



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y PROPUESTA DE MEDIDAS DE
PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LA LAGUNA DE ZUPITLÁN, MUNICIPIO DE
ACATLÁN, HIALGO.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RAYMUNDO SÁNCHEZ VILLAVICENCIO

TUTOR PRINCIPAL
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDÉZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR
DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. MARIA ANTONIETA GÓMEZ BALANDRA, INSTITUTO MEXICANO DE
TECNOLOGÍAS DEL AGUA
M.C. VICENTE FUENTES GEA, FACULTAD DE INGENIERÍA
M.I. CARLOS MANUEL MENÉNDEZ MARTÍNEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO . ABRIL 2019

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA
Secretario:	M.C. VICENTE FUENTES GEA
1^{er} Vocal:	DRA. MARÍA ANTONIETA GÓMEZ BALANDRA
2^{do} Vocal:	M.I. CARLOS MANUEL MENÉNDEZ MARTÍNEZ
3^{er} Vocal:	DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto.

A mis padres, por jamás dejar de confiar en mí.

A la UNAM, particularmente al posgrado de ingeniería, por su apoyo a lo largo de mis estudios de maestría.

A mi hermana Vero y a los gorditos, que fueron parte de esta investigación.

A mis amigos: Giselle, Sergio, Ilse, Tanya y Cris.

A Chucho Cortés, por su incondicional apoyo.

A los pescadores de Zupitlán, los principales expertos y testigos del deterioro que sufre su bella laguna.

Al Dr. Enrique César Váldez, que más que mi director de tesis, ha sido mi mentor, maestro y amigo.

A mis sinodales, que jamás dudaron en mejorar este trabajo a través de sus comentarios:

Dra. Alma Concepción Chávez Mejía.

M.I. Vicente Fuentes Gea.

Dra. María Antonieta Gómez Balandra

M.I. Carlos Manuel Menéndez Martínez.

A cada persona que me tendió la mano para poder experimentar, viajar a campo, descubrir nueva bibliografía, corregir mi redacción y extender mi panorama. Gracias a ustedes, este trabajo no habría sido posible sin su cooperación y guía.

Índice General

Resumen	15
Introducción	16
1. Objetivos	20
1.1. Justificación	20
1.2. Objetivos	21
2. Marco teórico	23
2.1. Eutroficación	23
2.1.1. Nutrientes que causan la eutroficación	26
2.1.2. Nutriente limitante	26
2.1.3. Factores y procesos que afectan el grado de eutroficación	28
2.1.4. Carga interna de nutrientes	31
2.2. La contaminación del agua en regiones agrícolas	32
2.2.1. El cuerpo receptor	32
2.2.2. Contaminación puntual y no difusa	33
2.3. Índices de calidad del agua	35
3. Zona de estudio	37
3.1. Hidalgo	37
3.2. Acatlán	39
3.3. Laguna de Zupitlán	42
4. Metodología	44
4.1. Delimitación de la zona de influencia	44
4.2. Parámetros de muestreo	55
4.3. Sitios de muestreo	56
4.3.1. Temporalidad del muestreo	62

4.4. Cálculo de carga de contaminantes	63
5. Resultados	67
5.1. Campañas de muestreo	67
5.1.1. Primera campaña, lluvias	67
5.1.2. Análisis de los resultados de la primera campaña	71
5.1.3. Segunda campaña, estiaje	85
5.1.4. Análisis de los resultados de la segunda campaña	88
5.2. Análisis de la calidad del agua	104
5.3. Índice de la Calidad Bacteriológica y Fisicoquímica, IQBP.	111
5.4. Clasificación del grado de eutrofia	115
6. Propuestas para el control de la eutroficación	122
6.1. Métodos preventivos y correctivos	122
6.2. La presa El Sabino	132
7. Conclusiones	136
A. Mapas de isoconcentraciones	140
A.1. Primera campaña de muestreo	140
A.2. Segunda campaña de muestreo	143
B. Métodos analíticos	146
C. Tablas comparativas, calidad del agua	147
D. IQBP	149
Referencias	155

Índice de tablas

1.	Lagos más grandes (por superficie) de México.	17
2.	Grado de contaminación (%) de los cuerpos de agua superficial en México, según estudios de CONAGUA en 2016.	17
4.1.	Caracterización de la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán.	47
4.2.	Caracterización de la microcuenca que drena hacia la presa El Sabino.	52
4.3.	Caracterización del área de influencia efectiva de la Laguna de Zupitlán.	53
4.4.	Parámetros propuestos para las campañas de muestreo y las normas e índices que sugieren su determinación.	56
4.5.	Se presentan los sitios de muestreo supuestos de acuerdo a la norma NMX-AA-14-1980, que considera afluentes, mezcla homogénea y salidas del cuerpo receptor.	58
4.6.	Red de muestreo final, resultado de la combinación de la red elaborada a partir de la norma NMX-AA-14-1980 y aquella propuesta a partir de una cuadrícula equidistante sobrepuesta a la laguna.	61
4.7.	Caracterización de los usos de suelo que tiene el área de influencia efectiva de la Laguna de Zupitlán. Elaboración propia con datos de SIATL.	64
4.8.	Cargas anuales de nitrógeno y fósforo en la zona de influencia efectiva de la Laguna de Zupitlán.	66
5.1.	<i>Resultados de los estudios fisicoquímicos y bacteriológicos para la primera campaña de muestreo en la Laguna de Zupitlán y la presa el Sabino (abajo). Elaboración propia.</i>	69
5.2.	<i>Análisis estadístico descriptivo para la Laguna de Zupitlán y El Sabino, se incluye la remoción de contaminantes entre los dos cuerpos.</i>	70
5.3.	Correlaciones de Pearson fuertes del análisis estadístico multivariado, así como su respectivo p-value.	83

5.4. Resultados de los estudios fisicoquímicos y bacteriológicos para la segunda campaña de muestreo en la Laguna de Zupitlán y la presa El Sabino (abajo). Elaboración propia.	87
5.5. Análisis estadístico descriptivo para la Laguna de Zupitlán y El Sabino, en el segundo muestreo, se incluye la remoción de contaminantes entre los dos cuerpos.	88
5.6. Correlaciones de Pearson fuertes del análisis estadístico multivariado, así como su respectivo p-value, para la segunda campaña de muestreo.	102
5.7. Diferencia y análisis descriptivo de las medias de cada parámetro analizado en los muestreos (estiaje y lluvias) de la Laguna de Zupitlán. .	104
5.8. Parámetros de calidad del agua de Zupitlán contrastados con normas y lineamientos de calidad del agua de las normas 001 y 002 de SEMARNAT, los criterios ecológicos CE-CCA-1989, la clasificación de calidad de agua superficial de la UNECE y la directiva 2006/7/EC de la Unión Europea. EN= En norma, PE= Por encima de la norma, PD= Por debajo de la norma.	107
5.9. Resultados del IQBP para cada punto de muestreo de la Laguna de Zupitlán. Se han señalado en color naranja los descriptores limitantes de cada uno.	113
5.10. Clases de calidad del agua definidas por el índice quebequés IQPB. Tomado de Hébert (1996).	114
5.11. Índice de cargas de Vollenweider para fósforo y nitrógeno total (g/m ² /año) para diferentes profundidades medias.	116
5.12. Medias de los parámetros involucrados en el cálculo del Índice de Estado Trófico de Carlson (TSI) para los muestreos realizados en lluvias y estiaje.	117
5.13. Índices de Estado Trófico de Carlson (TSI) para la laguna de Zupitlán.	117
5.14. Interpretación de los valores del TSI para la laguna de Zupitlán. . . .	118
5.15. Aspectos de la calidad del agua y la pesca, relacionados con intervalos de valores del Índice de Estado Trófico de Carlson. Tomado de Carlson (1996).	119
5.16. Grado de eutrofia de la laguna de Zupitlán, según los criterios de la OCDE (1982).	120
A.1. Mapas de isoconcentración correspondientes a todos los parámetros analizados durante la primera campaña de muestreo, realizada el día 5 de octubre de 2017	142

A.2. Mapas de isoconcentración correspondientes a todos los parámetros analizados durante la segunda campaña de muestreo, que tuvo lugar el día 1 de marzo de 2018	145
B.1. Métodos analíticos utilizados para la determinación de los parámetros medidos durante las campañas de muestreo en la Laguna de Zupitlán.	146
C.1. <i>La figura muestra los diferentes límites permisibles (mínimos, para el caso del oxígeno disuelto, O.D., y máximos para el resto de los descriptores de calidad del agua), así como los intervalos que se deben de cumplir según las normas oficiales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1996 y los criterios ecológicos CE-CCA-1989.</i>	148
C.2. <i>La figura muestra los intervalos de valores que pueden tomar los descriptores de calidad del agua, según la clasificación estándar de la Comisión Económica Europea para el mantenimiento de la vida acuática en agua dulce superficial.</i>	148
C.3. <i>La figura muestra la clasificación de calidad de aguas continentales con fines recreativos, según la directiva 2006/7/EC de la Unión Europea.</i> .	148
D.1. <i>Resultados de los análisis de la campaña de muestreo en estiaje, ajustados para su comparación con las curvas de apreciación de la calidad del agua del IQBP.</i>	154

Índice de figuras

2.1.	<i>Línea del tiempo que muestra el interés público global respecto a la eutroficación durante la segunda mitad del siglo XX. Elaboración propia con datos de Harper (1992).</i>	24
2.2.	<i>Secuencia genérica de cambios biológicos ocasionados por la eutroficación en un cuerpo de agua. Elaboración propia con datos de Harper (1992).</i>	25
2.3.	<i>Patrón temporal usual de lagos templados al norte del Ecuador, en un periodo posglacial (Holoceno, 10,000 a.C.). Tomado de Harper (1992).</i>	31
2.4.	<i>Ejemplo de contaminación difusa a las orillas de la laguna de Zupitlán</i>	34
2.5.	<i>Ejemplo de contaminación puntual en las cercanías de la laguna de Zupitlán. Tomado de Morales (2015)</i>	35
3.1.	<i>Regiones geoculturales en las que se divide el estado de Hidalgo. Tomado de Sánchez Martínez, 2014.</i>	39
3.2.	<i>Ubicación del municipio de Acatlán dentro del estado de Hidalgo. Adaptado de la “Enciclopedia de municipios y delegaciones de México”, 2010.</i>	40
3.3.	<i>Ubicación de la laguna de Zupitlán. Tomado de Ávila, 2009.</i>	43
4.1.	<i>Fracción de la cuenca propuesta por el software ArcGis para la Laguna de Zupitlán.</i>	46
4.2.	<i>Microcuenca de la laguna de Zupitlán estimada por SIATL.</i>	47
4.3.	<i>Distribución de la población según su edad y de las viviendas particulares según su uso, en la microcuenca de la Laguna de Zupitlán</i>	48
4.4.	<i>Servicios con los que cuentan las casas particulares dentro de la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán. Fuente: SIATL, 2017.</i>	49
4.5.	<i>Distribución de la vegetación dentro de la microcuenca de la Laguna de Zupitlán</i>	49

4.6.	<i>Temperatura y precipitación media mensual dentro de la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán. Fuente: SIATL, 2017.</i>	50
4.7.	<i>Fotografía que muestra la distribución de los terrenos aguas abajo de la laguna (por la margen noreste).</i>	50
4.8.	<i>En la imagen se muestra la microcuenca de influencia de la presa El Sabino, obtenida con el software en línea SIATL de INEGI.</i>	51
4.9.	<i>Área de influencia efectiva de la laguna de Zupitlán</i>	53
4.10.	<i>Sitios de muestreo de acuerdo a la NMX-AA-14-1980. Fuente: Google earth, 2017.</i>	59
4.11.	<i>Propuesta de cuadrícula de muestreo. Fuente: Google earth, 2017. . .</i>	59
4.12.	<i>Propuesta de red de muestreo a partir de cuadrícula equidistante. Fuente: Google earth, 2017.</i>	60
4.13.	<i>Localización de los puntos del muestreo. Fuente: Google earth, 2017. .</i>	62
4.14.	<i>Localización de los puntos de muestreo A y B, dentro de la presa El Sabino, que amortigua la carga contaminante a la laguna de Zupitlán. Fuente: Google Earth, 2017</i>	63
5.1.	<i>Mapa de isoconcnentraciones para los fosfatos en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.</i>	71
5.2.	<i>Mapa de isoconcnentraciones para la clorofila a en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.</i>	72
5.3.	<i>Transparencia con disco Secchi en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.</i>	73
5.4.	<i>Movimiento de las diferentes formas del nitrógeno en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.</i>	74
5.5.	<i>Sólidos Suspendidos Totales en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.</i>	75
5.6.	<i>Materia orgánica en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias, medida por medio de DQO y DBO₅.</i>	76
5.7.	<i>Coliformes fecales en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.</i>	78
5.8.	<i>Descarga puntual a la presa El Sabino proveniente de un centro de ganadería intensiva (20° 7'56.06"N, 98°24'41.60"O).</i>	79
5.9.	<i>Líneas de flujo fuera de la Laguna de Zupitlán y en dirección al Río Grande de Tulancingo. Fuente: SIATL de INEGI, 2017.</i>	84
5.10.	<i>Parámetros relacionados con la eutroficación en la laguna de Zupitlán durante el muestreo en estiaje. Se muestran las líneas de flujo teóricas de la laguna, sugeridas a partir de los resultados de la transparencia.</i>	90

5.11. <i>Distintas formas del nitrógeno encontradas en la laguna de Zupitlán durante el muestreo en estiaje.</i>	91
5.12. <i>Sólidos Suspendidos Totales en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en estiaje.</i>	92
5.13. <i>Materia orgánica en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje, medida por medio de DQO y DBO₅.</i>	93
5.14. <i>Coliformes fecales, medidas como Unidades Formadoras de Colonias de E. Coli, en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje.</i>	95
5.15. <i>Oxígeno disuelto, medidas como porcentaje de saturación del gas, en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje.</i>	96
5.16. <i>Valores de pH en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje.</i>	97
5.17. <i>Mapa de la región hidráulica-administrativa 26 (Alto pánuco), de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (1976). Se aprecia un borde menos anguloso en el costado este de la Laguna de Zupitlán.</i>	98
5.18. <i>Batimetría de la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje. En este trabajo se supone que la batimetría es constante a lo largo del año.</i>	99
5.19. <i>Reducción y aumento, entre la presa El Sabino y la Laguna de Zupitlán, de los diferentes parámetros analizados durante el muestreo en estiaje.</i>	100
5.20. <i>Usos actuales del agua para la Laguna de Zupitlán.</i>	105
5.21. <i>La figura esquematiza la calidad del agua de la laguna de Zupitlán en función de su uso, siguiendo los resultados de la tabla 5.8.</i>	110
5.22. <i>Ejemplo de cálculo del IQBP: 1) leyendo de la gráfica, 2) leyendo directamente el parámetro.</i>	112
5.23. <i>La figura muestra las ecuaciones para calcular el estado trófico de Carlson, a partir de la transparencia con disco Secchi, la clorofila a y el fósforo total.</i>	117
5.24. <i>Valores de la OCDE (1982) para un sistema completo de clasificación trófica. Tomado de Moreno (2010).</i>	120
6.1. <i>Señalización cercana a la laguna de Zupitlán que menciona la limpieza que comenzara en 2006. Puede leerse “La gerencia estatal en Hidalgo en apoyo a la comunidad y optimización de la infraestructura hidráulica (ininteligible) trabajos de limpieza (ininteligible) maleza (ininteligible). Julio, 2006”. Fotografía obtenida en 2017.</i>	123

