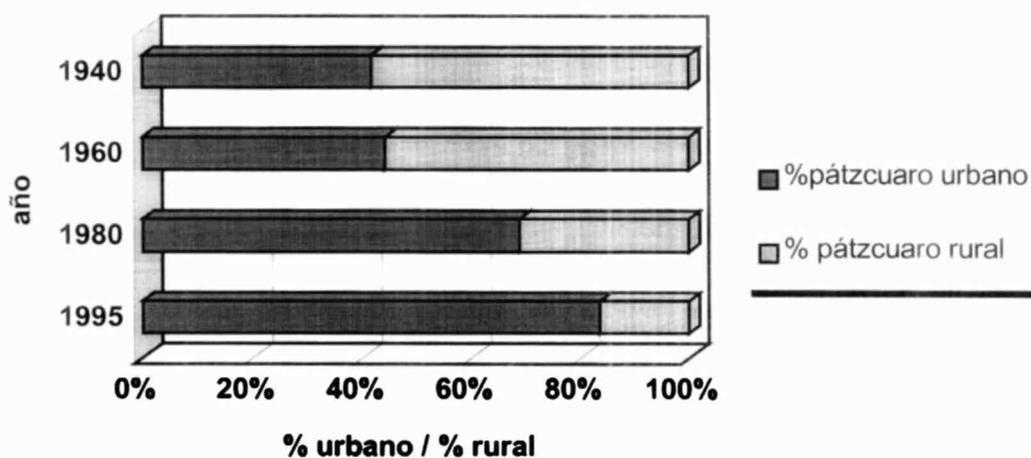
Debido a la tendencia que presentaron los municipios de Pátzcuaro y Quiroga respecto al crecimiento de su población urbana a partir de 1940, así como a la mayor velocidad del crecimiento de la población urbana de los municipios de Tzintzuntzan y Quiroga, se puede inferir que en los próximos 15 años (año 2010) la población urbana de Tzintzuntzan superará el 90% y la de Quiroga superará el 60%. De ocurrir estos cambios, la población urbana aproximada de la cuenca en el año 2010 será superior al 80%.

Cuadro 6: Porcentaje de la población rural y urbana en los municipios de la Cuenca de Pátzcuaro, 1940-1995

Municipio	1940		1960		1980		1995	
	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana
Pátzcuaro	58.3	41.7	55.8	44.2	31.2	68.8	16.45	83.55
Quiroga	65.3	34.7	57.7	42.3	18.1	81.9	9.44	90.56
Tzintzuntzan	100.0	-	100.0	-	75.0	25.0	36.86	63.14
Erongarícuaro	100.0	-	100.0	-	100.0	-	78.00	22.00

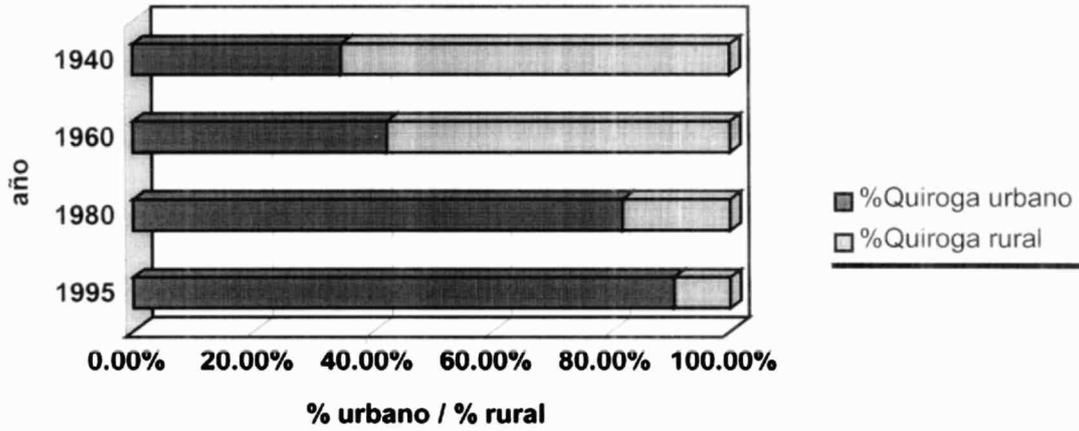
FUENTE: Censos generales de población

Gráfica 3: Dinámica urbana del municipio de Pátzcuaro 1940-1995



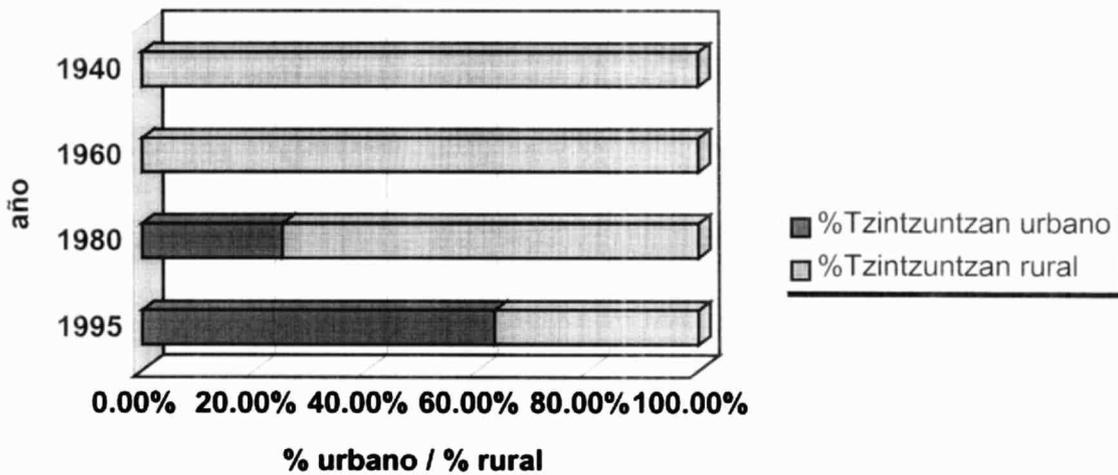
FUENTE: Censos generales de población

**Gráfica 4: Dinámica urbana del municipio de Quiroga
1940-1995**



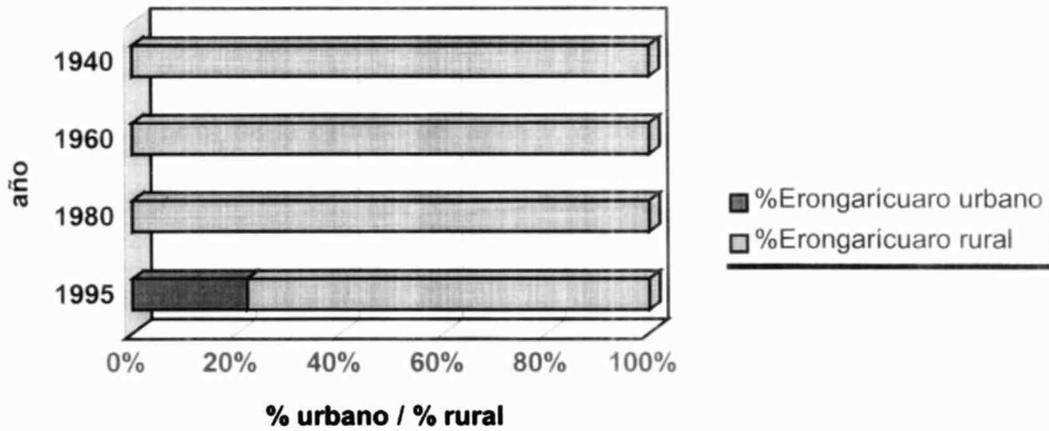
FUENTE: Censos generales de población

**Gráfica 5: Dinámica urbana del municipio de Tzintzuntzan
1940-1995**



FUENTE: Censos generales de población

Gráfica 6: Dinámica urbana del municipio de Erongarícuaro 1940-1995



FUENTE: Censos generales de población

La tendencia de la población de la cuenca a emigrar hacia los centros urbanos es, a primera vista, un problema para la salud del Lago, ya que involucra una mayor demanda de servicios urbanos y un incremento de las descargas hacia el mismo, las cuales, como se mencionó, no reciben ningún tipo de tratamiento antes de ingresar al Lago.

También es importante observar que al sumar la población de los municipios de Erongarícuaro y Tzintzuntzan obtenemos una población similar a la de Quiroga, lo que nos permite estimar las descargas que tendrán estos municipios una vez que la población de ambos alcance el grado de urbanización de la población de Quiroga.

Este último aspecto puede ser de gran utilidad al momento de planear la construcción de una planta de tratamiento para estos municipios ya que, con base en las descargas actuales de Quiroga, se pueden estimar los requerimientos técnicos de tratamiento de efluentes que necesitarán estos dos municipios en aproximadamente 15 años.

2. Dinámica físico-química del Lago

Los diversos desequilibrios presentados en los incisos anteriores han afectado una serie de características físico-químicas, las cuales brindan una valiosa información para la evaluación y control de la calidad del agua y, determinan a su vez, la dinámica actual o procesos que ocurren dentro del Lago.

Para poder entender de una mejor manera las causas y consecuencias de los cambios de estas variables físico-químicas es preciso tener una noción sobre las principales características de los Lagos, en especial, del proceso que presenta tanto el Lago de Pátzcuaro como cualquier otro Lago del mundo: la eutrofización. ►

2.1 La Eutrofización

La eutrofización representa el proceso natural de “envejecimiento” de los Lagos, es el proceso más importante que afecta Lagos y embalses de todo el mundo (Illueca 1997, De Bernardi y Giussani 1997 Forsberg 1998).

Un Lago o estanque recibe flujos de agua de la cuenca que lo rodea así como de la atmósfera. De esta manera, los efectos de acumulación de materiales arrastrados por todos los flujos de agua que llegan al Lago afectan la calidad del agua observada en la cubeta (Rast y Holland 1988).

A través de los años, un Lago se llenará lenta y naturalmente con los materiales arrastrados por las aguas que llegan a éste, convirtiéndose eventualmente en un pantano y, finalmente en un sistema terrestre. Este proceso regularmente requiere de miles de años para completarse (Rast y Holland, 1988).

En ausencia de drenajes artificiales, el crecimiento de las algas y de otras plantas acuáticas en los Lagos es mínimo y generalmente se encuentra en balance con la entrada potencial de

los nutrientes que éstas requieren -fósforo y nitrógeno principalmente- (Rast y Holland, 1988).

Los Lagos bajo eutrofización natural tienen, generalmente y durante una gran parte de su existencia, una calidad de agua adecuada para la mayoría de los usos que le da el hombre, así como una comunidad biológica diversa. Este tipo de cuerpos de agua son comúnmente descritos o considerados como “oligotróficos” (Rast y Holland, 1988) los cuales son ideales para realizar actividades recreacionales.

Las actividades humanas -drenajes vertidos, tala, desarrollo agrícola, etc.- pueden cambiar dramáticamente el proceso natural de eutrofización. Los ciclos tanto químicos como biológicos pueden romperse y el acarreo de los materiales de la superficie al cuerpo de agua puede verse fuertemente acelerado. Un aporte no deseado de nitrógeno (N) y fósforo (P) por parte de las actividades humanas (figura 1) puede estimular artificialmente el crecimiento de algas y otras plantas acuáticas hasta niveles que puedan causar que la calidad del agua se deteriore (Rast y Holland, 1998).

Lo anterior, es característico de un cuerpo de agua “eutroficado” y frecuentemente se le denomina “eutrofización cultural” con la finalidad de distinguirlo del proceso natural. De esta manera, el término “mesotrófico” describe una condición intermedia entre los dos extremos: el eutrófico y el oligotrófico (Rast y Holland, 1988).

Una consecuencia importante de la aceleración de este proceso es la reducción general de las posibilidades en el uso del agua, con lo que puede resultar seriamente comprometida la importancia de Lagos y embalses como recursos básicos para el desarrollo socio-económico (Illueca, 1997).

Un Lago eutrófico produce mucho más material vegetal que el que puede ser utilizado por los herbívoros. Este excedente se acumula en el Lago hasta que es descompuesto por las bacterias, lo que conduce a una declinación progresiva del oxígeno disuelto en los estratos

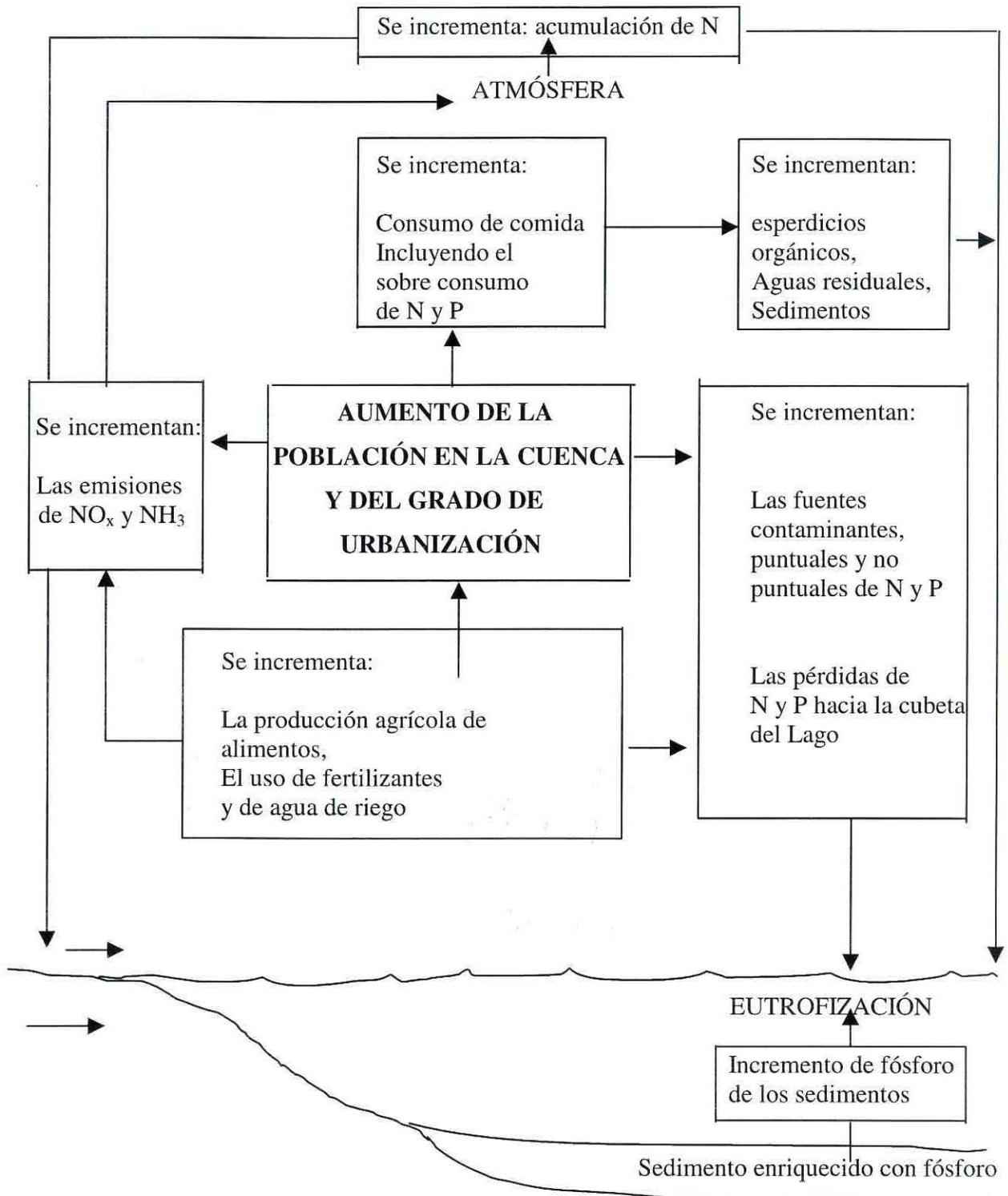
más profundos y, en casos extremos, a la anoxia y acumulación de los nutrientes liberados desde los sedimentos del fondo a estas capas profundas (Bernardi y Giussani, 1997).

Según Forsberg (1998), el desarrollo del proceso de eutrofización a gran escala es casi siempre causado por los mismos factores que son:

- El crecimiento de la población y urbanización en las áreas de desagüe.
- Incrementos en los niveles de vida y producción de alimentos mediante la utilización de fertilizantes e irrigación para la agricultura.

El Lago de Pátzcuaro ha visto incrementada la velocidad de su proceso de eutrofización a causa de estos factores, como se señala en el inciso 2.3.1. La Figura 1, es una adaptación de Forsberg (1998) y representa la importancia de los mismos en la eutrofización del Lago.

Figura 1: Factores que desarrollan y aceleran el proceso de eutrofización



De la Figura 1 es importante mencionar y aclarar los siguientes puntos:

Este esquema establece la manera en la que el crecimiento demográfico (Cuadro 5), el aumento de la producción agrícola mediante el uso de fertilizantes y el incremento del grado de urbanización de los municipios de la cuenca (Cuadro 7) afectan el balance o equilibrio natural del Lago de Pátzcuaro, provocando la eutrofización cultural del mismo.

El sobre consumo de N y P se refiere a que el consumo per-cápita de estos elementos se ha incrementado debido a dos factores principales. En primer lugar, a un aumento en el consumo de proteínas animales -de las cuales el hombre obtiene N para cubrir sus necesidades de aminoácidos- y, en segundo, a un incremento en conservadores ricos en P utilizados en alimentos y vegetales procesados. (Forsberg, 1998)

Se estima que el sobre consumo de estos nutrientes es del orden del 15-30% (Forsberg, 1998). Además, el hombre asimila el 10% o menos de lo que come, sobre todo en la edad adulta. Este excedente, al no ser consumido o absorbido por el ser humano, termina en los drenajes y posteriormente en el Lago, contribuyendo a la eutrofización del mismo.

Respecto a las pérdidas de N y P se ha comprobado que tanto la producción como el consumo de ciertos productos vegetales y/o proteínas animales pueden mostrar una dramática pérdida de N hacia el aire, las aguas subterráneas o superficiales. Por ejemplo, un estudio en Noruega comprobó que sólo el 10% del total de insumos que se utilizan para la producción agrícola primaria permanecen en los productos comestibles que llegan a la boca de los consumidores (Bleken y Bakken en Forsberg, 1998).

A manera de aclarar el cómo ocurre esta pérdida de N y P podemos tomar como ejemplo el uso de fertilizantes en la cuenca del Lago de Pátzcuaro con fines agrícolas. Cierta porcentaje de los fertilizantes utilizados -ricos en N y P- no son absorbidos por las plantas (30-40%) lo que ocasiona una pérdida de estos nutrientes, los cuales, posteriormente son arrastrados mediante las corrientes pluviales hacia la cubeta de agua, acelerando su eutrofización.

Es importante mencionar que las cantidades de fósforo que escurren de los terrenos son generalmente pequeñas debido a que el suelo retiene el fósforo eficientemente pero, por el contrario, los compuestos de nitrógeno son muy solubles y escurren en grandes cantidades (Moss, 1997).

Por su parte, las emisiones de N a la atmósfera –principalmente en forma óxidos de nitrógeno NO_x - provienen básicamente del sector transporte a través de las emisiones que éste genera. A su vez, las emisiones de amoníaco (NH_3) provienen mayormente de las granjas agrícolas y ganaderas así como del almacenamiento y uso de abonos. Esta acumulación de N y amoníaco en la atmósfera llega al Lago en forma de lluvia ácida y representa otra fuente de N hacia el Lago.

El incremento de P disuelto en el agua del Lago proveniente de los sedimentos, también llamado carga interna, es el resultado de una gran carga externa de fósforo al Lago que se fue acumulando en el fondo del mismo, es decir, en sus sedimentos.

Cuando el fósforo es añadido al Lago a través de drenajes o escurrimientos de tierras agrícolas, las algas verdes comienzan a crecer. Si a este proceso se le permite continuar, la visibilidad dentro del agua se reducirá sustancialmente y la luz solar no será capaz de penetrar dentro del agua. Como resultado todas las plantas verdes que crecen en el fondo desaparecerán eventualmente y el agua del Lago ya no será adecuada para la recreación o la pesca (Mäler, 2000).