6.2.	<i>Aplicación de la técnica de arado de contorno, que aumenta la infiltración del agua y limita la erosión y consecuente pérdida de nutrientes. Tomado de Shahvarooghi (2016)</i>	128
6.3.	<i>Matriz de factibilidad de métodos de control de la eutroficación. Se han resaltado en tonos rosas las características morfológicas y de temperatura de Zupitlán (+: Método económicamente factible y con amplias posibilidades de éxito, -: Método económicamente factible, o no, y sin posibilidades de éxito, ?: método que carece de evidencias científicas sobre su efectividad en las condiciones señaladas). Tomado de Mazzeo (s.f.)</i>	128
6.4.	<i>Árbol de opciones técnicamente factibles para el control de la eutroficación de Zupitlán. Elaborado a partir del catálogo de métodos de control de Harper (1992) y la matriz de criterios de selección de Mazzeo (s.f.)</i> . 129	
6.5.	<i>En la fotografía puede observarse el embalse de la presa El Sabino con un tirante mínimo, ocupando una superficie de apenas 100m².</i>	134
D.1.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para coliformes fecales, según el IQBP. La unidad de medida son las unidades formadoras de colonias (UFC) por cada 100ml de muestra. Adaptado de Hébert (1996)</i> .149	
D.2.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para fósforo total, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996)</i>	150
D.3.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para nitrógeno amoniacal, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996)</i>	150
D.4.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para nitritos y nitratos, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996)</i>	151
D.5.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996)</i>	151
D.6.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para pH, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996)</i>	152
D.7.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996)</i>	152
D.8.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para turbiedad, según el IQBP. La unidad de medida es la Unidad de Turbiedad Nefelométrica (UTN). Adaptado de Hébert (1996)</i>	153
D.9.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para la saturación de oxígeno disuelto, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996)</i>	153
D.10.	<i>Curva de apreciación de la calidad del agua para la clorofila a, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996)</i>	154

Resumen

La laguna de Zupitlán es un cuerpo de agua de 0.717 km², localizada en la comunidad de los Pocitos, en Acatlán, Hidalgo; cuyas aguas se utilizan para el riego de cultivos y la pesca. La laguna es de vital importancia para la economía y subsistencia local, pues la zona se caracteriza por altos índices de marginación, y falta de infraestructura sanitaria.

La calidad del agua de la laguna, en los últimos 40 años, se ha visto mermada por el problema de eutroficación, el cual consiste en un importante aumento de la biomasa algal en el embalse debido a los aportes excesivos de nitrógeno y fósforo.

En virtud de lo anterior, se determinó la calidad del agua de la laguna de Zupitlán en relación a las actividades productivas realizadas en la zona de influencia del embalse, que resultó ser compatible con la pesca, el riego e incluso actividades recreativas de contacto directo (de acuerdo a los resultados bacteriológicos).

Se determinó, además, que la laguna se encuentra en un estado que va de la eutrofia a la hipereutrofia, según los índices de Carlson y de la OCDE. Por otro lado, el índice de Vollenweider (también usado para estimar eutrofia, y dependiente únicamente de la zona de influencia del reservorio) ubicó a la laguna de Zupitlán por debajo de los valores de nutrientes necesarios para provocar eutroficación, por lo que se ha concluido que los problemas ambientales de la laguna están asociados al influente proveniente del embalse vecino: la presa El Sabino.

Para concluir se realiza una revisión de las posibles medidas de remediación y control ambiental, considerando su factibilidad técnica y aplicabilidad en función de la realidad socioeconómica de la localidad. De dicho análisis se concluye que la remoción y adecuada disposición de los sedimentos de la presa El Sabino, de forma que su capacidad de depuración de contaminantes se extienda, es la mejor opción para el control del ingreso de nutrientes a la laguna de Zupitlán en el largo plazo.

Introducción

Las actividades humanas tienen efectos trascendentes en el equilibrio natural de los ecosistemas acuáticos, las descargas de aguas residuales (domésticas e industriales) propician el aumento del contenido de materia orgánica, que produce una disminución en la cantidad de oxígeno disuelto disponible para los organismos que se desarrollan en ríos, lagos y lagunas de nuestro país.

La descarga de agua residual proveniente de actividades agrícolas, la acumulación de sedimentos, la eutroficación, la contaminación con metales pesados o bacterias patógenas, así como el agotamiento del agua por sobreexplotación del recurso, son algunos de los problemas más frecuentes a los que se enfrentan los cuerpos de agua nacionales.

El monitoreo constante de la calidad de los cuerpos de agua es una actividad crucial para preservar estas fuentes para las generaciones futuras, sin embargo, los mayores esfuerzos en este sentido se ocupan de los ríos y lagos más grandes de la nación, así como de aquellos de gran importancia en el abastecimiento de agua potable (como la presa Valle de Bravo (Oliveros, 2014)), dejando en un segundo término a embalses pequeños, cuya importancia para el abastecimiento del recurso resulta local.

Es sabido que el 11.8 % del agua superficial en México sufre algún grado de contaminación, mientras que el 40.7 % se considera de excelente calidad (CONAGUA, 2013) (ver tabla 2). El sistema de monitoreo nacional que determina estos valores puede, sin embargo, dejar de lado a pequeños cuerpos de agua ¹, lejanos a sitios de alta

¹No existe una clasificación estándar de lagos y lagunas con respecto a su tamaño. En este texto el término *grandes lagos* designa a cuerpos de agua con un espejo de más de 20 km² de superficie. En la tabla 1 puede observarse el ranking de los lagos más grandes de México, de acuerdo a su área superficial. Se ha añadido la presa de Valle de Bravo y la Laguna de Zupitlán a la tabla para ilustrar su tamaño comparativamente.

influencia antrópica (CONAGUA, 2017) en cuyo caso, la inversión de recursos para su gestión, aprovechamiento y saneamiento está supeditado a estudios formales de su calidad, así como las fuentes de contaminación que los afectan, tal es el caso de la Laguna de Zupitlán, localizada en el estado de Hidalgo a la que esta tesis se refiere.

Tabla 1: Lagos más grandes (por superficie) de México.

Ranking	Nombre	Ubicación	Superficie(km ²)
1	Chapala	Michoacán/Jalisco	1116
2	Cuitzeo	Guanajuato/Michoacán	306
3	Pátzcuaro	Michoacán	100
4	Cuitzeo	Guanajuato	80
5	Catemaco	Veracruz	75
	Presa Valle de Bravo	Edo. Mex.	18.55
	Laguna de Zupitlán	Hidalgo	0.717

Elaboración propia con datos de Consejo Consultivo de Agua A.C. (2015), Ávila (2009) y Vázquez (2015).

Tabla 2: Grado de contaminación (%) de los cuerpos de agua superficial en México, según estudios de CONAGUA en 2016.

Calidad	Excelente	Buena	Aceptable	Contaminada	Muy contaminada
DBO ₅	57.5	13.9	18.6	6.4	3.6
DQO	24.2	19.3	24.8	24.9	6.8
SST	50.0	33.1	11.1	4.8	1.0

Tomada de CONAGUA, 2017. Todos los valores numéricos representan un porcentaje del total de los cuerpos de agua indexados en el reporte de CONAGUA para los indicadores Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Como se ha mencionado, la inversión en un cuerpo de agua está en función del conocimiento que se tiene del mismo y de la importancia que se le da en el contexto de zonas con alta actividad e impacto humano. Esta importancia a través del tiempo ha estado ligada a cuerpos de agua de gran tamaño, lo que de acuerdo a Downing (2010) es un error histórico de la comunidad científica, pues, en contraste con el paradigma aceptado a finales del siglo pasado, los sistemas de monitoreo moderno, apoyados por tecnologías de percepción remota, han demostrado que los lagos pequeños, embalses y charcas dominan la extensión superficial de las aguas continentales.

Para empezar a comprender la importancia de los pequeños cuerpos de agua en los

procesos biogeoquímicos globales, se ha descubierto recientemente que éstos mantienen la biodiversidad regional de aves, plantas, anfibios e invertebrados, tienen más especies acuáticas y semiacuáticas por unidad de área, son más resistentes a la introducción de especies exóticas y son más productivos para la pesca por unidad de área que los grandes lagos.

Adicionalmente, en términos de su capacidad de procesar y secuestrar carbono, se estima que los cuerpos pequeños de agua procesan anualmente alrededor de un petagramo de éste; 10 veces más que los humedales, 100 más que los bosques tropicales y 10,000 más que los océanos, convirtiéndolos en el ecosistema con la mayor retención del elemento (causante del cambio climático) que existe (Downing, 2010). Es interesante observar como la limnología tradicional, así como los organismos tomadores de decisiones han colocado, históricamente, a los pequeños estanques en un plano menor de importancia en contraste con los nuevos descubrimientos en torno a su relevancia ambiental.

En resumen, hasta hace apenas 70 años, se pensaba que el área de la superficie terrestre cubierta por lagos era de 2.5 millones de km^2 , cifra que contrasta con los ahora 4.2 millones de km^2 reportados por Downing en 2010, conformados por 304 millones de embalses de todos los tamaños, dominados por aquellos de área igual o menor a 0.1 km^2 .

La laguna de Zupitlán, en el municipio de Acatlán, Hidalgo, siendo un pequeño cuerpo de agua (perteneciente al productivo grupo de embalses previamente mencionado) es de crucial importancia para la localidad, pues la actividad pesquera que en ella se realiza es el sustento, tanto alimenticio como económico, de los habitantes de la zona, además de que de ella se derivan tres canales de riego que dan servicio a más de 1000 usuarios. Por si esto fuera poco, la laguna resulta un atractivo turístico para los visitantes, tanto locales como foráneos (Pueblos mágicos de México, 2016).

Para mantener la belleza del paisaje natural del lugar, así como su productividad pesquera, se requiere que la calidad del agua sea la necesaria para sustentar la vida acuática, así como para no producir daños a la salud de los usuarios que realicen actividades recreativas en ella, o la utilicen para riego, consumo animal o humano.

Como se ha mencionado anteriormente, es deseable el análisis de un mayor número de pequeños cuerpos de agua a nivel nacional, pues su monitoreo constante, permitirá su administración, remediación y rescate. No puede evitarse el deterioro de algo

que no se conoce bien.

La aseveración de que el gobierno federal se enfoca al cuidado de cuerpos de agua de gran tamaño y vital importancia, relegando a aquellos ajenos a estas características se basa en que el INEGI (2012) no tiene registro de la Laguna de Zupitlán como un cuerpo de agua perteneciente al estado de Hidalgo y a que el sistema nacional de monitoreo de CONAGUA (2013, 2015, 2017) tampoco lo contempla entre sus muestreos.

La importancia de este trabajo radica en la aplicación de una metodología formal de la medición del grado de afectación de la calidad del agua de Zupitlán para sus diferentes posibles usos. Esto permitirá la toma de decisiones sobre la administración del embalse, por parte del gobierno local o estatal, así como de los mismos pobladores de la zona, quienes, en la práctica, se han hecho responsables de las actuales acciones paleativas de retiro de tule y otra maleza acuática.

Gracias a este estudio, la batimetría de Zupitlán es conocida en toda su extensión, así como sus líneas de corriente (de forma aproximada) a partir del movimiento de las formas del nitrógeno dentro de la laguna. De la misma manera, se reporta una red de muestreo justificada y georreferenciada, abriendo la posibilidad de continuar la evaluación de la calidad del agua en los mismos sitios, partiendo de valores de diferentes parámetros descriptores de la calidad de la laguna que permiten la evaluación de la efectividad de cualquier acción de control y remediación de la eutroficación.

Capítulo 1

Objetivos

1.1. Justificación

Hasta el momento, la bibliografía sobre las condiciones ambientales y de la calidad del agua en la laguna de Zupitlán está limitada a un estudio sobre la factibilidad de la adecuación de la zona a un corredor turístico con aparcamiento y paseos en lancha (Morales, 2015), así como un análisis de alternativas industriales a la problemática del lactosuero en la región (Gómez, 2009). En el primer caso, el objetivo fue analizar la factibilidad y las cuestiones constructivas relacionadas a la conversión de la Laguna de Zupitlán en un centro turístico importante, mientras que el segundo versa sobre las generalidades del problema de los desechos de la producción de lácteos en la región, no particularmente en Zupitlán.

En el trabajo de Morales (2015), el abordaje de la calidad ambiental de la laguna se hace de forma exclusivamente bibliográfica, sin entrar en detalles sobre ninguno de los indicadores de calidad del agua considerados por la red nacional de monitoreo de CONAGUA (2013, 2015, 2017). En ese trabajo se utilizan, además, algunos datos que no tienen respaldo bibliográfico, como la mención de una profundidad promedio de 10 m, misma que, durante la realización de este estudio, se comprobó no es mayor a 1.9 m. Gómez (2009), por otro lado, no estudia de forma particular a la laguna de Zupitlán, y hace generales sus hallazgos para Tulancingo.

Se ha considerado pertinente realizar un estudio de la calidad del agua de la laguna de Zupitlán, con el fin de determinar el nivel de afectación que su ecosistema, zona de influencia y agua (en términos de posibles aprovechamientos) han padecido.

Si se piensa en la agricultura como el mayor usuario de agua, parece lógico que sea también la principal fuente de contaminación del recurso. En efecto, alrededor del 70 % del agua consumida mundialmente (Sánchez, 2016) se destina a la actividad agrícola en todas sus formas, cifra que demuestra la importancia que esta labor tiene para el desarrollo humano y económico mundial.