Cuando se reduce la cantidad de plantas verdes, los sedimentos del fondo del Lago serán más vulnerables a vientos, corrientes y a los peces que se alimentan en el fondo. Como resultado el fósforo sedimentado será liberado hacia el agua y contribuirá a un crecimiento futuro de algas, generando una realimentación positiva. Entre mayor sea el stock de fósforo, mayor será la liberación del mismo (Mäler, 2000).

Finalmente, como se mencionó anteriormente, las fuentes puntuales son aquellas que están bien identificadas –drenajes urbanos, industriales - y que por tanto son más susceptibles a ser reguladas y sometidas a tratamientos purificadores, mientras que las fuentes no puntuales son todas aquellas que tienen que ver con escurrimientos, acarreo de sedimentos, acarreo de fertilizantes agrícolas, lluvia ácida, etc., lo que hace que su control directo sea muy difícil o casi imposible.

Un estudio de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1990) en el Lago estimó la aportación total de los nutrientes N y P por fuentes puntuales y no puntuales al Lago:

$$\begin{aligned}\text{Nitrógeno total} &= \text{Fuentes puntuales} + \text{fuentes no puntuales} \\ &= 126.9 \text{ Ton/año} + 298 \text{ Ton/año (estimación)} \\ &= 424.9 \text{ Ton/año (estimación)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Fósforo total} &= \text{Fuentes puntuales} + \text{fuentes no puntuales} \\ &= 40.82 \text{ Ton/año} + 17.4 \text{ Ton/año (estimación)} \\ &= 58.22 \text{ Ton/año (estimación)}\end{aligned}$$

Como lo señalan estos resultados, las fuentes puntuales son aparentemente responsables de aportar el 30% del nitrógeno total que ingresa la Lago anualmente, así mismo, el 70% del total de fósforo que llega al Lago proviene de este tipo de fuentes.

Las fuentes puntuales evaluadas en los estudios sobre calidad del agua (Muñoz 1981, CNA 1990, Toledo, 1992) corresponden en su mayoría a las descargas de aguas residuales de los municipios colindantes al Lago, debido a que las corrientes naturales hacia el Lago presentan flujos intermitentes a excepción del río Zurumutaro o Dren Chapultepec, por lo que sólo éste es evaluado. Así mismo, la única descarga al Lago considerada como industrial proviene de la procesadora de pescado Propemex que cuenta con una pequeña planta de tratamiento, procesadora que, en la actualidad, opera estacionalmente.

Por lo anterior, podemos establecer que las fuentes puntuales en el Lago de Pátzcuaro corresponden en un gran porcentaje a las aguas residuales municipales, las cuales provienen de los centros urbanos o cabeceras municipales que cuentan con sistemas de drenaje y alcantarillado. Por lo tanto, el 70% del fósforo que ingresa al Lago y el 30% del nitrógeno proviene, en su gran mayoría, de las localidades que tienen este tipo de infraestructura sanitaria. Chacón (1993) menciona al respecto que el 61.1% de las cargas de fósforo que ingresan al Lago son de origen urbano.

Es importante aclarar que un cuerpo de agua bajo eutrofización cultural puede ser tratado para volver a tener la calidad de agua que presentaría en su proceso de eutrofización natural; Sin embargo, esta condición deseada puede resultar tanto costosa como difícil de administrar (Rast y Holland, 1988).

2.2 Resistencia de los Lagos a la contaminación y a su restauración

Los Lagos poseen una característica de vital importancia para la conservación de su calidad de agua: la capacidad buffer o reguladora, que es la capacidad de los Lagos de resistir la presencia de cierto nivel de contaminantes o exceso de nutrientes: “Sin embargo, esta capacidad buffer es limitada y la aparición de un problema puede ocurrir en un período de tiempo relativamente corto, mientras que el vertido de contaminantes al Lago ha sido efectuado durante períodos considerablemente mayores.” (Jorgensen y Vollenweider, 1997). Revisar fecha

Esto nos indica que, a cierto nivel, la habilidad de los sedimentos para acumular contaminantes (capacidad buffer), se extingue, por lo que la entrada “normal” de contaminantes al cuerpo de agua provocará, una vez rebasada dicha capacidad, cambios súbitos en las condiciones del Lago, generando creencias erróneas como, por ejemplo, la existencia de un nuevo contaminante vertido al cuerpo de agua cuando, en realidad, el problema pudo haber comenzado varios años atrás.

Lo anterior, establece la necesidad de ejercer acciones de regulación antes de que el problema surja verdaderamente, ya que la eutrofización y la oligotrofización de un ambiente lacustre no se produce de acuerdo a una relación lineal entre la carga de nutrientes y la biomasa vegetal, sino más bien exhibe una tendencia con retardo. Los sistemas biológicos muestran una marcada resistencia a la variación, tanto cuando hay incremento en la carga de nutrientes como cuando hay una reducción. Esta no linealidad de la respuesta es mucho más acentuada en los ambientes pequeños y poco profundos (como es el caso del Lago de Pátzcuaro), a cuenta de la considerable importancia que tienen las cargas internas de ellos. Una comunidad eutrófica típica tiende a mantener su identidad contrarrestando los intentos de purificación (Bernardi y Giussani, 1997)

Las acciones de restauración emprendidas, antes o después de superar la capacidad buffer, no van a reflejar los resultados esperados de una manera rápida y mucho menos inmediata debido a esta no linealidad o resistencia de los ecosistemas. Esto es importante, porque se vuelve necesario tener presente esta característica para saber que una política de carácter restaurativo –reducción de nutrientes vertidos- está cumpliendo sus objetivos aunque esto no se refleje en el corto plazo.

2.3 Parámetros físico-químicos

Existe un conjunto de variables o parámetros que la Ecología Acuática y la Ingeniería Sanitaria han venido considerando y complementando a través de los años para la evaluación y control de la calidad del agua. Éstos brindan una noción más clara sobre el estado del cuerpo de agua y los usos que se le pueden dar al mismo, estableciendo rangos bajo los cuales la calidad del agua es o no adecuada para realizar diferentes tipos de actividades.

Para entender el comportamiento de los parámetros físico-químicos que se presentan a continuación es necesario conocer algunos aspectos relacionados con el metabolismo del Lago. En primer lugar, su comportamiento es el de un Lago ininterrumpidamente mezclado, debido a que los vientos y corrientes tienen una gran influencia en el cuerpo de

agua por su poca profundidad. A este comportamiento se le denota como de tipo polimético, que significa que no existen grandes cambios en los niveles de oxígeno disuelto o de temperatura entre la superficie y el fondo de Lago.

En segundo lugar, está el nutriente limitante de la productividad del Lago de Pátzcuaro². Al respecto, la CNA (1990) reportó una relación N:P de 8:1 lo que demuestra, según la regla aproximada que menciona Moss (1997)³, que el nutriente limitante de la vida o productividad del Lago es el nitrógeno.

En tercer lugar está el tiempo de retención del Lago el cual, según lo calculado por la CNA (1990), es de 13.9 años. Este aspecto es muy importante debido a que: "...un sistema lacustre con un tiempo de retención más lento será más susceptible a la eutrofización, a las sustancias tóxicas y a los cambios de pH, en relación a una carga dada, que otro con tiempo de retención más rápido." (Jorgensen, 1997). Esto nos indica lo susceptible que es el Lago de Pátzcuaro a eutroficarse pues su carácter endorreico determina un tiempo de retención muy largo.

Una vez descritos los procesos que se presentan en el Lago, así como la manera en la que el aumento de la población de cuenca y el grado de urbanización de la misma se relacionan con la eutrofización cultural del Lago de Pátzcuaro, es posible intentar determinar el peso que éstos factores han tenido en el deterioro del Lago.

Los parámetros utilizados para determinar la calidad del agua en el Lago de Pátzcuaro han variado desde que comenzaron los estudios dentro de éste⁴. Las únicas variables con las que se cuenta desde 1938 corresponden a la transparencia, el potencial de hidrógeno (pH) y el oxígeno disuelto. A causa de esta limitante, sólo se tomarán estos tres parámetros, debido a que lo que se pretende es observar la influencia del crecimiento de la población y de su

² Jorgensen y Vollenweider (1996) señalan que el nitrógeno y el fósforo o una combinación de ambos son los nutrientes limitantes de la productividad de los Lagos.

³ Esta regla indica que si la relación N:P en peso es mucho mayor que 10, el Lago estará limitado por el fósforo y, si es menor que 10, el Lago estará limitado por el nitrógeno

⁴ Los estudios formales comenzaron a partir de la fundación de la primera estación hidrobiológica en México (1939), situada a orillas del Lago de Pátzcuaro y que actualmente se conoce como CRIP (Centro Regional de Investigaciones Pesqueras) (Banderas y González, 2000)

grado de urbanización en el deterioro de la calidad del agua del Lago a través del tiempo, relación que exige el mayor número de datos posible.

2.3.1 La Transparencia

La transparencia⁵ es un parámetro utilizado en la mayoría de los índices de estado trófico. Sin embargo como se estableció en el inciso anterior, la determinación del estado trófico de un Lago no depende únicamente de sus parámetros físico-químicos: “Los índices de estado trófico deben ser interpretados exclusivamente como indicadores y no deben ser utilizados para definir un estado trófico de un Lago en particular ya que éste último es un concepto más complejo”. (Chacón, 1993)

El Cuadro 7 presenta los niveles de transparencia máximos y mínimos reportados en el Lago desde 1937. La mayor transparencia reportada corresponde a la establecida por Ueno (1939 en Banderas, A. Y R. González-Villela, 2000. Calidad del agua. En IMTA-CNA (2000): Diagnóstico Ambiental del Lago de Pátzcuaro. 1^a Etapa. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Comisión Nacional del Agua. México. Cap. 5) quien obtuvo, en 1937, una transparencia máxima de 5.4 metros. Sin embargo este dato parece reflejar una incorrecta metodología durante su realización, ya que duplica el nivel de transparencia máxima reportada un año después.