El Valle de Tulancingo no resulta la excepción, pues, como Gómez (2009) lo reporta, gran cantidad de industrias agroalimentarias descargan las aguas de desecho de sus procesos, con o sin tratamiento, directamente en zanjas, ríos y lagos de la región.

La evaluación de la calidad del agua en la laguna de Zupitlán, Acatlán, Hidalgo, constituiría el primer caso de una metodología formal aplicada a la determinación del nivel de afectación que el lugar ha sufrido a causa de la actividad agrícola y pecuaria en las zonas adyacentes.

1.2. Objetivos

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la calidad del agua de la laguna de Zupitlán, Hidalgo, para proponer medidas de control y remediación de los principales problemas ambientales, diseñadas en función de las condiciones particulares del lugar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la zona de influencia de la laguna de Zupitlán, para conocer la extensión de la microcuenca que drena en el embalse.
- Determinar la variabilidad de la calidad del agua en dos periodos representativos de tiempo: lluvias y estiaje.
- Evaluar la calidad del agua de Zupitlán, con base en un Índice de Calidad del Agua (ICA).
- Representar la distribución espacial de la concentración de los parámetros seleccionados a través de software especializado.
- Determinar el estado trófico de la laguna a partir de comparación de parámetros críticos con estándares internacionales.

- Establecer la relación entre el grado de contaminación de la laguna y su zona de influencia.

Capítulo 2

Marco teórico

El presente capítulo tiene por objetivo presentar algunos conceptos que pretenden familiarizar al lector con la problemática ambiental que se analiza en el texto.

2.1. Eutroficación

De acuerdo con Herper (1992) y Mazzeo (s.f.), El término *eutroficación* o *eutrofización* se refiere al enriquecimiento de cuerpos de agua con nutrientes y sus efectos, que se observan como una intensa manifestación y acumulación excesiva de microalgas y plantas superiores.

La eutroficación es un proceso que se da en todos los cuerpos de agua, y consiste en el aporte de nutrientes a estos a través de la escorrentía durante periodos de tiempo extremadamente largos, en los cuales la vegetación comienza a crecer desde las márgenes de los lagos y lagunas hacia el centro, mientras que los sedimentos arrastrados al vaso disminuyen gradualmente su volumen. Cuando la maleza ha ocupado todo el espejo de agua de una laguna, ésta se transforma en un humedal, y finalmente en un ecosistema terrestre (Mazzeo, s.f.).

El origen de la eutroficación puede ser natural o antropogénico (también conocido como cultural), en este caso, como consecuencia de la deposición de residuos agrícolas e industriales. La eutroficación como problema ambiental cobró importancia en la segunda mitad del siglo XX (ver figura 2.1), aunque se sabe que el hombre lleva cientos de años aprovechando los beneficios de enriquecimiento artificial de embalses para la cría de peces (Harper, 1992).

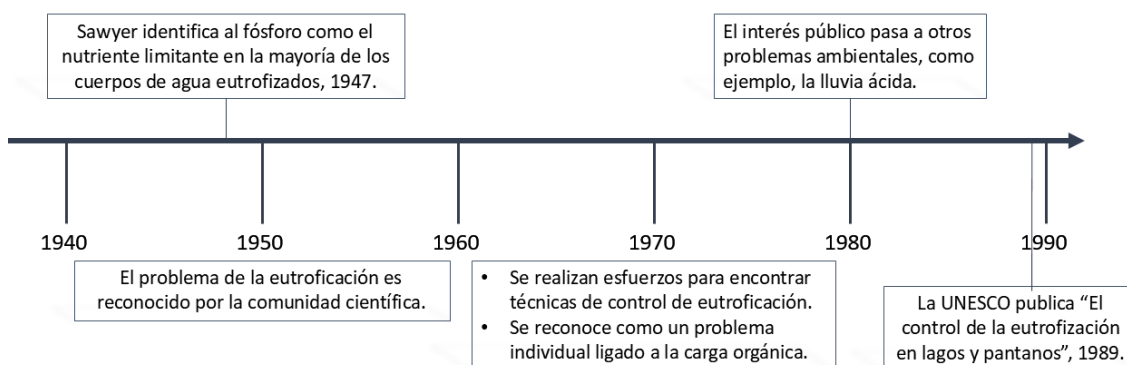


Figura 2.1: Línea del tiempo que muestra el interés público global respecto a la eutrofización durante la segunda mitad del siglo XX. Elaboración propia con datos de Harper (1992).

La problemática actual radica en la extensión e intensificación del fenómeno a nivel global, y a nuestra aparente falta de control sobre la producción y manejo de nutrientes, así como sus efectos en ecosistemas acuáticos.

Dentro del proceso de envejecimiento de los cuerpos de agua, o de eutrofización, se distinguen tres etapas:

- *Oligotrofia*. Baja concentración de nutrientes y productividad biológica.
- *Mesotrofia*. Niveles intermedios de nutrientes y productividad media.
- *Eutrofia*. Elevada concentración de nutrientes y alta productividad.

En el caso de la laguna de Zupitlán, se reporta la existencia de aportaciones puntuales provenientes de industrias queseras localizadas en las inmediaciones (Morales, 2015), además de que a partir de microorganismos indicadores se ha establecido ya que el cuerpo de agua está en un estado eutrófico (Cruz, 2009). De continuar el proceso de eutrofización que tiene lugar en la laguna se corre el riesgo de acelerar su proceso de envejecimiento radicalmente.

Las consecuencias de la eutrofización en la laguna de Zupitlán pueden ser diversas y de magnitudes variadas, sin embargo, se ven potenciadas por la importancia de

sus usos actuales. De continuar un florecimiento masivo de microalgas en el embalse¹, éste podría secarse en su totalidad en el transcurso de décadas, dejando sin fuentes de abastecimiento para riego y consumo humano a una población ya vulnerable.

De ser este el destino final de Zupitlán, los pobladores de la comunidad de Los Pocitos (Municipio en el que se encuentra la laguna) se verían afectados severamente mucho antes de que el embalse se extinguiera, pues la fauna de los lagos eutróficos es generalmente poco diversa y está compuesta por especies tolerantes a bajas concentraciones de oxígeno disuelto, no necesariamente de un alto valor comercial (Harper, 1992). Esto obligaría a la comunidad, que se sostiene ampliamente de la pesca en la laguna, a buscar nuevas formas de subsistencia. Para entender la secuencia del deterioro biológico que sufre un cuerpo de agua debido a la eutroficación, obsérvese la figura 2.2.

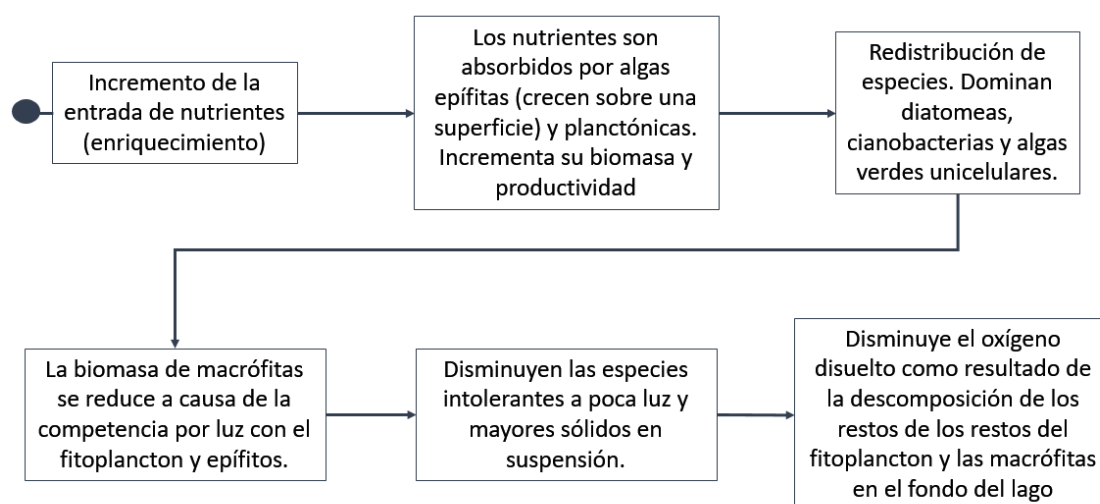


Figura 2.2: Secuencia genérica de cambios biológicos ocasionados por la eutrofización en un cuerpo de agua. Elaboración propia con datos de Harper (1992).

¹Se conoce como florecimiento, o Bloom, del inglés; a la acumulación masiva de microalgas en el agua, ya sean de una misma especie o de especies diferentes, alcanzando una concentración de 10^4 a 10^6 células por metro cúbico (Novotny, 2009).

2.1.1. Nutrientes que causan la eutroficación

Existen alrededor de 40 nutrientes requeridos para la vida, que pueden dividirse en aquellos indispensables en grandes cantidades (*macronutrientes*) y los *micronutrientes* o elementos traza, que son necesarios en cantidades más pequeñas (Harper, 1992).

De todos los elementos derivados de la corteza terrestre, presentes en el tejido vegetal, el fósforo y el selenio son los únicos cuya abundancia (proporcional) es menor en la litósfera que en las plantas. Esta es la razón por la cual el fósforo se utiliza como un macronutriente limitante en el estudio de plantas y algas (el selenio se descarta para estos fines por pertenecer al grupo de elementos traza).

De los elementos presentes en la atmósfera y la hidrósfera (siendo: carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno los más representativos), el nitrógeno resulta ser el limitante (entiéndase por *limitante*, al de menor abundancia) debido a que sus más grandes reservas se encuentran en forma gaseosa y no son aprovechables por las plantas de forma directa, mientras que el carbono es soluble en agua, y el oxígeno e hidrógeno forman la molécula de agua.

2.1.2. Nutriente limitante

Desde la década de 1940 se observó que el proceso de eutroficación era similar a la adición intencional de fertilizantes a base de fósforo, nitrógeno y potasio para acelerar y mejorar el crecimiento de cultivos en la agricultura. En el caso de la eutroficación, como se hizo notar en el apartado anterior, se observa que son el nitrógeno y el fósforo los macronutrientes limitantes en la biósfera.

Luego de realizarse experimentos durante la década de 1970, pudo concluirse que bastaba la adición de fósforo y nitrógeno para propiciar un florecimiento de fitoplancton, sin importar las combinaciones y proporciones de terceros nutrientes en lagos de Suiza (Harper, 1992).

De forma paralela a la agricultura, Liebig hace notar que, de acuerdo a las necesidades particulares de un cultivo, su rendimiento máximo está limitado por el macronutriente más escaso en el entorno (Ryding, 1989), principio que puede aplicarse al rendimiento de las colonias de microalgas en cuerpos de agua lénticos. Ya que se ha concluido, que de todos los macronutrientes, los limitantes son el fósforo y

el nitrógeno, se requiere saber cuál de ellos controla el desarrollo de las microalgas en la Laguna de Zupitlán.

Es de advertir que el concepto de reactivo limitante aplica únicamente a condiciones de estado estacionario y no a un cuerpo de agua con entradas intermitentes de fósforo y nitrógeno (*Ibid*). Como se verá más adelante, la Laguna de Zupitlán puede considerarse, a razón de su batimetría y funcionamiento hidráulico, un reactor en estado estable perfectamente mezclado.

Al principio de los esfuerzos globales para comprender la eutrofización cultural, la investigadora Clair Sawyer en 1947 se enfocó en el análisis de los efectos del enriquecimiento de lagos que recibían escurrientías agrícolas de nitrógeno, fósforo y potasio (Harper, 1992).

Sawyer probó que el fósforo era el elemento clave que controla la productividad de microalgas en lagos de Wisconsin, E.E.U.U., con florecimientos de algas ocurriendo a partir de concentraciones de fósforo inorgánico mayores a $10\mu\text{g}/\text{l}$. De sus investigaciones se sabe que la escurrientía agrícola contiene, aproximadamente, 18 veces más nitrógeno que fósforo.

La laguna de Zupitlán, como puede observarse en el capítulo 5, sigue esta proporción nitrógeno:fósforo (para las formas analizadas de dichos nutrientes en este trabajo), con una razón 14:1 para la época de lluvias y 18:1 para el estiaje. A partir de esto se comprueba que las algas de la laguna de Zupitlán están limitadas por la disponibilidad de fósforo en el agua, sin mostrar cambios estacionales durante el año (Harper, 1992; Ryding, 1989).

Ryding (1989) en su reporte para la UNESCO sugiere que el fósforo sea considerado el nutriente limitante por antonomasia en lagos templados, tanto por su proporción en relación con otros macronutrientes (como el carbono y el nitrógeno), como por la relativa facilidad de extracción de las aguas residuales mediante métodos estandarizados.

2.1.3. Factores y procesos que afectan el grado de eutroficación

Factores naturales

Los factores que afectan la productividad de un embalse, y por tanto su grado de eutrofia, tienen relación con las características de su cuenca de drenaje y se incluyen su localización, clima, hidrología, geología y fisiología geoquímica. En este apartado se estudian brevemente los efectos que el clima y la hidrología de la cuenca tienen sobre la eutroficación.

- CLIMA. Regula las estaciones de estiaje y lluvias, las entradas y las salidas de agua (y nutrientes) en cuerpos de agua y su oxigenación a través del oleaje provocado por los vientos.

Se ha encontrado (Ryding, 1989) que la latitud de los lagos (un parámetro que engloba los efectos de la duración del día, el ángulo de incidencia de los rayos solares, la duración de la estación de crecimiento de microalgas y las temperaturas del agua y el aire) es la variable más fuertemente relacionada con la producción de fitoplancton. Mientras más cerca del Ecuador, más productivo el cuerpo de agua.

- HIDROLOGÍA. En una cuenca de drenaje, a mayor precipitación, mayor es la cantidad de agua, sedimentos y nutrientes arrastrados. El aumento de la precipitación en época de lluvias no implica, sin embargo, un incremento infinito en el arrastre de sedimentos, pues la mayor disponibilidad de agua ocasiona el crecimiento de una capa vegetal que hace las veces de recubrimiento del suelo, evitando su erosión.

La erosión y transporte de sedimento serán máximos en cuencas con precipitaciones mayores a 120mm y menores a 700mm (*Ibid*), debido a que el agua es suficiente para erosionar el terreno, pero no para generar una capa vegetal sobre éste. Zupitlán, con su precipitación media anual de 600mm entra en este intervalo.

En cuencas con bajos impactos ambientales humanos los aportes de fósforo tienen su origen en la precipitación atmosférica y el desgaste de la cuenca

geológica y su consiguiente escorrentía hacia cuerpos de agua lénticos; y están directamente relacionados con su área de captación total.

Factores culturales: Los efectos de la agricultura en el arrastre de nutrientes desde fuentes difusas

El uso intensivo de suelos para fines agrícolas afecta el ciclo conservativo de reciclaje de nutrientes que ocurre de forma natural. Las pérdidas que experimentan los suelos en fósforo y nitrógeno aumentan en frecuencia e intensidad a la par del crecimiento demográfico.

La tala de bosques y selvas para el pastoreo de animales y el aprovechamiento de suelo agrícola, seguida de la aplicación de herbicidas para la inhibición del crecimiento de plantas, provoca la erosión de los suelos y el arrastre de nutrientes en las cuencas hidrológicas.

Aunque ha sido demostrado que en cuencas deforestadas, la ralentización y disminución de la pérdida de nutrientes, provocada por el intemperismo, puede lograrse en periodos cortos si se permite el crecimiento de la vegetación original del lugar (Harper, 1992). Esta recuperación de la capacidad de retención de nutrientes no ocurre en pastizales (que suelen ser el primer paso de la intervención humana hacia el desarrollo agrícola-pecuario de una región, y son el elemento dominante del paisaje de Zupitlán), en los que la escorrentía de fósforo y nitrógeno es aproximadamente el doble de la ocurrida en el terreno no alterado.

La adición de fertilizantes es una práctica común si se desea incrementar el rendimiento de las pasturas, y trae consigo mayores pérdidas de nutrientes. Se estima que en épocas de lluvia abundante, del 10 al 40 % del nitrógeno añadido como fertilizante puede terminar siendo arrastrado por la precipitación. Harper (1992) puntualiza que mientras más se intensifica el uso del suelo con fines agrícolas, mayor serán las pérdidas de nutrientes, cuya carga precisa depende del tipo de suelo, su permeabilidad, las lluvias, la naturaleza y extensión de la cubierta vegetal, la naturaleza y cantidad de fertilizantes añadidos y la densidad de animales domésticos.

Se considera que las altas pérdidas de nutrientes en suelos agrícolas son un fenómeno reciente, pues hasta hace 70 años la mayor parte de la fertilización de pasturas se realizaba a base de estiércol sólido, mismo que no genera mayores problemas de pérdida de nutrientes.

Actualmente el estiércol se utiliza en forma líquida (el concentrado proveniente de varias cabezas de ganado) o acompañado de fertilizantes artificiales. En países desarrollados el uso de fertilizantes nitrogenados se ha incrementado hasta seis veces, reflejando la tendencia mundial del cambio de fertilizantes naturales a artificiales y de pastizales a suelo arable (Harper, 1992).

Para el caso de los animales de cría, las cargas de fósforo de todos los países desarrollados han crecido debido a cambios en su manejo. Desde la segunda mitad del siglo pasado el número de animales en pastoreo extensivo y ganadería intensiva ha crecido. Los animales criados en granjas intensivas suelen ser alimentados con ensilado (forraje compostado) en lugar de pastura seca, lo que provoca desechos acuosos con mayor potencial de pérdida de nutrientes.

Harper (1992) estima que en 1978, en Inglaterra, el fósforo y nitrógeno liberado al ambiente a través de excretas de ganado, igualó al de la producción anual de fertilizantes artificiales.

La consecuencia de los desechos de ganado, en términos de la eutroficación, es el aumento de la escorrentía de nutrientes y, en el caso de la ganadería intensiva, la creación de fuentes de contaminación puntual de contaminación como producto de la aglomeración de animales, lo que puede provocar un problema, tanto de enriquecimiento de nutrientes, como de contaminación orgánica en los cuerpos de agua.

Las excretas del ganado tienen cantidades de nutrientes que exceden aquellas de los desechos humanos, a lo que se suma el hecho de que los animales de granja producen 10 veces más desechos que su equivalente en población humana (harper, 1992).

En el sitio en el que este trabajo fue desarrollado no está presente el uso de suelo urbano, que es la forma más intensiva e impactante de alteración de la superficie terrestre, por lo que no se hará mayor mención al respecto en este apartado. No obstante, se ha considerado importante rescatar el gráfico de sucesión genérica de Lindeman (Harper, 1992), que presenta el patrón histórico más común para lagos templados. En esta figura (2.3) puede apreciarse un ligero aumento en la productividad de los ecosistemas acuáticos a partir del establecimiento rudimentario de la agricultura, mismo que se mantuvo más o menos constante hasta la revolución industrial, cuando se dispara la productividad y se alcanza la eutrofia debido a la aglomeración de personas y sus correspondientes descargas de agua residual.

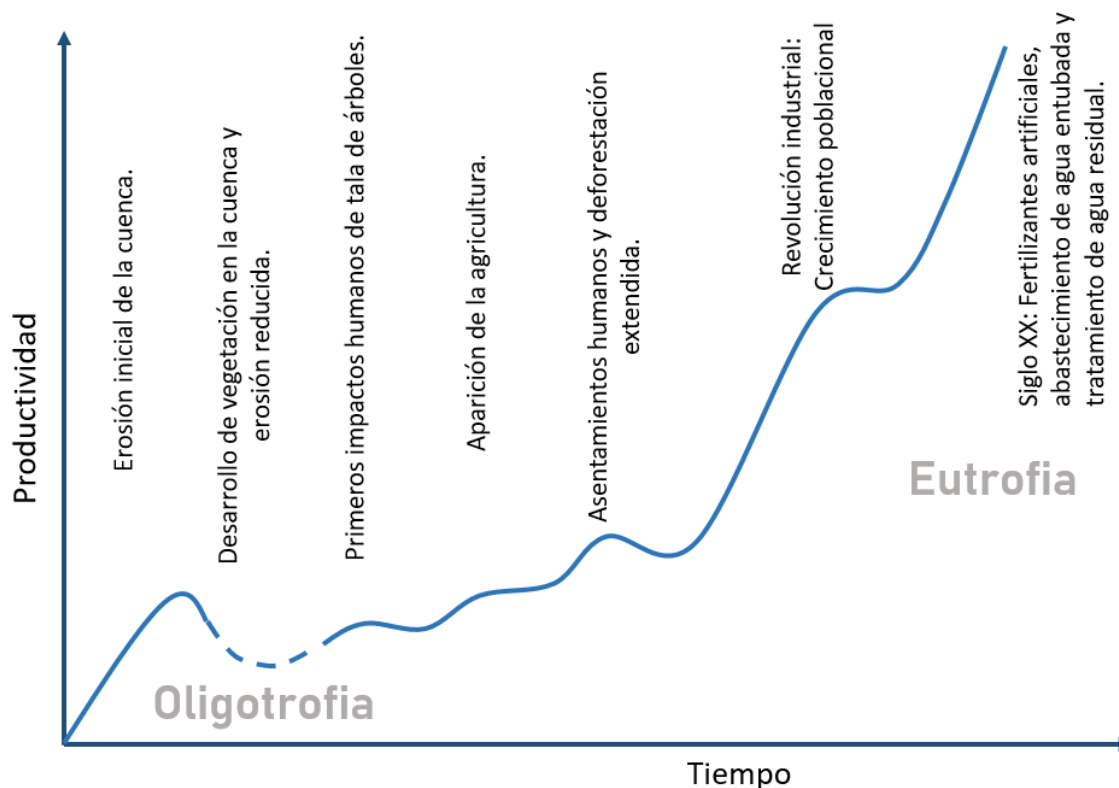


Figura 2.3: Patrón temporal usual de lagos templados al norte del Ecuador, en un periodo posglacial (Holoceno, 10,000 a.C.). Tomado de Harper (1992).

2.1.4. Carga interna de nutrientes

La carga interna de nutrientes es consecuencia de la descomposición de la materia orgánica en el sistema *per se*. La principal fuente de nutrientes del embalse son los sedimentos (o detrito) en el fondo, el cual funciona como trampa o liberador de nutrientes, en función de las condiciones de óxido-reducción (Mazzeo *et. al*, sin fecha).

Si la superficie del detrito está oxidada (naturalmente se requiere la presencia de oxígeno disuelto en el agua) el hierro se presenta en forma de un precipitado férrico en estructura coloidal que previene el intercambio de fosfatos en la interfase detrito-agua (Harper, 1992).

El reciclaje de nutrientes provocado por la carga interna de éstos en un lago es capaz de mantener su estado eutrófico por años, a pesar de haber logrado el control de las cargas externas (Ryding, 1989).

2.2. La contaminación del agua en regiones agrícolas

En el estado de Hidalgo, el 18.5 % de la población ocupada (216 mil 428 personas) se dedica a actividades primarias (aquellas relacionadas con la agricultura, la ganadería, la silvicultura, la caza y la pesca) (Gobierno de Hidalgo, 2016).

Es de esperar que dichas actividades, como cualquier otra realizada por el ser humano, tengan asociadas desperdicios con la capacidad de alterar la calidad *natural* del agua de los ríos y reservorios que los reciben. En esta sección se proporcionan la teoría general sobre los mecanismos más comunes de afectación de la calidad del agua encontrados en cuerpos de agua continental a nivel mundial, y en particular en emplazamientos similares al que alberga a la Laguna de Zupitlán.

2.2.1. El cuerpo receptor

El agua, antes de convertirse en agua residual, es tomada para su aprovechamiento de fuentes que pueden ser subterráneas o superficiales, estas últimas pueden ser lénticas (como la laguna de Zupitlán) o lólicas, como son los ríos.

De acuerdo con CONAGUA se tienen las siguientes definiciones:

- *Aguas superficiales*. Agua que fluye o se almacena en la superficie de la corteza terrestre en forma de ríos, lagos o embalses artificiales como presas, bordos y canales (Estadísticas del agua, 2013)
- *Léntico*. Cuerpos de agua cuyo contenido de líquido se mueve básicamente dentro de la depresión del terreno donde se hallan, y lo hace principalmente con movimientos convectivos con un recambio de aguas más o menos limitado. Concepto aplicado a las aguas estancadas, como pantanos, estanques, lagos y los humedales, que son cuerpos de agua someros (Estadísticas del agua, 2015).

En la sección 4.1 se abordan los mecanismos de recepción de agua de la laguna, así como la posible naturaleza de sus flujos interiores.

2.2.2. Contaminación puntual y no difusa

No obstante que la mayor parte de la población del estado de Hidalgo se dedica a las actividades terciarias (Gobierno de Hidalgo, 2016), territorialmente el estado tiene una vocación agrícola, con sólo un 9 % del territorio dedicado a fines distintos a la agricultura (Islas, 2011).

Otras actividades contaminantes son la agricultura y la ganadería. La primera requiere que el ganado tenga un espacio de pastoreo -las márgenes de la laguna- (ver figura 2.4) mismo en el que sus excreciones son depositadas, las excretas del ganado son ricas en nutrientes, y pueden ser arrastradas por la lluvia hasta alcanzar la laguna, o infiltrarse en el subsuelo hasta contaminar el acuífero, del que también se alimenta la laguna.

Debido a lo anterior, fue necesario considerar la elaboración de un cálculo de la carga de fósforo y nitrógeno que recibe el cuerpo de agua a partir de valores conocidos de producción de estos nutrientes, ya sea por habitante, cabeza de ganado, etc. Esto se logra con base en un análisis estadístico de las aportaciones que se reciben en la cuenca. Esto puede encontrarse en el apartado 4.4

En el caso de la agricultura, una práctica común es el uso de fertilizantes, que pueden ser naturales (estiércol) o de origen químico (se utilizan también plaguicidas que pueden producir subproductos tóxicos). En ambos casos, sus residuos pueden ser arrastrados por la precipitación hasta la laguna o percolarse al acuífero.

Las fuentes de contaminación que se han mencionado en este apartado pueden clasificarse como:

- *Fuentes de contaminación no puntuales o difusas.* Son aquellas descargas que se generan sin que se conozca dónde se originaron, quién fue el responsable de la contaminación, ni cuánto contribuyó en ésta (Aguilar, 2007). Se trata de descargas cuyos efectos ambientales pueden ser cuantificados, pero que, sin embargo, no tienen un punto conocido de origen (en la figura 2.4 puede verse a un grupo de vacas pastando a orillas de la laguna de Zupitlán, éstas pueden considerarse fuentes de contaminación difusa).



Figura 2.4: Ejemplo de contaminación difusa a las orillas de la laguna de Zupitlán

Otras características de las fuentes no puntuales de contaminación es que están en función de las condiciones hidrometeorológicas de la región, además de que se consideran de difícil medición y control directo.

Las fuentes difusas en las cuencas están representadas por la agricultura, la ganadería y pequeñas cantidades de suelo no alterado (Geraldí, 2011). En el caso de la agricultura, la FAO (2004) estima que entre los años 1993 y 2004 el uso de fertilizantes aumentó seis veces, lo que directamente provocó el incremento de nutrientes en aguas superficiales.

- *Fuentes de contaminación puntuales.* Son aquellas fuentes para las cuales la detección de la procedencia de la descarga resulta más sencilla.

Para las fuentes puntuales resulta más fácil lograr un control y cuantificación. Se considera a las plantas de tratamiento de agua residual como fuentes de contaminación puntual (Rincón, 2009). Cabe señalar que durante la década de 1970, al colocar plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR's) en las desembocaduras del alcantarillado urbano y rural hacia los grandes lagos de América del norte, a pesar de que el efecto ambiental a largo plazo fue positivo, una consecuencia inmediata de las descargas fue el aumento de la eutrofización, pues las PTAR's facilitaban el nitrógeno y fósforo orgánico (una forma fácilmente aprovechable) a las microalgas (Harper, 1992).

En terrenos cercanos a la laguna pueden encontrarse tuberías de agua residual (se desconoce si con algún nivel de tratamiento) que descargan directamente al suelo, estas descargas son un claro ejemplo de contaminación puntual, y pueden

observarse en la imagen 2.5.



Figura 2.5: Ejemplo de contaminación puntual en las cercanías de la laguna de Zupitlán. Tomado de Morales (2015)

En términos de los efectos que la contaminación, ya sea puntual o difusa, puede provocar, el más importante de ellos es la eutroficación, un fenómeno causado por el crecimiento excesivo de malezas acuáticas, debido a la alta cantidad de nutrientes que recibe un cuerpo de agua.

La eutroficación en la laguna de Zupitlán está directamente relacionada con las actividades humanas que se desarrollan en su área de influencia.²

2.3. Índices de calidad del agua

Los índices de calidad del agua (ICA's) tienen como finalidad la presentación de forma condensada de los resultados de múltiples muestreos, en un único valor que pueda describir la calidad del agua de un embalse (Hébert, 1996).