⁵ La transparencia es determinada por la visibilidad del disco de Secchi

Cuadro 7: Transparencia en el Lago de Pátzcuaro 1937-2000 (metros)

AÑO	MÍN.	MÁX.
1937 ^U	0.50	5.4
1938 ^Y	2.2	2.4
1944 ^B	1.08	1.96
1976 ^{TyM}	-	1.64
1981 ^{MZ}	-	1.18
1990 ^{PM}	0.27	0.62
1993 ^{CH}	0.1	0.5
2000 ^{BG}	0.2	0.3

Fuente: Banderas y González (2000)

U: Ueno (1939) en IMTA 2000

Y: Yamashita (1939) en IMTA 2000

B: De Buen (1940) en Banderas (2000)

TyM: Téllez y Motte (1976) en IMTA 2000

MZ: Mazari (1981) y Velasco (1982) en IMTA 2000

CH: Chacón (1992) en IMTA 2000

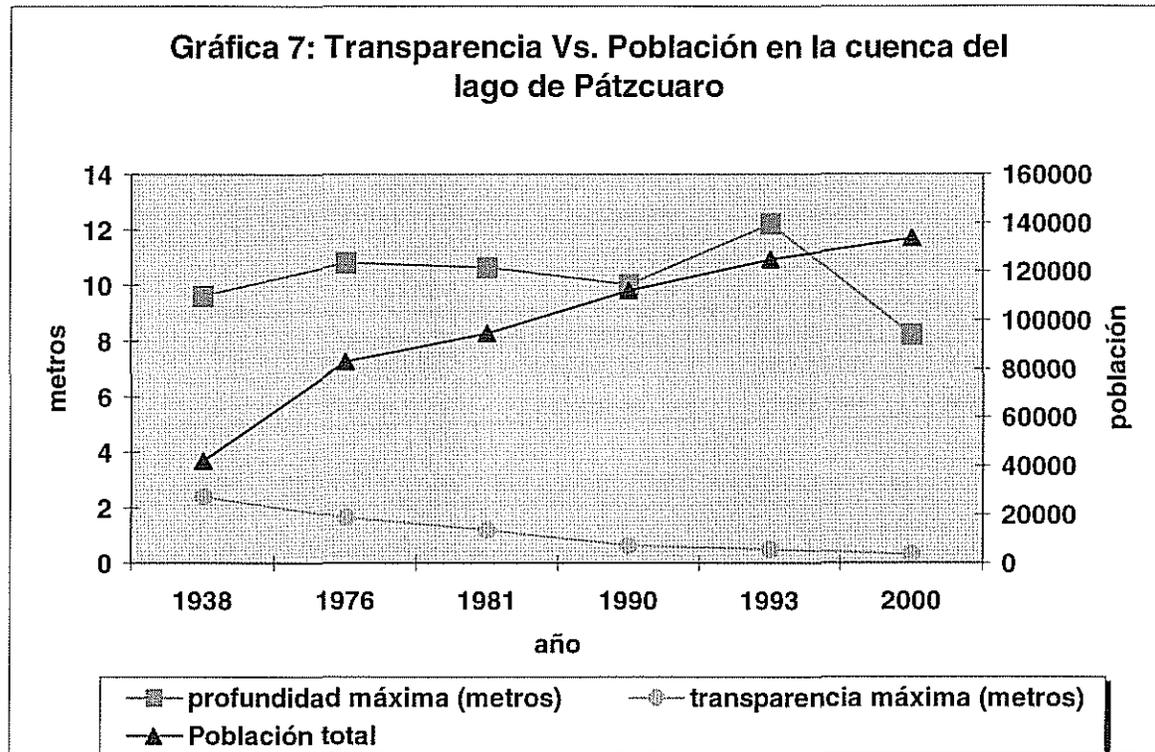
PM: Planas y Moreau (1990) en IMTA 2000

BG: Banderas y González (2000)

Como se aprecia en el Cuadro 7, la transparencia del Lago de Pátzcuaro ha presentado una tendencia decreciente. Los datos de esta tabla se utilizaron para elaborar la Gráfica 7 donde se muestra la transparencia máxima, el crecimiento de la población de la cuenca y la profundidad máxima del Lago reportada desde 1938.

Se graficó la profundidad máxima para saber si esta variable tiene influencia sobre la transparencia del Lago, es decir, para comprobar, como podría pensarse, que a mayor

profundidad del Lago mayor transparencia del mismo pues existiría mayor volumen de agua para diluir las partículas orgánicas e inorgánicas en suspensión.



La Gráfica 7 establece que existe una relación negativa entre el crecimiento de la población de la cuenca y la transparencia del Lago. Para determinar la relación entre la transparencia (disco de Secchi) y el aumento de la población de la cuenca se ajustó una función de regresión lineal donde la transparencia es la variable dependiente y el aumento de la población de la cuenca la variable independiente, se obtuvo el siguiente resultado (Cuadro 7-A):

Cuadro 7-A: Resultados de la Regresión

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.99096974
Coefficiente de determinación R ²	0.98202104
R ² ajustado	0.97752629
Error típico	0.12026918
Observaciones	6

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	3.16027463	3.16027463	218.482218	0.00012195
Residuos	4	0.05785871	0.01446468		
Total	5	3.21813333			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>
Intercepción	3.45666459	0.16639529	20.7738131	3.1725E-05	2.99467625
Variable X 1	-2.3891E-05	1.6163E-06	-14.781144	0.00012195	-2.8379E-05

Un coeficiente β de -0.0000238 donde el signo negativo confirma la relación inversa entre ambas variables y el valor de β indica la pendiente, es decir, por cada 1,000 habitantes más en la cuenca la transparencia disminuye 0.0238 metros (2.3 cm).

Este coeficiente también nos permite estimar la transparencia del Lago de Pátzcuaro en los años 2005 y 2010. Sustituyendo los valores de población estimados (INEGI, 1990) obtenemos (manteniendo todo lo demás constante) que la transparencia para el año 2005 será de 0.15 metros y para el año 2010 será de 0.08 metros (8 cm). Esto señala la necesidad de acciones que puedan restaurar el ecosistema en el menor tiempo posible debido a que en un horizonte de tiempo bastante corto (10 años) el deterioro del Lago sería inminente y las acciones necesarias para su restauración resultarán más costosas que las requeridas en la actualidad.

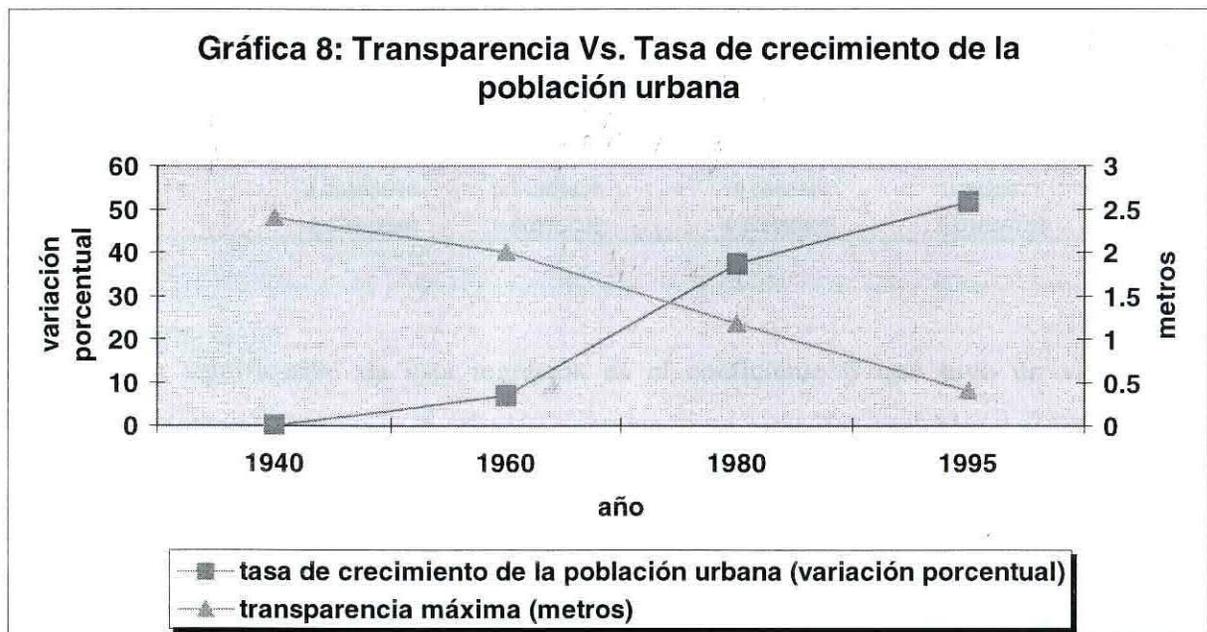
La intersección de la recta de regresión es igual a 3.4, valor que es una estimación de la visibilidad del disco de Secchi para una población mínima (o cero). Podemos definir entonces que la visibilidad natural (sin población) de la cuenca sería de 3.4 metros. Este

dato es de gran importancia al considerar la restauración del Lago debido a que, como lo plantea Moller (2000) una política que tenga como objetivo lograr una visibilidad superior a la natural no sólo resultaría excesivamente costosa, sino que también tendra consecuencias negativas en el ecosistema lacustre.

La R^2 ajustada del modelo es de 0.97 lo que nos indica que el cambio en el número de habitantes de la cuenca se reflejara en un 97% la tendencia en la transparencia que presenta el Lago de acuerdo al coeficiente mencionado y siguiendo una relaci3n inversa.

Esta situaci3n refleja c3mo el crecimiento demográfico (Figura 1) acelera la eutrofizaci3n del Lago de Pátzcuaro. Así mismo, la Gráfica 7 muestra que no existe una relaci3n clara entre la profundidad del Lago y su transparencia como se esperaba.

Por su parte, la Gráfica 8 muestra la tasa de crecimiento promedio de la poblaci3n urbana de la cuenca de 1940 a 1995 y la relaci3n de ésta con la transparencia del Lago. Nuevamente, se aprecia la relaci3n negativa que tiene el grado de urbanizaci3n de la poblaci3n de la cuenca en la transparencia del Lago.



De la misma manera, para esta relación se realizó un análisis de regresión que también resultó significativo según las pruebas estadísticas. Desafortunadamente, debido a los pocos datos disponibles, la tasa de crecimiento de la población urbana en 1940 se tomó como cero, luego entonces la transparencia con población urbana cero es igual al dato con el que contamos para ese año, es decir, 2.4 metros. Esto quiere decir que no es posible estimar un valor de visibilidad sin población urbana, como se hizo para la población de la cuenca.

Los resultados de la regresión se presentan en el Cuadro 7-B:

Cuadro 7-B: Resultados de la Regresión

<i>Estadísticas de la regresión</i>					
Coefficiente de correlación múltiple		0.98934202			
Coefficiente de determinación R ²		0.97879764			
R ² ajustado		0.96819646			
Error típico		0.15858493			
Observaciones		4			

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	2.32200164	2.32200164	92.3291206	0.01065798
Residuos	2	0.05029836	0.02514918		
Total	3	2.3723			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%
Intercepción	2.35465698	0.11954656	19.6965684	0.0025677	1.8402893
Variable X 1	-0.03584301	0.00373023	-9.60880433	0.01065798	-0.05189289

Entonces, lo significativo de esta regresión es el coeficiente β que tuvo un valor de -0.0358 , el signo nos confirma la relación negativa entre estas dos variables y el valor nos indica que cada que la población urbana de la cuenca crezca en promedio 10% la visibilidad dentro del Lago disminuirá en 0.35 metros (35 cm).

Si consideramos la estimación realizada en el inciso 1.3 donde la población urbana de cuenca en el año 2010 será superior al 80% y realizando el cálculo de la tasa de crecimiento

promedio según dichas estimaciones, obtenemos que ésta se incrementaría en un 8.18% lo que disminuiría la transparencia en 28cm.

Como el modelo se realizó con datos de transparencia máxima, obtenemos que para el año 2010 la visibilidad en el Lago sería de 2 cm. Esto es, 6 cm menos que lo estimado con el modelo de población.

2.3.2 Oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno (pH)

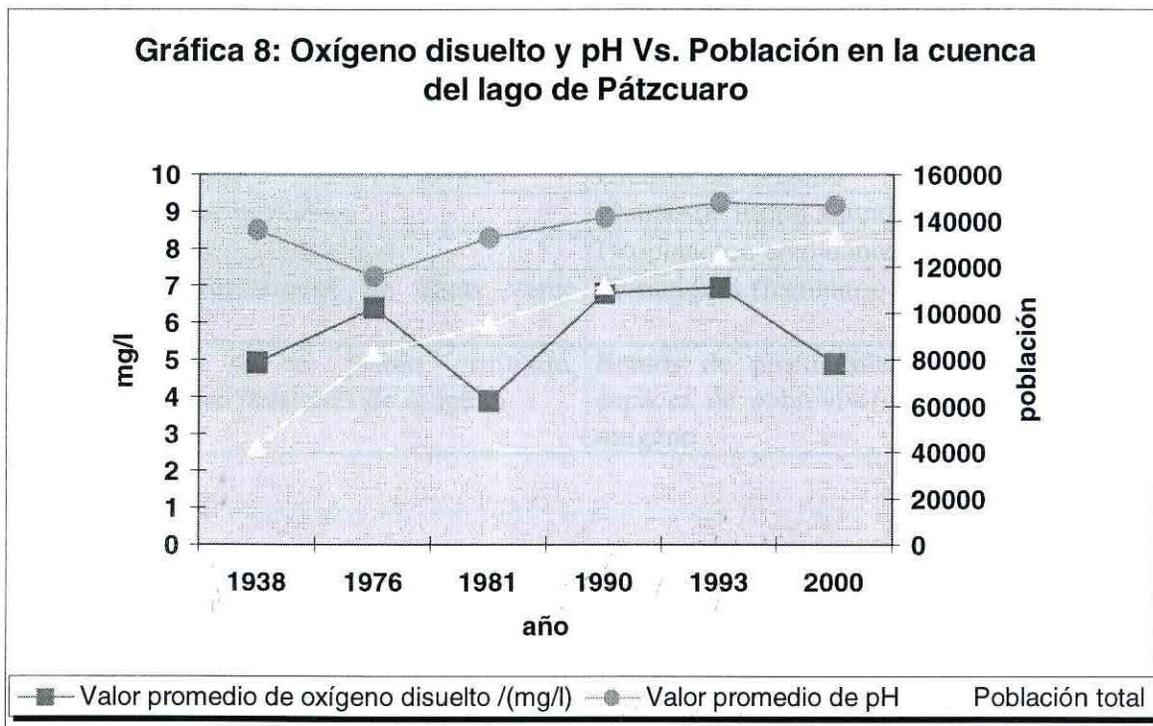
El oxígeno disuelto delimita las posibilidades de desarrollo de organismos aerobios y anaerobios. Expresa el grado de actividad física, química y biológica del agua (Muñoz, 1981). Se considera que el mínimo oxígeno disuelto requerido para la propagación de las diferentes especies de peces así como el crecimiento de la fauna acuática silvestre es de 4 a 6 mg/l. En este sentido los estudios mencionados sobre el Lago establecen que, cerca de las estaciones de muestreo correspondientes a las descargas residuales, se tienen bajos niveles de este parámetro pero, como se mencionó anteriormente, la característica del Lago de Pátzcuaro de estar ininterrumpidamente mezclado origina que (como se muestra en la gráfica 8) el nivel de oxígeno disuelto no presente una tendencia decreciente como se esperaba además de no generar condiciones de anoxia en el Lago.

La relación entre el crecimiento de la población de la cuenca y el nivel promedio de oxígeno disuelto del Lago (gráfica 8) no es clara porque el oxígeno disuelto no se distribuye igual en toda la columna de agua (de la superficie hasta el fondo) ni a lo largo y ancho del Lago (por la presencia de descargas de agua residual) a pesar de que está continuamente mezclado. Al respecto se requiere un estudio más fino sobre el balance de oxígeno en 24 horas.

El pH es un indicador elemental para evaluar la actividad de los iones de hidrógeno en una sustancia. Está asociado directamente a la calidad del agua y/o contaminación (Muñoz, 1981). Los valores de pH considerados adecuados para agua de bebida mediante desinfección se encuentran dentro del rango de 6.5 a 8.5. Valores superiores a 8.5

comienzan a requerir métodos de tratamiento más complejos, mientras que valores superiores a 9.0 se consideran únicamente aptos para usos industriales.

Nuevamente los procesos de mezclado que ocurren en el Lago “amortiguan” los valores de pH en el agua, no obstante, este parámetro muestra una tendencia creciente al igual que la población de la cuenca, superando desde 1993 el valor de 9, lo que implica que el agua no es apta para la conservación de la flora y fauna del Lago o para fines recreativos (Muñoz, 1981).



2.4 Estado trófico del Lago de Pátzcuaro

Existen diversos estudios enfocados a evaluar el grado trófico del Lago de Pátzcuaro (Muñoz 1981, Velasco 1982, CNA 1990, Chacón 1993) Estos estudios establecen que el Lago se encuentra en un estado mesotrófico-eutrófico, aunque los dos análisis más

recientes (CNA y Chacón) señalan que la zona norte del Lago comienza a tener características eutróficas-hipertróficas⁶.

Así mismo, Overbeck (1996) resume los aspectos contrastantes de Lagos oligotróficos y eutróficos (cuadro 8) y aclara que los Lagos de todas las regiones del mundo pueden clasificarse con base en la productividad de acuerdo a la serie oligotrófica-eutrófica.

Cuadro 8: Aspectos contrastantes de Lagos oligotróficos y eutróficos

Oligotróficos	Eutróficos
Profundos y con bancos escarpados	Poco profundos, amplia zona litoral.
Elevada transparencia	Transparencia limitada
Agua pobre en nutrientes para plantas	Nutrientes para plantas abundantes
Sedimentos con poca materia orgánica	Sedimentos profundos con excrementos orgánicos.
Oxígeno abundante en todos los niveles	Escasez de oxígeno
Plantas del litoral limitadas	Plantas de litoral abundantes
Fitoplancton pobre en cantidad	Fitoplancton abundante
Ausencia de floraciones de algas verde azules	Floraciones frecuentes
Fauna diversa en el fondo profundo, intolerante a bajas tensiones de oxígeno	Bentos de profundidad pobre en especies capaces de sobrevivir con bajos tenores de oxígeno

La manera en la que el Lago de Pátzcuaro ha sido evaluado a lo largo de este trabajo nos permite clasificarlo como un Lago eutrófico ya que, como se fue señalando, cumple con todos las características del listado propuesto por Overbeck (1996).

⁶ El término hipertrófico es tomado de una clasificación propuesta por Vollenweider (1983) quien divide el nivel trófico de un Lago en cinco categorías que van de la mejor a la peor calidad del agua: ultra-oligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipertrófico.

3 Planificación para una mejor calidad del agua en el Lago de Pátzcuaro

Una vez descritos los principales procesos que se desarrollan en el Lago de Pátzcuaro y su entorno y el efecto de los mismos en el deterioro de la calidad del agua que presenta actualmente este sistema lacustre, se vuelve necesario buscar las soluciones más rápidas, más convenientes y empíricamente mejor fundamentadas con el fin de reducir, en la medida de lo posible, la carga exógena de nutrientes al cuerpo de agua y prolongar al máximo la vida del Lago.

Para este fin, se consultaron diferentes documentos que establecen una serie de directrices para la gestión de Lagos con base en las investigaciones de especialistas de todo el mundo así como en diversos casos de estudio de sistemas acuáticos con problemas avanzados de eutrofización como el Lago Candia en Italia (Giussani y Galanti, 1997), el Lago Zwemlust en los Países Bajos (Gulati, 1997), el Lago Balaton en Hungría (Tátrai, 1997), el Lago Kinneret en Isreal (Gophen, 1997), entre otros.

3.1 Impacto de las actividades humanas en la calidad del agua de los Lagos a nivel mundial

Los Lagos poco profundos de todo el mundo sufren la amenaza de una variedad de impactos humanos que incluyen (Löffler, 1997):

- Cambios morfométricos e hidrológicos, que abarca el uso para riego del agua de los tributarios al Lago, el incremento de la sedimentación y la utilización de los Lagos como lugares de disposición final de los residuos de las actividades humanas;
- Eutrofización, que propicia cambios importantes en la vegetación y en la fauna litoral y pelágica disminuyendo la calidad del agua del Lago y por tanto sus posibles usos, con lo que puede resultar seriamente comprometida la importancia de los Lagos como recursos básicos para el desarrollo socio-económico.