Los diferentes índices de calidad del agua que podemos encontrar son los siguientes (Poonam et al., 2015).

²El *área de influencia* es un concepto usado en estudios de impacto ambiental, y está definida como "la distribución espacial de los posibles impactos y efectos que generará un proyecto (UNAD, 2016)". En este trabajo no se evalúa el impacto de un proyecto, sino del conjunto de actividades productivas que se realizan en la cuenca.

- **Índices públicos**

Ignoran el uso final del agua en el proceso de evaluación de calidad, que se desarrolla de forma general.

- **Índices de consumo específico**

Están enfocados en la calificación del agua, ya definido el uso que ésta recibirá (consumo humano, industrial, preservación de los ecosistemas, etc.).

- **Índices de diseño y planeación**

Se desarrollaron para la toma de decisiones dentro de un proyecto hídrico particular.

- **Índices estadísticos**

Utilizan técnicas de análisis estadístico de datos para eliminar la subjetividad que tienen los tres índices anteriores, también conocidos como “de opinión experta”.

Para la generación de los primeros tres tipos de índices de calidad del agua es necesario contar con datos crudos a partir de un muestreo en el cuerpo de agua (ver apartado 4.10).

A través de distintos tipos de transformación estadística, los datos se convierten en subíndices adimensionales. De acuerdo con el impacto que cada parámetro pueda tener en la calidad del agua, se le asigna un peso (de acuerdo a la opinión de expertos en el área).

Una vez hecho esto, se suman los subíndices para tener un valor acumulativo que termina por analizarse para dictar una calidad del agua (*Ibid*).

Capítulo 3

Zona de estudio

En este capítulo se establecen las generalidades socioeconómicas, históricas e hidrometeorológicas del estado y la localidad a la que pertenece la laguna de Zupitlán. Información más concreta sobre la microcuenca de la laguna puede encontrarse en el apartado 4.1.

3.1. Hidalgo

El estado de Hidalgo es un atractivo turístico imperdible para los habitantes de la capital del país y la zona conurbada de la Ciudad de México, tan sólo durante el periodo del 31 de enero de 2014 al 3 de febrero de 2015 se registraron en total 254,184 visitantes, que se tradujeron en una ocupación hotelera del 87 %, dejando una derrama económica de más de 60 millones de pesos. Para tener un punto claro de comparación, durante las vacaciones de semana santa del mismo año, la derrama económica en Hidalgo fue de 618 millones de pesos (STC, 2015), por debajo sólo por un 28 % de las ganancias obtenidas en el mismo periodo por el puerto de Acapulco (Pigeonutt, 2015), que es el tercer destino más visitado de nuestro país a nivel mundial (SECTUR, 2016).

De la ocupación hotelera total a la que se ha hecho mención, el 58.7 % corresponde a balnearios y parques naturales, esta cifra muestra que del total de la actividad turística de Hidalgo, más de la mitad corresponde a sitios con características como las de la laguna de Zupitlán, que sirven para el esparcimiento, el recreo y el ecoturismo.

A pesar de la importancia del turismo, la agricultura, en términos de ocupación

territorial, representa la principal actividad de la región (junto con la ganadería, la silvicultura y la pesca)¹, pues el área sembrada en 2013 era de 577,000 hectáreas, lo que representa el 27.7 % del área estatal (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 2016) -cifras de PEMEX (2015) estiman el área destinada a la agricultura en Hidalgo en 9,000 km², lo que elevaría el porcentaje de terreno destinado a esta actividad en el estado hasta un 43.3 %- . Aunado a esto el estado se encuentra en la posición 13 a nivel nacional en cuanto a producción agropecuaria.

Si al uso agrícola de las aguas, tanto de ecosistemas lénticos como lóticos² se añade la explotación para consumo humano (de una población siempre en crecimiento), puede verse la importancia del cuidado del recurso hídrico estatal.

Es importante mantener el equilibrio entre actividades tan importantes como son el turismo y la agricultura. Una actividad agrícola contaminante y no sostenible pone en riesgo la afluencia turística, pues, como se ha visto, son los paisajes naturales importantes atractivos para los miles de visitantes que se dan cita en el estado de Hidalgo, y una contaminación excesiva de ríos y lagos harían imposible el desarrollo de cualquier actividad en ellos (incluso de cualquier forma de vida) y mermarían su atractivo y productividad.

El estado de Hidalgo se ubica entre las coordenadas 19°35'52" y 21°25'0", latitud norte; 97°52'27" y 99°51'27", longitud oeste (Morales, 2015); en la zona centro de la República Mexicana.

La zona de estudio se considera como parte de los valles altos centrales del altiplano centrales del altiplano meridional, y es parte principal del Valle de Tulancingo (*Ibid*), con una altitud promedio de 2130 metros sobre el nivel del mar.

El Valle de Tulancingo (diferente al municipio de Tulancingo) es una de las 10 regiones geográficas y culturales del estado de Hidalgo (véase figura 3.1), y está constituido por diferentes poblados, entre los que se encuentran el Municipio de Acatlán y el municipio de Tulancingo (ambos de importancia económica para la región).

¹Juntas, estas actividades suman lo que se conoce como "Actividades primarias"

²*Lénticos*: cuerpos de agua cuyo contenido de líquido se mueve básicamente dentro de la depresión del terreno donde se hallan. Concepto aplicado a cuerpos de agua sin movimiento, como los lagos. *Lóticos*: cuerpos de agua que se mueven en una dirección. El término se utiliza para el agua corriente, como la de los ríos (CONAGUA, 2013).



Figura 3.1: Regiones geoculturales en las que se divide el estado de Hidalgo. Tomado de Sánchez Martínez, 2014.

3.2. Acatlán

Historia

*El nombre (Acatlán) deriva de las raíces náhuatl, acatl “caña”, y lan “junto a”, por lo que se traduce “junto a las cañas.” cañaveral.
(Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México)*

A la llegada de los españoles, Acatlán figura como un pueblo más que pagaba tributo a los mexicas. Sus registros de gobierno más antiguos se remontan al año 1564, cuando el lugar era ya administrado por los españoles.

El sistema de haciendas comienza a finales del siglo XVI, cuando los movimientos administrativos de tenencias y administración se hacían en la alcaldía mayor de Tulancingo. A este periodo corresponde la formación de la hacienda de Zupitlán (lugar en el que se encuentra la laguna homónima).

Durante 1700 comenzaron una serie de despojos arbitrarios de tierras a los pobladores de la región (de nuevo se encuentra el arrebato del “Casco de la hacienda de

Zupitlán”), lo que provocó que muchos de los colonos se unieran a la lucha de independencia en 1821.

En la historia actual, el municipio se erigió como tal el 16 de enero de 1869 (Cuatrecotzco, 2010). Actualmente la Laguna de Zupitlán se encuentra en la Colonia 28 de Mayo en Santa Rosa (PEMEX, 2015).

Localización y extensión

Acatlán se encuentra a $20^{\circ}9'$ latitud norte y $98^{\circ}26''$ longitud oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 2120m. Se encuentra a 10km dirección noroeste de la ciudad de Tulancingo y a 147km de la Ciudad de México.

El municipio tiene un área de 243km^2 y representa el 0.83% de la superficie del estado(*ídem*). En la figura 3.2 puede verse la ubicación del municipio dentro del estado de Hidalgo.



Figura 3.2: Ubicación del municipio de Acatlán dentro del estado de Hidalgo. Adaptado de la “Enciclopedia de municipios y delegaciones de México”, 2010.

Hidrología y clima

Hidrológicamente Acatlán se ubica en la región hidrológico-administrativa Golfo norte (Morales, 2015), la cual tiene la subcuenca de Metztitlán cubriendo el municipio en su totalidad.

Las corrientes de agua que se ubican en el lugar son: Grande Tulancingo, Los Enlamederos, Las Vegas, El Meco y Salto de Alcholoya.

Los climas que dominan la región son templados, la temperatura media anual oscila en 14°C y se tienen precipitaciones anuales medias de 600mm.

Perfil socioeconómico

Con datos del INEGI para 2015, el municipio cuenta con un total de 21,044 habitantes.

De acuerdo con la “Enciclopedia de los municipios de Hidalgo” (2016), en cuanto a educación, la comunidad ofrece servicios que van desde el preescolar hasta la secundaria. De entre la población mayor de 15 años, 12317 habitantes saben leer y escribir, mientras que 1837 son analfabetas (el 13 % de los individuos mayores de 15 años se encuentran en esta condición).

El 19 % de la población vive en lugares sin drenaje o excusado, el 20 % no cuenta con agua entubada (aunque el reporte de la Enciclopedia de Municipios del estado (2016) indica que la cobertura de agua potable es del 94 %, lo que indica que el transporte del agua no se hace a través de una red de distribución por tuberías, sino por pipas y pozos sin conexión directa a los hogares), el total de la población está en comunidades de menos de 5000 habitantes y la población ocupada con un ingreso de hasta dos salarios mínimos es del 50.96 %; lo que, según CONAPO (2010), sitúa a Acatlán en índice de marginación³ de 0.165 (medio), colocando al municipio en el lugar número 29 en cuanto a marginación dentro del estado.

³Según CONAPO, el índice de marginación es la medida del déficit y de intensidad de las privaciones y carencias de la población, en dimensiones relativas a las necesidades básicas establecidas como derechos constitucionales

El 43 % de la población económicamente activa en el municipio se dedica a actividades primarias. Esto quiere decir, que las actividades económicamente más importantes de la región son la agricultura y la ganadería (Cuatepotzo, 2012).

Acatlán, en relación con los demás municipios de Hidalgo, sufre un grado de marginación media. A nivel nacional, el municipio presenta condiciones regulares de vida, con: tasas elevadas de población con carencia alimentaria y con salario por debajo del mínimo de bienestar; un alto grado de viviendas con algún tipo de hacinamiento y sin sanitario, energía eléctrica, agua entubada y drenaje; un porcentaje elevado de jóvenes que no asiste a la escuela y poca población ocupada (PEMEX, 2015).

Según información del mismo reporte de PEMEX (2015), en Acatlán hay una sola planta de tratamiento de agua residual en construcción, y no existen rellenos sanitarios, por lo que los desechos se disponen a 2.5km de la cabecera municipal.

Las dos atracciones turísticas más importantes de la región son las aguas termales de San Pablo y la laguna de Zupitlán (Cuatepotzo, 2012).

3.3. Laguna de Zupitlán

Se ha mencionado anteriormente que se considera importante establecer un perfil de calidad de agua de cuerpos de agua relativamente pequeños dentro de la República Mexicana, afirmación que se sustenta si se considera que la laguna de Zupitlán no figura entre los cuerpos de agua registrados por el INEGI para el estado de Hidalgo (INEGI, 2012), lo que sugiere que puede perderse sin siquiera haber registro de su existencia, fuera del de la memoria de sus pobladores y de los contados trabajos que versan sobre ella. No puede existir un antes y un después, en términos de la evaluación de impacto ambiental de un lugar, si no se han sentado las bases del análisis de calidad ambiental.

La Laguna de Zupitlán es un cuerpo de agua léntico de régimen perenne, que cuenta con una superficie de $0.717km^2$, capacidad de 953 mil metros cúbicos y una profundidad calculada promedio de 1.3m. Las principales fuentes de recarga de la laguna son la precipitación pluvial, las escorrentías y una recarga subterránea que ocurre en su sección suroeste (Ávila, 2009).

Hasta hace menos de veinte años, la piscicultura representaba una fuente importante de ingresos para los habitantes de la región, sin embargo, en los últimos 12

años la actividad ha ido en decremento, debido a la emigración que ha tenido lugar en la región, y a que los peces que pueden encontrarse son de menor tamaño cada vez (*Ibid*).

De las 110 hectáreas que conforman la laguna, 88 están invadidas por vegetales acuáticos, lo que provoca que el gasto extraíble de la laguna disminuya en época de estiaje (Morales, 2015), lo que afecta la producción de maíz, alfalfa y frijol; los principales productos cosechados en la zona (Ávila, 2009).

Durante los últimos treinta años, de acuerdo a entrevistas con habitantes de la zona, ha sido la población de la comunidad de Los Pocitos la encargada de dar mantenimiento y cuidado a la laguna, retirando el tule de sus orillas y buscando descargas clandestinas de agua residual provenientes de los terrenos aledaños.

Lo anterior demuestra que el interés de la comunidad por la salvaguarda del recurso hídrico concentrado en Zupitlán existe, más no el conocimiento y apoyo técnico que haga eficientes las acciones de la población civil.

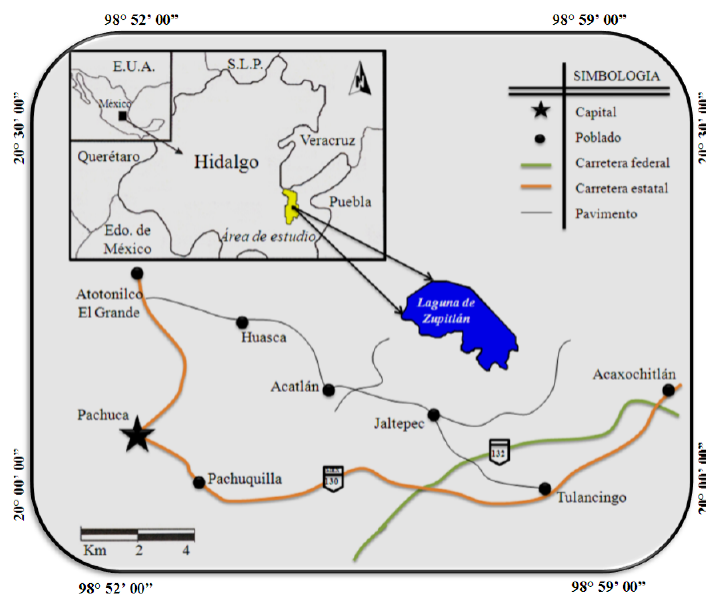


Figura 3.3: Ubicación de la laguna de Zupitlán. Tomado de Ávila, 2009.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Delimitación de la zona de influencia

La zona, o área de influencia ambiental, corresponde al territorio donde se presentarán y percibirán los probables impactos ambientales (CESEL, 2010). La SEMARNAT (2005) sugiere que el establecimiento adecuado de la zona de influencia es de vital importancia para la elaboración de una manifestación de impacto ambiental.