- Contaminación por sustancias tóxicas y otros materiales como gasolinas, pesticidas y otros compuestos orgánicos e inorgánicos incluyendo la acidificación vía industrias o lluvia ácida;
- Calentamiento o enfriamiento, fenómeno provocado principalmente por plantas de generación termoeléctrica que, al utilizar a los Lagos como receptores del vapor de agua resultante de su operación, cambian la temperatura de los mismos ocasionando, como respuesta general de la comunidad litoral al calentamiento, un aumento de la biomasa y una disminución de la diversidad de especies dentro del Lago.
- Introducción de especies exóticas. La principal consecuencia de este tipo de acciones son los efectos que se generan sobre la fauna de peces endémica, debido a que la mayoría de los Lagos, por sus características tan particulares de profundidad temperatura, latitud, etc., cuentan con especies de peces exclusivas a nivel regional o mundial y, al introducirse especies exóticas se reduce la cantidad de especies endémicas, pues compiten entre ellas por el mismo espacio.

A su vez, Vollenweider (1997) resume las causas de estos impactos, mencionando seis principales:

1. Descarga de residuos orgánicos biodegradables
2. Descarga de nutrientes a partir de aguas residuales crudas o tratadas
3. Contaminación no puntual por nutrientes, principalmente a partir de la agricultura
4. Lluvias ácidas (producidas por contaminantes atmosféricos: SO_2 y NO_x)
5. Descarga de sustancias tóxicas a partir de la industria y la agricultura
6. Descargas térmicas

De esta serie de impactos causados por el hombre en los Lagos de todo el mundo, el Lago de Pátzcuaro se ve afectado por cada uno de ellos, excepto por el calentamiento o enfriamiento vía plantas termoeléctricas, aunque todo parece indicar que esta excepción se debe a la suerte de no contar con una planta de este tipo en las cercanías del Lago.

Así mismo y como se ha venido observando, el origen de estos impactos humanos en el deterioro de la calidad del agua del Lago de Pátzcuaro proviene básicamente de las mismas causas resumidas por Vollenweider (1997).

Esta similitud tanto en los problemas como en la causa de los mismos entre los Lagos del mundo y el Lago de Pátzcuaro, nos permite establecer que las soluciones planteadas por los documentos de gestión mundial, son viables en nuestro caso de estudio.

3.2 Métodos mundiales de restauración de Lagos

La mayoría de las soluciones diseñadas por los expertos están enfocadas a reducir la eutrofización, por ser considerada: "...la causa más importante del deterioro de los ambientes lacustres" (Bernardi y Giussani, 1997). Históricamente, la forma de evitar que este proceso erosione la calidad del medio ambiente así como la manera de rehabilitar los ambientes de agua dulce una vez eutrofizados, fue gestionar el control y la reducción del ingreso de nutrientes. Este costoso proceso es necesario sin lugar a dudas en muchos casos, pero no produce necesariamente la mejora esperada en un tiempo razonable, debido a la resistencia propia del ecosistema (Illueca, 1997; Mäler, 2000).

Los métodos convencionales de purificación o de reducción de nutrientes (plantas de tratamiento) no son, en muchos casos, la mejor o única manera de intervenir en la rehabilitación de un sistema lacustre debido a que el saneamiento del mismo es muy lento, aparte de ser poco viables económicamente tanto en su construcción como en su operación y mantenimiento.

Por esta razón, las estrategias mundiales de gestión de Lagos consideran, entre otras cosas, la aplicación de métodos de restauración –llamados asimismo ecotecnología- que intentan llevar de vuelta al Lago, lo más rápidamente posible, a un "equilibrio de problemas reducidos" (Jorgensen y Vollenweider, 1997)

Estas ecotecnologías comenzaron a desarrollarse y ensayarse a escalas reales con la finalidad de volverse soluciones alternas (científicamente válidas) a la solución propuesta

por la ingeniería de reducir de carga de nutrientes. De este conjunto de soluciones, la biomanipulación de las cadenas alimenticias acuáticas es una de las más prometedoras (Illueca, 1997).

3.2.1 La biomanipulación

La biomanipulación comenzó a finales de los años cincuenta y es un tipo de ingeniería biológica que intenta restaurar el ecosistema lacustre mediante la utilización de la biología al mismo tiempo o en lugar de los procesos de reducción de nutrientes, con la finalidad de limitar la producción de algas en el cuerpo de agua (Moss et al., 1991 en Kasprzak, 1997).

El término biomanipulación implica control biológico en la restauración o mejoramiento de un Lago donde, cambios relativamente pequeños en las relaciones biológicas producen cambios favorables en el mismo. De esta manera, los cambios producidos en la red alimenticia permiten que los procesos naturales se hagan cargo y ayuden a producir los mejoramientos deseados en la calidad del agua (Gulati, 1997).

La estrategia de este método consiste principalmente en regular el impacto de los peces planctívoros mediante su reducción o remoción total, a través de procesos de envenenamiento selectivo o la introducción de peces piscívoros, todo con el fin de controlar la comunidad de algas por medio de los consumidores de las mismas, en lugar de por los nutrientes que ingresan al Lago como lo consiguen los métodos de ingeniería en un periodo de tiempo más largo. “La respuesta del nivel trófico de los Lagos a tales medidas se llama efecto de arriba hacia abajo o en cascada dentro de la cadena alimentaria” (Carpenter et al., 1985 en Gulati, 1997).

En sus inicios, la biomanipulación causó un gran entusiasmo pues presentaba una solución simple al complejo problema de la eutrofización; sin embargo, los primeros intentos de este tipo presentaron diversos problemas como la estabilidad del sistema lacustre en el largo plazo, lo que reflejó que la aplicación de este método no era tan simple como originalmente se pensó (Kasprzak, 1997).

Recientemente, se han desarrollado diversos experimentos que aplican poco a poco las técnicas de la biomanipulación con el fin de tener la capacidad de modificar, durante todo el proceso, la intensidad y dirección de la intervención. Esta aplicación gradual de los procesos involucrados en la biomanipulación limita su campo de acción ya que se requiere, además de un profundo conocimiento ecológico, que los Lagos a intervenir sean susceptibles a este tipo de manejo.

3.2.2 Los humedales

Existe otro tipo de ecotecnología que consiste en conservar y fomentar uno de los mecanismos de defensa naturales de los Lagos que son las tierras pantanosas a lo largo de la zona litoral al Lago, las cuales son conocidas como humedales.

En este tipo de tierras crece una variedad de plantas acuáticas nombradas en general como macrófitas, que tienen la característica de absorber grandes cantidades de N y P durante su crecimiento, además de servir como refugio durante la gestación y crecimiento de algunas de las especies que habitan el Lago.

Otros aspectos importantes de las macrófitas es que forman una barrera natural que sirve para aminorar o detener la cantidad de sedimentos que arrastran las corrientes pluviales al Lago y, en diferentes partes del mundo (China, Sur de Asia, Iran, Irak, Lago Chad, Lago Titicaca, entre otras), el hombre utiliza esta variedad de plantas como alimento, para techar, para hacer esteras y para la construcción de balsas (Löffler, 1997).

Desafortunadamente, las actividades ganaderas dentro de la cuenca pueden provocar la pérdida completa de la vegetación litoral mediante el pisoteo y consumo de las macrófitas emergentes por parte del ganado (Löffler, 1997). Así mismo, las actividades del hombre dentro del Lago, principalmente la pesca, afectan la cantidad de macrófitas disponibles en la zona litoral, ya que éstas son removidas para que las redes que se utilizan no se atoren en las mismas.

La estrategia de esta ecotecnología consiste en fomentar el crecimiento de las macrófitas a lo largo de las riberas de los tributarios al Lago, con la finalidad de que éstas sirvan como trampa para los sedimentos y para los nutrientes provenientes de fuentes puntuales y no puntuales.

La posibilidad que brinda este procedimiento de retener nutrientes provenientes de fuentes puntuales puede reducir los requerimientos de tratamientos avanzados y por tanto costosos de los efluentes de las plantas de tratamiento.

Por su parte, la capacidad que tiene este método de controlar el acceso de nutrientes y sedimentos al Lago provenientes de fuentes no puntuales es de gran utilidad al momento de emprender acciones de restauración pues limita la entrada de nutrientes y sedimentos sobre los cuales el hombre tiene muy poco o nada de control.

3.3 Estrategias de gestión de los Lagos

Como se ha venido explicando, los Lagos son influenciados por las actividades o procesos que ocurren dentro de su cuenca y, a su vez, los procesos y/o cambios que ocurren en el cuerpo de agua afectan las condiciones de la cuenca que lo rodea (vía balance hidrológico) y determinan las actividades humanas que se pueden realizar en su entorno (vía calidad del agua), es decir, los Lagos son sistemas complejos que requieren de estrategias de gestión que analicen al Lago como un todo, relacionando, en todo momento a éste con el ambiente que lo rodea.

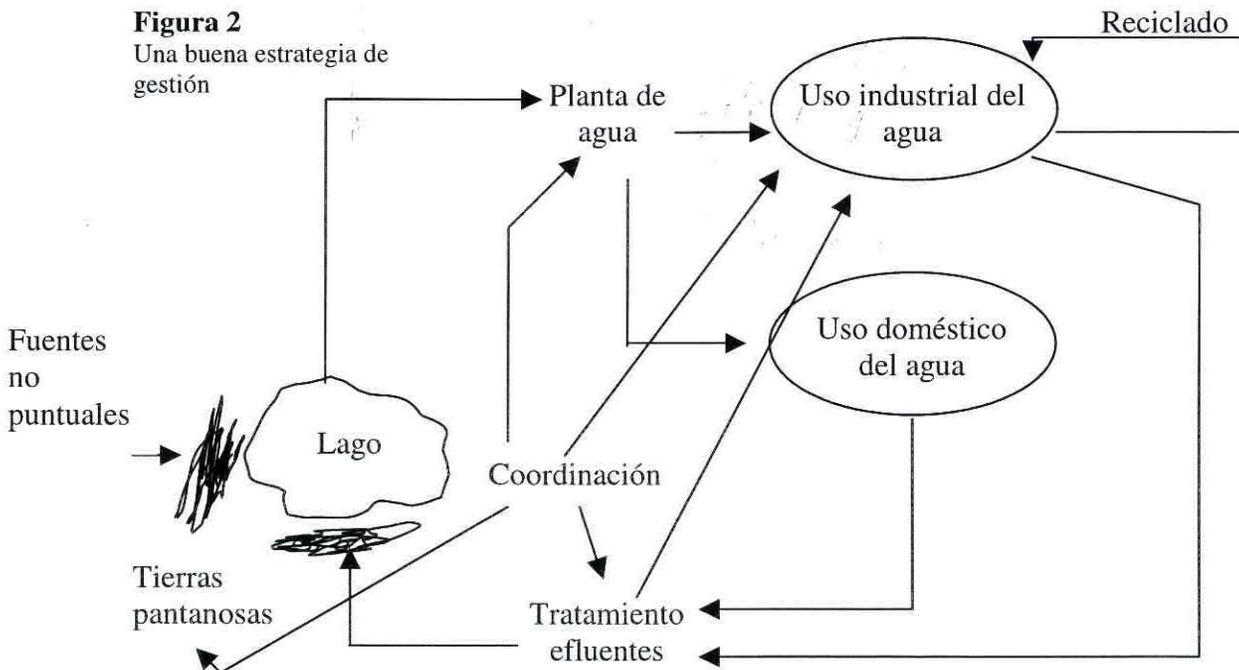
Las figuras 2 y 3 ilustran lo que Jorgensen y Vollenweider (1997) denotan como ejemplos de una buena y una mala estrategia de gestión, respectivamente.

La figura 2 refleja las interrelaciones necesarias para llevar a cabo una buena estrategia de gestión. En primer lugar, los efluentes de la planta de agua son divididos, de esta manera, el flujo del agua sometido a un proceso de potabilización es dirigido únicamente a los hogares mientras que el flujo sometido a procesos de purificación menos complejos y por tanto menos costosos (tratamientos parciales) es dirigido a las industrias.

En segundo lugar, existe una coordinación que se encarga de reducir costos y procesos a lo largo de todo el sistema. Esta coordinación sirve enlace entre todas las actividades que involucran la utilización del agua del Lago, por ejemplo, mediante asesorías a las industrias para que puedan reciclar parte del agua que utilizan o para que éstas utilicen directamente el agua proveniente de los efluentes de las plantas de tratamiento evitando así, que una parte de éstos se descargue al Lago.

Es importante señalar que esta coordinación toma en cuenta el aporte de nutrientes a Lago por parte de las actividades agrícolas, ya que mantiene a las tierras anegadizas a lo largo de las riberas de los tributarios (humedales) de manera que actúen como trampa para los nutrientes provenientes de fuentes no puntuales, con lo que se reducirán los requerimientos de tratamientos avanzados de tratamiento y potabilización de agua (Jorgensen y Vollenweider, 1997).

Figura 2
Una buena estrategia de gestión



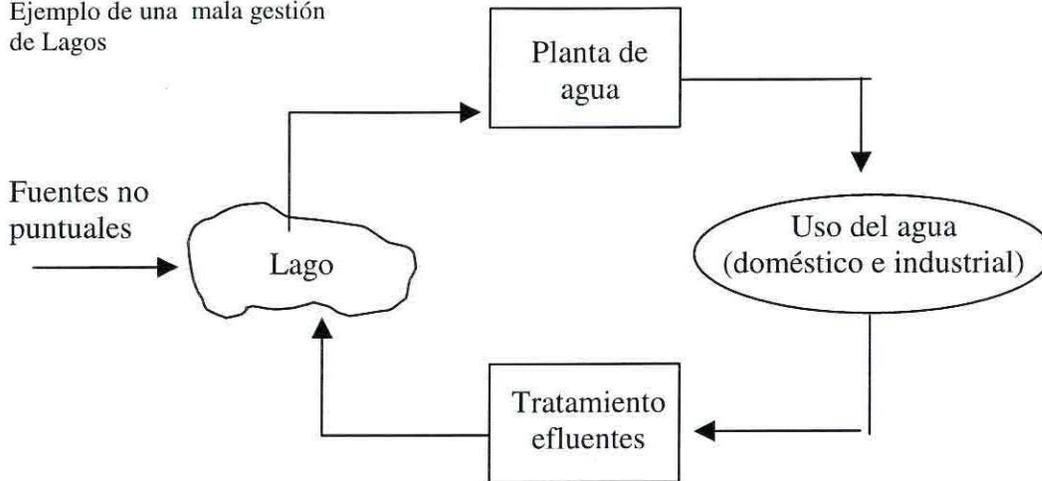
Por su parte, la Figura 3 muestra una falta de coordinación entre las autoridades encargadas de la calidad del agua del Lago y su potabilización y las autoridades encargadas del control de los efluentes al Lago lo que indica que no existió una buena estrategia de gestión desde el principio

El principal problema de esta falta de coordinación es que el agua del Lago se somete a costosos procesos de purificación para producir agua de bebida, la cual es utilizada indiscriminadamente tanto por los hogares como por las industrias, cuando es bien conocido que las industrias requieren, por lo general, una calidad de agua inferior a la requerida por los hogares. Esta primera situación involucra un gasto innecesario al potabilizar agua que no será utilizada para estos fines.

Otro problema que se desprende de esta situación es el tratamiento de efluentes, los cuales son nuevamente tanto domésticos como industriales y éstos últimos, por lo general deben someterse a procesos de purificación más complejos al contar con metales pesados, solventes, pinturas, etc. Lo anterior significa que al mezclar ambos efluentes, toda el agua utilizada tanto por los hogares como por las industrias tendrá que someterse a los complejos y costosos procesos de tratamiento que únicamente requerirían las aguas residuales industriales.

Finalmente, en la figura 3 se aprecia que no se toma en cuenta el aporte de nutrientes por parte de las actividades agrícolas lo que significa que: "...el agua del Lago será muy eutrófica y/o se requerirán tratamientos de efluentes muy avanzados y onerosos (Jorgensen y Vollenweider, 1997).

Figura 3
Ejemplo de una mala gestión
de Lagos



Una vez expuestos los ejemplos de una buena y una mala estrategia de gestión podemos retomar el ejemplo de una buena estrategia de gestión (Figura 2) y observar que tanto la biomanipulación como los humedales no son técnicas alternativas o sustitutivas al control de nutrientes por métodos “convencionales” (reduciendo los aportes de nutrientes desde sus áreas de influencia mediante plantas de tratamiento) ya que según Bernardi y Giussani (1997) estos últimos deben permanecer como el objetivo primario de cualquier intervención directa con fines restaurativos.

El uso de humedales o la biomanipulación se deben considerar, más bien, como operaciones de apoyo que pueden acelerar y facilitar el proceso de recuperación de un sistema lacustre, interviniendo en aquellos mecanismos que son responsables de los

poderosos procesos de resiliencia⁷ ambiental que surgen y persisten dentro del ecosistema (Bernardi y Giussani, 1997).

La importancia de la utilización de estas técnicas es que brindan la posibilidad de recuperar ambientes eutróficos cuando la carga de nutrientes deriva principalmente de fuentes no puntuales (que no son fáciles de controlar). Así mismo, involucran una gestión ecológica integrada de los cuerpos de agua en relación al uso al cual van a ser destinados con bases científicas más sólidas (Bernardi y Giussani, 1997).

4. Discusión y reflexiones finales

A través de este documento se han descrito los principales problemas que el Lago de Pátzcuaro presenta a nivel de cuenca respecto a su calidad del agua, recalcando la manera en la que éstos han acelerado su proceso de eutrofización.

Un aspecto que detecta este trabajo es la falta de datos importantes. Por ejemplo, no se dispone de datos de oxígeno disuelto en 24 horas, las toneladas de fertilizantes utilizadas en la cuenca. Sin esta información se limita el alcance y profundidad de los análisis, como el del aporte real de fuentes no puntuales.

El análisis realizado sobre la transparencia del Lago sugiere que el horizonte temporal de vida del Lago es menor a 10 años, si continúan las tendencias tanto en el crecimiento demográfico de la cuenca como en el grado de urbanización de la misma.⁸

El principal problema que se deriva de esta disminución en la calidad del agua del Lago, de acuerdo al análisis, es que cualquier actividad que involucre el uso de esta agua podría tener efectos nocivos para la salud tanto de los usuarios directos como de los indirectos. Esto implica que en menos de 10 años la estructura productiva de la cuenca tendría que cambiar

⁷ La resiliencia es la capacidad del Lago de recobrar su estado original después de haber sido afectado exógenamente.

⁸ En esta tesis no se analizó el impacto de otros problemas que acortarían este horizonte son la tala, el uso de fertilizantes ricos en fósforo y nitrógeno y el sobre pastoreo.

a actividades que no requieran el uso de esta agua. Ello parece bastante complicado en un horizonte temporal tan corto y, sobre todo, en un lugar donde históricamente se ha utilizado este recurso para la reproducción de la mayoría de las actividades que se realizan en la cuenca.

Además, un Lago tan deteriorado como el que se tendría en los próximos cinco a diez años puede provocar que el atractivo turístico del lugar disminuya. Por un lado, el Lago dejaría de ser una belleza natural y, por otro, sería un foco de infección de diferentes enfermedades. Todo ello impactaría adversamente los ingresos de los municipios colindantes por concepto de turismo receptivo, mermando otra importante fuente de desarrollo de la región.

En la actualidad, uno de los pocos esfuerzos para reducir el aporte de nutrientes al Lago es la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio de Pátzcuaro. Esta comenzará a operar en el 2002. La planta está diseñada para tratar, en una primera etapa, 100 litros por segundo (l/s). Se prevé una segunda etapa, en la cual, de ser necesario, el volumen tratado aumentaría a 150 l/s. El costo de construcción de esta planta es de aproximadamente \$300 mdp (tres cientos millones de pesos) y su costo de operación será de aproximadamente \$250,000 pesos mensuales. .

La Comisión Nacional del Agua (CNA), es el organismo encargado de la construcción de esta planta de tratamiento y de su operación durante el primer mes de funcionamiento. Después de este tiempo de participación de este organismo federal, el costo de operación será responsabilidad del municipio. Esto puede originar, como ya sucedió con la primera planta de tratamiento construida en el municipio de Pátzcuaro, que la planta opere de una manera interrumpida debido a que el municipio carece de los recursos suficientes para este fin. Es decir, aunque sea bien construida, hay riesgos de administración pública local de que la planta pueda operar debidamente.