En el caso del presente trabajo, a pesar de que no se trata de un proyecto constructivo y sus posibles futuros impactos, se requiere conocer el territorio que afecta de forma directa o indirecta la calidad del agua de la laguna de Zupitlán, por lo que la *zona de influencia* será aplicable al estudio. Abundando un poco más en la diferencia entre este documento y una manifestación de impacto ambiental tradicional (MIA), la MIA debe de establecer el *estado cero* o *estado sin proyecto* del sistema ambiental en cuestión, antes de comenzar la identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales (SEMARNAT, 2005), mientras que este estudio se dedica a caracterizar y elaborar un diagnóstico del *estado actual*, con el fin de conocer a profundidad el nivel de afectación ambiental, así como los factores que deterioran la calidad ambiental de la laguna.

Los límites de la zona de influencia pueden derivar de la aplicación del criterio respectivo que más se ajuste a las características del sistema ambiental donde esta se ubique. Para el caso de la Laguna de Zupitlán, se ha determinado que el criterio que mejor define la zona de influencia es el de la cuenca hidrológica.

Se define a la cuenca hidrológica como:

Unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas -por aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad- en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desembocuen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos relacionados con éstos y el medio ambiente (CONAGUA, 2015).

Así pues, el área de influencia quedará definida por la cuenca de la laguna de Zupitlán, constituida por las cuencas aportantes, desde sus nacientes hasta su desembocadura, y el área correspondiente a la laguna misma (CMPRALTA, 2014).

El primer acercamiento a la definición de la cuenca de la laguna de Zupitlán se realizó utilizando las herramientas del software ArcGis (ArcMap 10.3) para la delimitación de cuencas a través de la creación de un modelo tridimensional (modelo ráster) del terreno a partir de cartas topográficas 1:50,000 proporcionadas por el INEGI de manera gratuita (INEGI, 2017). El programa elaboró una cuenca aguas arriba de la laguna, sin embargo esta resultó ser de una naturaleza tan extensa (varios cientos de kilómetros cuadrados) que su análisis resultaba virtualmente irrealizable para los alcances de este estudio (ver figura 4.1). Es posible que la cuenca resultara ser tan grande debido a la falta de detalle de las cartas topográficas que se encontraron para la zona (E14B11, E14B12, E14B13, E14D71, E14D72, E14D73, E14D81, E14D82 y E14D83, de acuerdo a su clasificación por INEGI), así como a la naturaleza regular (en términos de altitud) de la zona de la laguna.

Habiendo descartado la cuenca creada por ArcGis, se recurrió al Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas, SIATL versión 3.1¹, de INEGI; que ofrece el cálculo de la cuenca aguas arriba de cualquier punto dentro de ríos o cuerpos de agua.

¹SIATL es un esfuerzo de INEGI para la generación de datos espaciales enriquecidos con topología de redes geométricas. La red hidrográfica escala 1:50,000 modela los escurrimientos de agua en cuencas hidrográficas e incluye funciones para análisis de cuencas, cálculo de caudales y trayectoria de los flujos de agua (INEGI, 2017b)



Figura 4.1: *Fracción de la cuenca propuesta por el software ArcGis para la Laguna de Zupitlán.* En la imagen se observa una fracción de la cuenca para la Laguna de Zupitlán, calculada usando ArcGis. Al centro de la imagen es posible apreciar diferentes subcuencas vecinas. Elaboración propia.

Para estimar la zona de influencia de la laguna de Zupitlán, y de conformidad con la definición de la CMPRALTA (2014), presentada al principio del tema (el área de influencia incluye a la laguna misma), se seleccionó el punto de salida (de drenaje) de la laguna (ver punto (a) de la figura 4.2), a partir del cual el software elaboraría el trazado de la cuenca. Se decidió llamar al resultado de este proceso *microcuenca*, en referencia al tamaño de la cuenca obtenida con ArcGis, y al de la región hidrológica-administrativa al que está inscrita la zona de estudio (RH26Dv).

Una vez Encontrada la microcuenca de influencia de la laguna de Zupitlán, la herramienta de *Funciones de red* de SIATL puede hacer el análisis y caracterización de diferentes propiedades de la cuenca calculada, mismas que se muestran en la tabla 4.1.

Los valores estadísticos presentados por SIATL para la cuenca en análisis corresponden a la intersección entre el área de drenaje seleccionada y las manzanas de las localidades urbanas y rurales pertenecientes al marco geoestadístico del censo de



Figura 4.2: Microcuenca de la laguna de Zupitlán estimada por SIATL. En color azul se indica la microcuenca de la laguna de Zupitlán obtenida con el software en línea SIATL de INEGI (http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#) El punto (a) es la referencia a partir de la cual SIATL estimó la cuenca aguas arriba de la laguna. Las flechas en color verde indican el sentido del flujo de agua.

Tabla 4.1: Caracterización de la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán.

Parámetro	Valor
Elevación Máxima	2905m
Elevación media	2520m
Elevación mínima	2135m
Longitud*	20,432m
Pendiente media	3.7685 %
Red drenada	45.54km2
Población total	7031 habitantes
Viviendas totales	2688

La tabla muestra las propiedades que caracterizan a la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán, de acuerdo al programa SIATL. *Se refiere a la longitud del cauce principal, definido como el de mayor recorrido, en kilómetros (INEGI, s.f.). Dicho cauce se observa de color rojo en la figura 4.2.

población y vivienda 2010 (INEGI, 2017c). Además de la información presentada en la tabla 4.1, SIATL ofrece el análisis de la distribución de la vegetación, servicios,

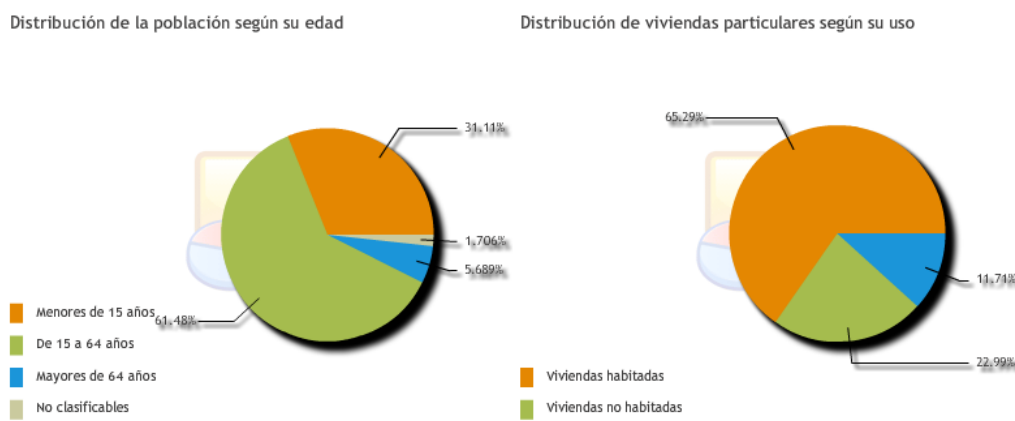


Figura 4.3: *Distribución de la población según su edad y de las viviendas particulares según su uso, en la microcuenca de la Laguna de Zupitlán*

Se observa la distribución de la población según su edad (izquierda) y de las viviendas particulares según su uso (derecha) dentro de la microcuenca de influencia de la laguna de Zupitlán. Fuente: SIATL, 2017.

viviendas, temperatura mensual y precipitación media mensual. Las figuras: 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 muestran un compendio de dicha información.

Durante la **segunda visita de reconocimiento** del lugar, realizada el 28 de marzo de 2017 a la zona (la visita se realizó una vez que la microcuenca de influencia había quedado definida), pudo comprobarse el estado de abandono del lugar (De acuerdo a la figura 4.3, este abandono es del 22.99 % de las casas), así como la distribución de la vegetación, que en más del 70 % está destinada a actividades agrícolas (agricultura extensiva mayormente). La segunda visita ayudó a descartar la margen noreste de la laguna como una fuente de aporte de nutrientes y contaminantes.

La margen noreste de la laguna es la que concentra la poca actividad agrícola intensiva cercana a la laguna, así como los escasos cultivos tecnificados de la zona, sin embargo, debido a que pertenece a la zona aguas abajo de la laguna, a que el borde de la laguna (de construcción artificial para permitir el paso de vehículos) tiene una cota más alta que los terrenos aguas abajo, además de no haberse encontrado evidencia de descargas de drenaje desde estos terrenos hacia la laguna durante las visitas de reconocimiento; se considera remota la posibilidad de que dicha margen aporte cantidades relevantes de contaminantes al cuerpo de agua (ver figura 4.7).

Durante la segunda visita a la laguna se realizó uno de los hallazgos más relevantes

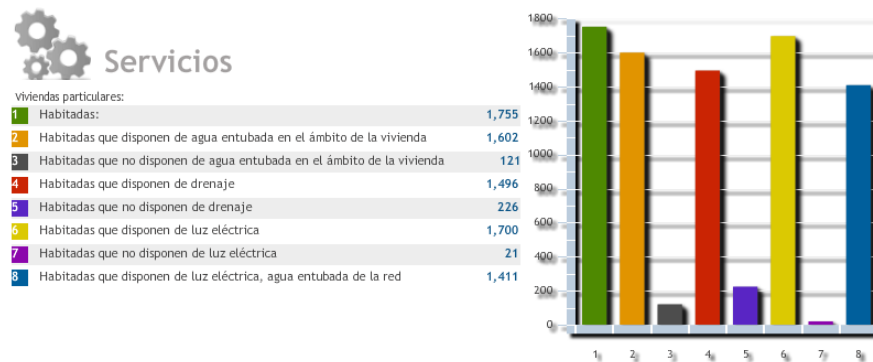


Figura 4.4: *Servicios con los que cuentan las casas particulares dentro de la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán.* Fuente: SIATL, 2017.

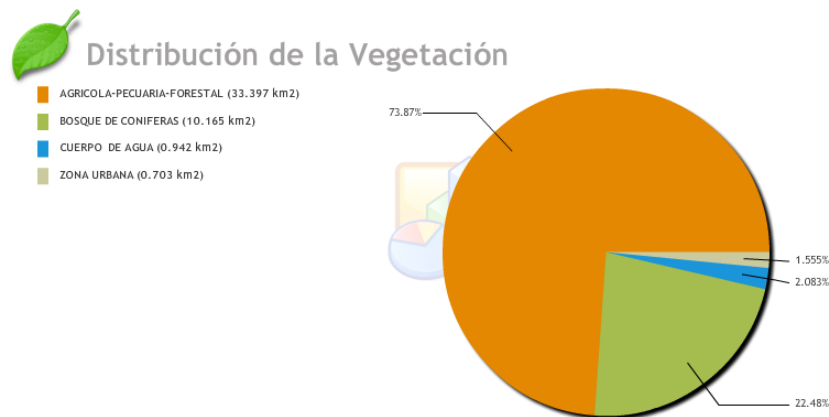


Figura 4.5: *Distribución de la vegetación dentro de la microcuenca de la Laguna de Zupitlán*
Una mejor definición de la información sería 'uso de suelo' dentro de la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán. Fuente: SIATL, 2017.

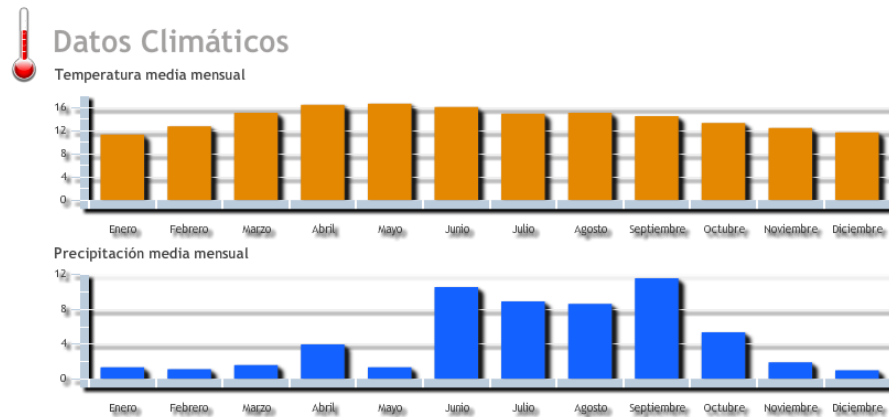


Figura 4.6: *Temperatura y precipitación media mensual dentro de la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán. Fuente: SIATL, 2017.*

Al consultar la metodología de elaboración de los histogramas para esta figura, se menciona que los datos fueron tomados de Worldclim-Global Climate Data, que estipula que las unidades de temperatura son °C, y de precipitación mm de lluvia.



Figura 4.7: *Fotografía que muestra la distribución de los terrenos aguas abajo de la laguna (por la margen noreste). En la imagen se aprecia una granja intensiva de vacas a la izquierda, así como el bordo construido para permitir el paso de vehículos (20°9'18.13"N, 98°24'18.55"O). Elaboración propia.*



Figura 4.8: En la imagen se muestra la microcuenca de influencia de la presa El Sabino, obtenida con el software en línea SIATL de INEGI.

En color azul se indica la microcuenca de influencia de la presa El Sabino, obtenida con el software en línea SIATL de Inegi (http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#). El punto (a) es la referencia a partir de la cual SIATL estimó la cuenca aguas arriba de la presa. Las flechas de color verde indican el sentido del flujo del agua.

para la investigación: la presa El Sabino mostraba indicios de un deterioro de su calidad de agua mucho mayor que el de la Laguna de Zupitlán. Mientras que en esta última aún se practica la pesca como actividad de subsistencia, en El Sabino no existen botes de remos para acceder, ni casas a la redonda. La materia flotante no se permite en el agua residual tratada (se esperaría una mejor calidad en un cuerpo de agua natural), según la norma mexicana NOM-003-ECOL-1997, y sin embargo su presencia es abundante en toda la orilla de la Presa El Sabino, acompañada de un intenso olor acre.

Analizando los flujos obtenidos en SIATL para la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán, se observa que el gasto que pasa por el cauce principal (volver a figura 4.2) hace siempre una escala por la Presa El Sabino. El resultado de calcular el área que drena hacia la Presa El Sabino es sobresaliente, pues se observa que es exactamente igual a la de la microcuenca de influencia de la Laguna de Zupitlán (ver figura 4.8). En la tabla 4.2 se muestran las propiedades de la cuenca que drena hacia la presa El Sabino.

La extensión de territorio que resulta de la diferencia entre el área que drena hacia

Tabla 4.2: Caracterización de la microcuenca que drena hacia la presa El Sabino.