Aunque se plantea en los estudios ecológicos especializados en el mundo, que la utilización de una planta de tratamiento es la base de cualquier intervención con fines restaurativos,

este método presenta, en primera instancia tres limitantes. La primera es su elevado costo. La segunda es que la planta controla únicamente el aporte de nutrientes de fuentes puntuales provenientes del municipio de Pátzcuaro y de ningún otro municipio o tributario al Lago. La tercera limitante es, como se señaló anteriormente, que este método de restauración es muy lento.

Las técnicas de restauración complementarias al tratamiento de efluentes que se expusieron anteriormente (biomanipulación y humedales) se vuelven necesarias, dado el tiempo de vida estimado del Lago. Esto se considera así porque, además de acelerar los procesos de restauración, el empleo de estas técnicas permite controlar el aporte de fuentes no puntuales y puede disminuir los costos de operación de una planta de tratamiento al fungir como métodos de tratamiento terciarios de remoción de nutrientes.

El empleo de la biomanipulación en el Lago de Pátzcuaro involucra el desarrollo de dos etapas. Una primera etapa consiste en el desarrollo de recursos humanos y de investigaciones de seguimiento, en las cuales se examinen los efectos de reducción/remoción de peces planctívoros. Una segunda etapa es de tipo instrumental.

De los estudios de caso revisados, el del Lago Zwemlust (Gulati, 1997) es el más exitoso y fue restaurado sólo por manipulación de la red alimenticia. En dicho caso, la carga de nutrientes, siendo principalmente vía filtración subterránea, no podía reducirse con otro método como el de una planta de tratamiento. Sin embargo, se requirieron seis años de investigación antes de la fase instrumental. No obstante el éxito de este caso, hay efectos retardados y secundarios posteriores a la manipulación, los cuales han creado algunas dudas sobre la estabilidad a largo plazo de este tipo de manejo.

Nuevamente, este método nos enfrenta a tres limitantes: el tiempo y la falta de capital humano con dominio de las técnicas de biomanipulación además de la posible inestabilidad en el largo plazo. La viabilidad de su aplicación en el Lago de Pátzcuaro queda en fuerte duda.

Por su parte, el empleo de macrófitas, como limitantes de nitrógeno y por tanto del crecimiento de fitoplancton durante el período de vegetación, es muy reconocido en cada uno de los estudios de caso revisados.

La elevada concentración de nutrientes en el Lago de Pátzcuaro puede permitir el desarrollo de vegetación macrófita. Es decir, el fomentar el crecimiento de humedales en las riberas de los tributarios al Lago y en los lugares de descarga de los efluentes urbanos involucra únicamente el esfuerzo de sembrar y remover periódicamente este tipo de vegetación, con el fin de que ésta absorba el mayor número de nutrientes posible.

Las características de absorción y retención de sedimentos de los humedales, su bajo costo de "operación" y la posibilidad que brindan de controlar el ingreso de nutrientes provenientes de fuentes no puntuales, puede ser de gran ayuda en la restauración del Lago o en el incremento de su esperanza de vida.

Así mismo, parece elevada la probabilidad de contaminación por fuentes no puntuales (mapa 1) en la Cuenca del Lago de Pátzcuaro, dado que hay mucho territorio sin localidades y puede crecer la actividad de tala y uso de fertilizantes ricos en fósforo. Por eso, es necesario adoptar una técnica que pueda detener el ingreso de nutrientes por esas fuentes no puntuales. Una buena manera de hacerlo es mediante los humedales.

La realidad es que no existe una infraestructura de fomento de humedales ni de tratamiento de aguas residuales en el Lago. Si consideramos la dificultad de implantar estos servicios en una área con población dispersa (que también contamina e incrementa las fuentes no puntuales), se vuelve necesario fomentar el crecimiento de las ciudades garantizando los servicios requeridos para evitar que los desperdicios humanos sigan llegando al Lago sin ningún tipo de tratamiento. (tratamiento que, como señalan los expertos, debe ser el pilar de cualquier política de restauración).

Es necesario tomar en cuenta que en la actualidad, aunque el Lago presenta un deterioro considerable, aún existe vida en el mismo. Además, el uso de su agua para riego no ha

presentado efectos nocivos para la salud. También, la mayoría de sus parámetros físico-químicos no han rebasado niveles críticos y el Lago todavía conserva su belleza natural. Todo esto indica que se está a tiempo para emprender de una manera inmediata las acciones necesarias para desacelerar su proceso de eutrofización. El Lago está en una cuenta regresiva y cada año que pase sin que se emprendan acciones de restauración resultará únicamente en un mayor deterioro y, por tanto, en mayores costos y técnicas más agresivas de restauración.

5. Referencias

- Banderas, Alfonso. *Diagnóstico Ambiental del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México, 1ª Etapa*. Coordinación de Tecnología Hidráulica, Subcoordinación de Hidráulica Ambiental. IMTA, diciembre del 2000.
- Banderas, Alfonso y Rebeca González, 2000. Calidad del agua en Diagnóstico Ambiental del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México, 1ª Etapa . Coordinación de Tecnología Hidráulica, Subcoordinación de Hidráulica Ambiental. IMTA.
- Brena, Jorge, 2000. Evaluación de uso del suelo en Diagnóstico Ambiental del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México, 1ª Etapa . Coordinación de Tecnología Hidráulica, Subcoordinación de Hidráulica Ambiental. IMTA
- Chacón, T.A., 1993 Pátzcuaro un lago amenazado. Bosquejo limnológico. Sría. de Difusión Cultural/ Editorial Universitaria. México. 144p.
- CNA, 1990. Evaluación del grado de eutrofización en el Lago de Pátzcuaro. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Lerma-Balsas. Centro de Estudios Limnológicos. Guadalajara, Jal. 36p.
- Códice 90, INEGI. Censo General de Población (1990)
- Davis, Richard, Trevor F.N. Farley, William J. Young and Susan M. Cuddy, 1998. *The experience of using a decision support system for nutrient management in Australia*. CSIRO Land and Water. Australia.
- De Bernardi, Riccardo y Gianluigi Giussani, 1996. "Biomanipulación: Bases para un control de "arriba hacia abajo" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 7. <http://lib1.nippon-foundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>
- Forsberg, Curt, 1998. *Which policies can stop large scale eutrophication?* Institute of limnology, Uppsala university. Sweden.
- García, José Luis, 2000. Pesquerías, parásitos y enfermedades de peces en Diagnóstico Ambiental del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México, 1ª Etapa . Coordinación de Tecnología Hidráulica, Subcoordinación de Hidráulica Ambiental. IMTA.
- Giussani, G. y G.Galanti. 1996 "Estudio de Caso:Lago Candia(Norte de Italia)" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 7. <http://lib1.nippon-foundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>

- Gophen, M. 1996 "Experiencia de Biomanipulación de Largo Plazo (1970-1990) en Todo el Lago. Estudio de Caso:Lago Kinneret(Israel)" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 7.
<http://lib1.nipponfoundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>
- Gulati, R.D. 1996."La Manipulación de la Cadena Alimentaria como una Herramienta de Gestión de Lagos Pequeños en los Países Bajos: El Ejemplo del Lago Zwemlust" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 7.
<http://lib1.nipponfoundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>
- Illueca, Jorge, 1996. Directrices para la gestión de lagos Volumen 7, Prefacio.
<http://lib1.nippon-foundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>
- INEGI, 1995. Procesado en el laboratorio de información geográfica de El Colegio de México.
- Löffler, H. 1996. "Impacto por el hombre" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 3.
<http://lib1.nipponfoundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>
- López, Eduardo, Soares Denise y Sergio Vargas, 2000. Diagnóstico socioambiental del Lago de Pátzcuaro en Diagnóstico Ambiental del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México, 1ª Etapa. Coordinación de Tecnología Hidráulica, Subordinación de Hidráulica Ambiental. IMTA.
- Müller, Karl, 2000. Development, ecological resources and their management: a study of complex dynamic systems. Stockholm School of Economics, Stockholm, Sweden Beijer Institute, Royal Swedish Academy of Sciences, International Institute of Ecological Economics, Box 50005, 10405, Stockholm Sweden en European Economic Review.
- Morales, Rubén, 2000. Hidrología del Lago de Pátzcuaro en Diagnóstico Ambiental del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México, 1ª Etapa. Coordinación de Tecnología Hidráulica, Subordinación de Hidráulica Ambiental. IMTA.
- Moss, Brian. 1996. "Manipulación de plantas acuáticas" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 7.
<http://lib1.nippon-foundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>
- Muñoz, Jorge, 1981. Estudio Calidad del Agua en el Lago de Pátzcuaro. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría de Planeación. Dirección general de usos del agua y prevención de la contaminación. Subdirección de Ingeniería.
- Overbeck, J. 1996 "Conceptos sobre Ecosistemas" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 1.
<http://lib1.nippon-foundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>

- Peeters, Edwin and Jean J.P. Gardeniers, 1998. *Ecologically based standards for nutrients in streams and ditches in the Netherlands*. Department of Aquatic Ecology and Water Quality Management. The Netherlands.
- Portielje, Ron and Diederik T. Van der Molen, 1998. *Trend-Analysis of eutrophication variables in lakes in the Netherlands*. Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment (RIZA), The Netherlands.
- Rast, Walter and Marjorie Holland, 1988. *Eutrophication of lakes and reservoirs: a framework for Making Management Decisions*. AMBIO Vol. 17 No.1.
- S.E. Jorgensen y R.A. Vollenweider, 1996. "Problemas de Lagos y Reservorios" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 7.
<http://lib1.nippon-foundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>
- Tatrai, I. 1996. "Estudio de Caso:Lago Balaton(Hungria)" en Directrices para la Gestión de Lagos Volumen 7.
<http://lib1.nipponfoundation.or.jp/1996/0834/mokuji.htm>
- Toledo, V.M., P. Alvarez-Icaza y P. Avila. *Plan Pátzcuaro 2000*, 1992. Fundación Friedrich Ebert Stiftung. Michoacán.
- Velasco, Adriana, 1982. Evaluación de la calidad del agua con base en algunos aspectos de la comunidad fitoplanctónica del Lago de Pátzcuaro, Mich. Tesis presentada para obtener el título de Biólogo. UNAM. Facultad de Ciencias.