Parámetro	Valor
Elevación Máxima	2905m
Elevación media	2522m
Elevación mínima	2139m
Longitud*	17,886m
Pendiente media	4.2826 %
Red drenada	43.30km ²
Población total	6710 habitantes
Viviendas totales	2592

*La tabla muestra las propiedades que caracterizan a la microcuenca que drena a la presa El Sabino, de acuerdo al programa SIATL. *Se refiere a la longitud del cauce principal, definido como el de mayor recorrido, en kilómetros (INEGI, s.f.).*

la Laguna de Zupitlán y el Área que drena hacia El Sabino será referida como el *área de influencia efectiva* de la laguna, y se trata del área que directamente escurre a la laguna, sin pasar por la presa El Sabino. El área de influencia efectiva de la laguna delimita el territorio que tiene un impacto directo sobre el agua de la laguna, pues es el área que drena de forma directa nutrientes y contaminantes dentro del cuerpo de agua. Debido a que no es posible exportar una subcuenca desde SIATL de INEGI hacia un programa GIS, el área efectiva ha sido llevada a Google earth de forma cuidadosa a través de numerosas coordenadas UTM de referencia (ver figura 4.9).

A pesar de que el análisis de aportes de nutrientes a realizar estará ubicado en el área de influencia efectiva de la laguna, no se dejará de lado a la Presa El Sabino, pues resulta importante estimar cuál es el porcentaje de remoción de contaminantes que realiza, como *laguna fusible*², en favor de la Laguna de Zupitlán.

RESUMEN DE LA SECCIÓN

Para cualquier estudio de impacto ambiental, ya sea la MIA tradicional, o un diagnósti-

²Se ha elegido este nombre como símil del componente eléctrico homónimo, cuya función es fundirse en caso de presentarse una corriente excesiva



Figura 4.9: *Área de influencia efectiva de la laguna de Zupitlán*

El área de influencia efectiva de la laguna resulta de la diferencia entre las áreas mostradas en las figuras 4.2 y 4.8.
Fuente: Google Earth, 2017

Tabla 4.3: Caracterización del área de influencia efectiva de la Laguna de Zupitlán.

Parámetro	Valor
Longitud*	2,546m
Red drenada	2.204km ²
Población total	321 habitantes
Viviendas totales	96

*La tabla muestra las propiedades que caracterizan al área de influencia efectiva de la Laguna de Zupitlán. Los datos fueron obtenidos como la diferencia entre los presentados en las tablas 4.1 y 4.2. *Se refiere a la longitud del cauce principal.*

co de los impactos ocasionados por las actividades humanas, es necesario primero definir una zona de estudio. Para este documento la unidad de estudio es el área que drena directamente hacia la laguna de Zupitlán, que es diferente de su subcuenca, pues se determinó que gran parte de ella es la envolvente de la subcuenca de la presa El Sabino; se infiere que la mayor parte del área que aparentemente drena hacia la laguna de Zupitlán pasa primero por El Sabino, que amortigua los impactos ambientales que podrían llegar a Zupitlán. El área efectiva que drena exclusivamente a la laguna de Zupitlán se presenta en la figura 4.9.

La principal conclusión de esta sección viene en el modo de una nueva pregunta de investigación: si no hay evidencias de fuentes de contaminación puntuales a la laguna, y la margen noreste de la misma (que es la que concentra la agricultura intensiva y los cultivos tecnificados) parece no poder aportar (debido a la distribución de sus cotas de nivel) contaminantes a la laguna, ¿Cuál es el mecanismo de contaminación de la laguna de Zupitlán?. Esta interrogante encontrará respuesta en secciones siguientes.

Campañas de muestreo de calidad del agua

Para poder determinar la calidad ambiental de un sitio, o el cambio de la misma, se utilizan indicadores ambientales. Dos características de un indicador que tenga que ser usado frecuentemente (en el caso de este trabajo, dicha frecuencia podría venir con estudios futuros; o con la necesidad de comparar a Zupitlán con un cuerpo de agua de características similares) son: La sencillez de medición y su relación con las propiedades del ecosistema o de algún elemento ambiental (Garmendia, 2006), en este caso: el agua.

La sección siguiente discute el procedimiento utilizado para elegir los sitios de muestreo de agua dentro de la laguna de Zupitlán, así como los parámetros seleccionados para fungir como indicadores de la calidad ambiental.

4.2. Parámetros de muestreo

La literatura de ingeniería ambiental, así como la normatividad nacional, proponen diferentes y muy variados parámetros para determinar la calidad del agua; sin embargo en el presente trabajo se ha decidido recurrir a aquellos enmarcados dentro del llamado Índice de Calidad Bacteriológica y Fisicoquímica (IQBP, por sus siglas en francés), desarrollado por el gobierno de Quebec para facilitar la gestión y vigilancia de sus recursos hídricos (Hébert, 1996). Dicha elección obedece a que el índice IQBP ha sido utilizado en los grandes lagos canadienses desde hace más de 20 años, así como en otros cuerpos de agua (no tan grandes) (GROBEC, 2009; TCRQ, 2015), y a que se fundamenta en que los *descriptores* (parámetros de calidad de agua) son buenos indicadores de las diferentes formas de contaminación:

- Están influenciados por las descargas municipales, las actividades agrícolas y ciertos tipos de actividades industriales.
- Son de fácil medición en el agua, a un costo relativamente poco elevado;
- Existen, para la mayoría de sus descriptores, criterios que permiten evaluar si la calidad del agua es adecuada para soportar ciertos usos y mantener la vida acuática; de tal forma que es posible realizar inferencias sobre la calidad fisicoquímica y bacteriológica de uno de los componentes esenciales del ecosistema.”
El texto citado entre comillas ha sido traducido fielmente del trabajo de Hébert (1996).

En función de lo anterior, los descriptores propuestos por el IQBP (ver tabla 4.4) resultan ideales para el presente trabajo, pues a pesar de que no se plantea la elaboración de un índice de calidad del agua³ para la laguna de Zupitlán, los parámetros propuestos por el índice canadiense son una excelente guía para saber qué indicadores de la calidad ambiental a utilizar.

Como se menciona en el pie de página 3, el índice de calidad de agua nacional está en revisión. En el contexto de esta revisión, SEMARNAT (2010) exorta a tomar la DQO como parámetro relevante para cuantificar el total de materia orgánica en el cuerpo de agua, por lo que se añadirá a los parámetros guía del IQBP. De forma similar, el autor ha decidido incluir la temperatura del agua, pues es un factor abiótico que regula los procesos vitales para los organismos vivos (y resulta de muy sencilla

³La SEMARNAT de México cuenta con su propio Índice de Calidad del Agua (ICA), no obstante se ha decidido no adoptarlo, en virtud de que la misma institución da cuenta de que el ICA está bajo un proceso de revisión y mejora (SEMARNAT, 2010).

medición).

La tabla 4.4 muestra los parámetros a muestrear en la laguna de Zupitlán.

Tabla 4.4: Parámetros propuestos para las campañas de muestreo y las normas e índices que sugieren su determinación.

Parámetro	IQBP	SEMARNAT	2006/7/EC	Criterios eco.
Fósforo total	×			
Coliformes fecales	×		×	
DBO ₅	×	×		
Saturación de O ₂ (%)	×			×
Nitrógeno amoniacal	×			
Nitritos y nitratos	×			
Clorofila a	×			
pH	×			×
Transparencia	×			×
Sólidos en suspensión	×	×		
DQO*				
Temperatura*		×		

La tabla muestra los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que se medirán en la laguna de Zupitlán. Los parámetros marcados con () son aquellos que el autor ha agregado a la lista del IQBP. La columna SEMARNAT se refiere a las normas MON-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1996. La Columna 2006/7/EC se refiere a la directiva homónima del Parlamento Europeo. La columna Criterios eco. se refiere a los criterios ecológicos CE-CCA-1989 de México.*

4.3. Sitios de muestreo

Para fines del presente estudio se analizan muestras superficiales del agua de la laguna, dejando de lado un muestreo estratificado. Este enfoque supone la inexistencia de una estratificación química o térmica dentro del cuerpo de agua, y que la acción de los vientos generan un sistema bien mezclado, donde la muestra superficial es representativa de la calidad del agua del punto de muestreo.

Por su parte, el Consejo Canadiense de Ministros del Ambiente, CCME por sus siglas en inglés, establece que en cuerpos de agua lénticos de 5 metros de profundidad en adelante, comienza un efecto de estratificación (Izcapa, 2001). El supuesto de falta de estratos se mantiene, apelando a la batimetría de la laguna, obtenida en este trabajo, con una profundidad media de 1.3m.

Criterios de selección

Para elegir los puntos del muestreo, la normatividad mexicana (SARH, 1992), NORMA MEXICANA NMX-AA-14-1980, sugiere establecer una red de muestreo que contemple los siguientes puntos:

- En los afluentes, antes de desembocar al cuerpo receptor.
- Dentro del cuerpo receptor, donde se aprecie una mezcla homogénea de los afluentes.
- En las salidas del cuerpo receptor.

De seguirse la norma, los sitios de muestreo incluirían las aportaciones y salidas del cuerpo de agua, así como el lugar dentro de la laguna donde se aprecie una mezcla homogénea, este último criterio es difícil de formalizar, pues el muestreo es el que permite formular los modelos que definirán en dónde realmente la laguna se encuentra bien mezclada. Así pues, el punto “Mezcla homogénea”, ha sido sugerido *a priori* por el autor (ver figura 4.10 y tabla 4.5).

Además de los parámetros sugeridos por la norma mexicana, que se incluyen en la figura 4.10, De la Lanza (2014) sugiere considerar aspectos de naturaleza práctica, como la accesibilidad al sitio y la posible repetición de la toma de muestras.

En un esfuerzo por realizar un muestreo estructurado de sitios lo más representativos posibles, y ayudado del hecho de que tanto una de las caras anchas como una de las caras altas de la laguna son prácticamente rectas con un ángulo de 90° entre ellas, el autor propone inscribir la geometría de la laguna dentro de un rectángulo, que a su vez se dividirá en 16 secciones de igual tamaño (ver figura 4.11).

Tabla 4.5: Se presentan los sitios de muestreo supuestos de acuerdo a la norma NMX-AA-14-1980, que considera afluentes, mezcla homogénea y salidas del cuerpo receptor.

Sitio	Coordenadas UTM
Salida 1	20°9'18.13"N 98°24'18.55"O
Salida 2	20°9'19.84"N 98°24'16.85"O
Salida 3	20°8'54.66"N 98°23'34.68"O
Salida 4	20°8'53.88"N 98°23'34.62"O
Salida 5	20°9'06"N 98°23'41"O
Entrada 1	20°8'56.36"N 98°23'44.93"O
Entrada 2	20°9'3.40"N 98°24'11.20"O
Mezcla homogénea	20°9'9.41"N 98°23'58.59"O

La 'Entrada 2' se refiere al manantial subterráneo que se encuentra en la zona sureste de la laguna (su localización puntual es desconocida)



Figura 4.10: Sitios de muestreo de acuerdo a la NMX-AA-14-1980. Fuente: Google earth, 2017.

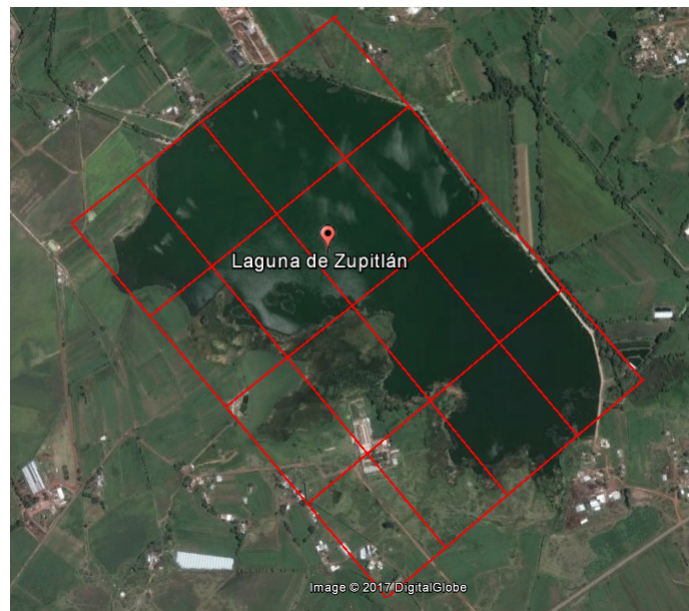


Figura 4.11: Propuesta de cuadrícula de muestreo. Fuente: Google earth, 2017.

Una vez trazada la cuadrícula de muestreo, se encuentra el centro de cada una de las secciones rectangulares; éstas corresponderán con los sitios de muestreo. Quedan excluidos todos aquellos puntos que no se encuentren dentro del espejo de agua de

la laguna.

El resultado de la aplicación de la metodología anterior es una red de muestreo con 11 puntos dentro de la laguna (ver figura 4.12)

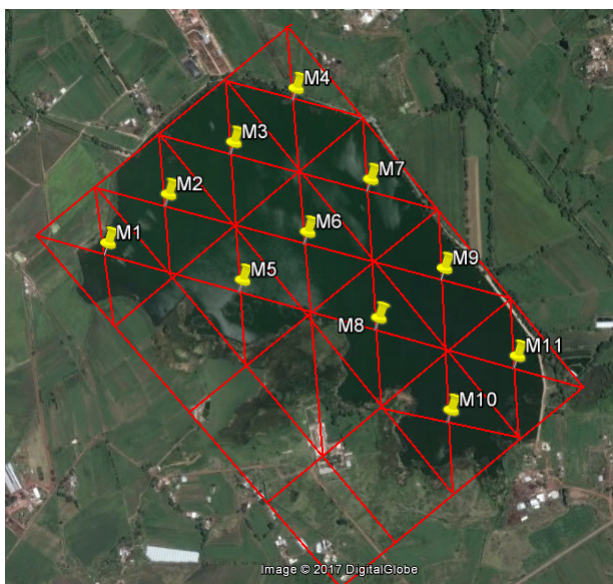


Figura 4.12: Propuesta de red de muestreo a partir de cuadrícula equidistante. Fuente: Google earth, 2017.

Si se combinan los puntos de muestreo de la figura 4.10, a partir de la norma NMX-AA-14-1980, y la figura 4.12, en base a una red de muestreo equidistante, el resultado es la **red de muestreo final** (ver figura 4.13 y la tabla 4.6). Es importante mencionar que la red de muestreo de la figura 4.13 tiene algunos cambios respecto a sus propuestas predecesoras: El punto ‘Mezcla homogénea’ queda anulado por el punto ‘M6’, ‘Entrada 1’ se desplaza a una de las intersecciones de la cuadrícula de la figura 4.12 (su nueva localización se presenta en la tabla 4.6), ‘Salida 1’ y ‘Salida 2’ se simplifican por ‘Salida 1,2’, que es equidistante de los puntos originales (lo mismo ocurre con las salidas 3 y 4). Todas las coordenadas de los puntos de la red de muestreo final se presentan en la tabla 4.6.

Como se estableció en la sección *delimitación de la zona de influencia*, se ha decidido incluir en el trabajo un muestreo de la presa El Sabino, el cuerpo de agua *fusible* que

Tabla 4.6: Red de muestreo final, resultado de la combinación de la red elaborada a partir de la norma NMX-AA-14-1980 y aquella propuesta a partir de una cuadrícula equidistante sobrepuesta a la laguna.

Sitio	Coordenadas UTM	Sitio	Coordenadas UTM
Salida 1,2	20°9'18.71"N 98°24'16.57" O	M4	20°9'24.05"N 98°24'1.03" O
Salida 3,4	20°8'54.29"N 98°23'35.21" O	M5	20°9'24.95"N 98°24'6.96" O
Salida 5	20°9'06"N 98°23'41" O	M6	20°9'9.74"N 98°24'0.05" O
Entrada 1	20°8'59.21"N 98°23'44.95" O	M7	20°9'14.99"N 98°23'53.35" O
Entrada 2	20°9'3.40"N 98°24'11.20" O	M8	20°9'1.18"N 98°23'52.49" O
M1	20°9'9.41"N 98°23'58.59" O	M9	20°9'6.12"N 98°23'45.51" O
M2	20°9'13.49"N 98°24'14.83" O	M10	20°8'51.98"N 98°23'44.81" O
M3	20°9'18.70"N 98°24'7.89" O	M11	20°8'57.36"N 98°23'37.76" O

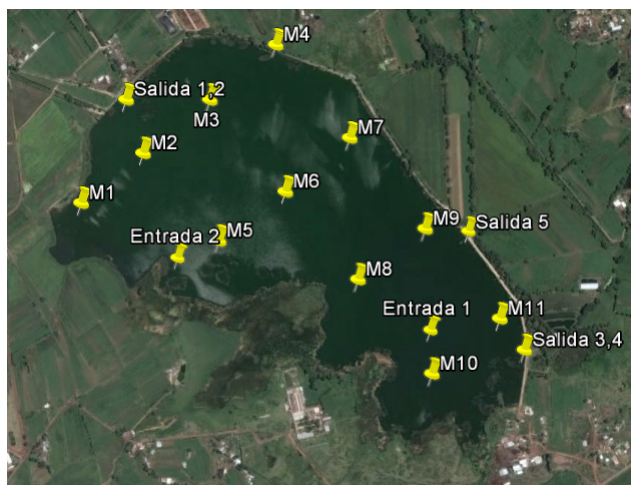


Figura 4.13: Localización de los puntos del muestreo. Fuente: Google earth, 2017.

amortigua la carga de contaminantes provenientes desde su propia microcuenca (que resulta estar inscrita dentro de la microcuenca que drena a la laguna de Zupitlán). Debido a cuestiones de accesibilidad, el muestreo estará limitado a dos puntos, elegidos de acuerdo al sentido del flujo del agua de la microcuenca (ver figura 4.8) en los extremos de entrada y salida del gasto, como se muestra en la figura 4.14, de coordenadas: A, $20^{\circ}8'3.84''\text{N}$, $98^{\circ}24'41.68''\text{O}$; B, $20^{\circ}8'21.16''\text{N}$, $98^{\circ}24'29.24''\text{O}$.

4.3.1. Temporalidad del muestreo

El muestreo, realizado en los puntos y con los parámetros antes definidos, se lleva a cabo en dos periodos del año: lluvias y estiaje.

Los periodos antes definidos se justifican por el supuesto de que en la época de lluvias, el agua procedente de la precipitación pluvial diluye los contaminantes en la laguna, mismos que se presentan en su concentración mínima. De forma semejante, en época de estiaje, la ausencia de precipitación, junto a la evaporación del embalse hacen que las concentraciones de los descriptores de calidad del agua alcancen su punto máximo.

La primera campaña de muestreo se realizó el día 5 de octubre de 2017. En este muestreo el clima fue dominado por lluvias intermitentes y vientos fuertes, además



Figura 4.14: Localización de los puntos de muestreo A y B, dentro de la presa El Sabino, que amortigua la carga contaminante a la laguna de Zupitlán. Fuente: Google Earth, 2017

de eso, el punto M10 fue inaccesible debido al crecimiento de maleza acuática que imposibilitó el acceso a la lancha, un bote de motor de fibra de vidrio para 8 pasajeros.

La segunda campaña se realizó el día 1 de marzo de 2018. En este muestreo el clima fue caluroso con un cielo despejado y vientos fuertes. El nivel del espejo de agua a las orillas de la laguna era más bajo que aquel observado durante el muestreo en lluvias y el color del agua tenía una tonalidad verdosa más marcada.

En la campaña en estiaje el punto M10 tampoco fue accesible. A este se sumó el punto M8, que no pudo muestrearse debido a la convergencia en el lugar de varias líneas de pesca, que podían ser rotas por las aspas del bote.

4.4. Cálculo de carga de contaminantes

El cálculo de los aportes de nutrientes que la cuenca de la Laguna de Zupitlán recibe, requiere de una cantidad de información detallada (Ryding y Rast, 1992) del lugar, que actualmente no existe (y cuya obtención escapa de los alcances de este documento), tales como el caudal de agua subterránea que entra a la laguna, la edafología y geología de las colindancias, la caracterización del subsuelo del lugar, así como el control continuo de los cultivos (y sus alternancias temporales) en las tierras

agrícolas de la zona de influencia, entre otros.

A pesar de la falta de información, es posible identificar algunas de las fuentes que aportan nutrientes (fósforo y nitrógeno), ya sean puntuales o difusas; humanas o naturales.

La primera de las fuentes importantes de nutrientes es la presa El Sabino que, como se mencionó, resulta servir de amortiguador de la carga de nutrientes aguas arriba para la Laguna de Zupitlán. La conexión hidráulica entre los dos cuerpos de agua permite la entrada de contaminantes a Zupitlán, a pesar de existir un importante grado de atenuación en su concentración (como se estudia en la sección siguiente)

El suelo agrícola, al recibir los desechos de los animales de pastoreo y abonos químicos, también contribuye al aumento de nutrientes en el cuerpo de agua (como fue mencionado en el marco teórico). En el caso de la zona de influencia efectiva de la laguna, el área correspondiente a este parámetro es de 1.386km^2 (ver tabla 4.7).

Tabla 4.7: Caracterización de los usos de suelo que tiene el área de influencia efectiva de la Laguna de Zupitlán. Elaboración propia con datos de SIATL.

Uso de suelo	Extensión km^2	% del área total
Agrícola-pecuario	1.386	62.88
Cuerpo de agua	0.717	32.53
Asentamientos humanos	0.075	3.42
Terracería	0.026	1.17

Otro interesante aporte de nutrientes puede provenir del suelo, una vez que ha pasado por procesos de deforestación y pierde su capa vegetal. En estos casos, el suelo ya no es apto para la inmovilización de nutrientes, y las cargas de nitrógeno y fósforo pueden llegar a ser importantes (UNESCO, 1992). En el caso de la zona de influencia efectiva, de forma que los 321 habitantes que ahí moran descargan en fosas sépticas. Según el estudio para el control de la eutrofización de lagos y reservorios de la UNESCO (1992), muchas veces dichas fosas sépticas no tienen un alto valor de retención. En el texto antes mencionado se indica que los valores medios de retención del nitrógeno y fósforo en estos contenedores son del orden de 20 %-55 % y 25 %-40 %, respectivamente.

La UNESCO propone que cada habitante que descarga en un tanque séptico aporta un 70 % de la DBO_5 , así como un 80 % del fósforo y nitrógeno total equivalente de un equivalente de población (el aporte anual de una persona a un effluente, sin tratamiento alguno).

1 equivalente de población = 54g de DBO_5 ; 13g N; 2g P.

Para el fósforo y el nitrógeno aportado anualmente por la población de la zona de influencia efectiva podemos estimar:

$$N = 0.8 \times 13g/hab$$

$$N = 0.8 \times 13g/hab \cdot año \times 321hab = 3338.4gN/año = 3.33kgN/año$$

$$P = 0.8 \times 2g/hab \cdot año \times 321hab = 513.6gP/año = 0.51kgN/año$$

De forma similar, los aportes de nutrientes pueden ser calculados por unidad de ganado. De acuerdo a las visitas a la zona se ha estimado que hay, aproximadamente, 425 vacas (el único animal de cría que pudo encontrarse en el lugar) por kilómetro cuadrado. Para un área de cultivo de $1.386km^2$ habrá un número aproximado de bovinos de 589. Cada uno de ellos produce 12 equivalentes (o habitante) de población para nitrógeno y 5 para fósforo, por lo que la carga que aportan a la cuenca es de:

$$N = 589animales \times 12equivalentes/animal \times 13g/año \cdot equivalente = 91884gN/año$$

$$P = 589animales \times 5equivalentes/animal \times 13g/año \cdot equivalente = 91884gN/año$$

Finalmente se calcula el aporte de nutrientes desde la producción de cultivo agrícola, que tiene valores de equivalentes anuales de población (por hectárea de terreno) de 9 para nitrógeno y 0.5 para fósforo. Conocida el área destinada a suelos agrícolas:

$$N = 1.386km^2 \times 9equivalentes/ha \times 1ha/0.01km^2 \times 13gN/equivalente = 16216.2gN/año$$

$$P = 1.386km^2 \times 0.5equivalentes/ha \times 1ha/0.01km^2 \times 2gNP/equivalente = 138.6gN/año$$

Lo que significa que un total aproximado de 111.4kg de nitrógeno total al año y 38.92kg de fósforo total anual.

Es importante señalar que dichas cargas son sólo aproximaciones aceptables del contenido real de nutrientes que drenan a la laguna, pues los datos utilizados de equivalentes de población fueron estimados para regiones drásticamente diferentes, y no contemplan las particularidades de la región, así como las propiedades de los flujos subterráneos de agua o costumbres y prácticas locales.

Tabla 4.8: Cargas anuales de nitrógeno y fósforo en la zona de influencia efectiva de la Laguna de Zupitlán.

Nutriente	Carga total anual	Carga por unidad de área
Nitrógeno	111.4kg	0.050g/m ² /año
Fósforo	38.92kg	0.017g/m ² /año

Se muestran las cargas aproximadas anuales que recibe la laguna de Zupitlán desde su área de influencia efectiva, de acuerdo a los usos de suelo definidos en la tabla 4.7.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Campañas de muestreo

5.1.1. Primera campaña, lluvias

En la tabla 5.1 se muestran los resultados de todos los parámetros analizados durante el muestreo. Los parámetros: Transparencia con Disco Secchi, Temperatura, pH y porcentaje de Saturación de Oxígeno Disuelto (% Sat OD), fueron medidos *in situ* con la ayuda de una sonda de oxígeno disuelto y un pH-metro portátil; mientras que el resto de los análisis fueron realizados en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (LISA) de la facultad de ingeniería.

La tabla 5.1 también muestra los resultados del muestreo para la Presa El Sabino. Se ha establecido previamente que El Sabino es una laguna fusible para la Laguna de Zupitlán, por lo que en la tabla 5.2 se presentan (además de los valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar de los puntos dentro de la laguna) los porcentajes de remoción de la sustancia o propiedad en cuestión, entendiéndose la disminución o aumento (Δ) en el valor del parámetro para el caso de la temperatura y el pH entre ambos cuerpos de agua.

En la tabla 5.1 los espacios marcados como “-” representan muestras que se perdieron durante el transporte o manejo del material, mientras que para el caso de la clorofila *a* (Cla), los espacios marcados como “?” denotan muestras para las cuales los resultados fueron negativos (sin una interpretación fisicoquímica válida). Los resultados negativos pueden deberse a que, debido a los rápidos tiempos de caducidad de las muestras, fue necesario congelar las muestras ya filtradas a -20°C, lo cual pudo

haber alterado los resultados.

Las abreviaturas usadas en las tablas siguientes serán: SST, Sólidos Suspendidos Totales; DQO, Demanda Química de Oxígeno; DBO₅, Demanda Biológica de Oxígeno a los 5 días; Cla, Clorofila a; % Sat. de O.D., porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y O.D., oxígeno disuelto, en miligramos por litro.

Resultados de la primera campaña en la Laguna de Zupitlán

Muestra	pH	Temp (°C)	Transparencia (cm)	NO2- (mg/l)	NO3- (mg/l)	N NH3 (mg/l)	PO4 3- (mg/l)	SST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Cla (mg/l)	Coliformes fecales (UFC/100ml)	% sat. OD	O.D. (mg/l)	Batimetría (m de profundidad)
Salida 1,2	9.78 ^{1,2}	21.10	37.00	0.02	5.72	0.00	0.21	7.20	335.50	18.56 ³	0.01	70.00	133.20	11.19	1.50
Salida 3,4	9.43 ^{1,2}	20.70	54.00 ²	0.13	9.02	0.00	0.43	12.90	326.00	25.31 ³	0.05	10.00	163.00	13.69	1.04
Salida 5	9.43 ^{1,2}	18.90	64.00 ²	0.04	10.56	0.00	0.30	159.5 ^{3,4,5,6}	309.00	10.52	0.01	20.00	90.80	7.63	1.21
Entrada 1	9.22 ^{1,2}	19.70	58.00 ²	0.04	7.04	0.09	0.45	4.90	315.00	18.14	?	540.00	126.50	10.63	1.23
Entrada 2	8.76 ^{1,2}	19.90	34.00	0.03	2.64	0.00	1.54	13.60	357.00	8.58	0.01	1560.00	78.10	6.56	1.35
M1	9.71 ^{1,2}	20.90	41.00	0.00	4.84	0.04	0.24	11.05	330.00	10.39	0.07	595.00	82.60	6.94	1.33
M2	9.72 ^{1,2}	19.60	40.00	0.02	4.62	0.07	0.41	19.20	333.00	12.93	0.05	193.00	114.80	9.64	1.45
M3	9.54 ^{1,2}	20.20	42.00	0.02	3.96	0.00	0.59	10.70	321.00	15.62	?	370.00	115.10	9.67	1.64
M4	9.65 ^{1,2}	20.00	49.00	0.03	6.16	0.00	0.20	-	318.00	12.72	?	35.00	95.80	8.05	1.10
M5	9.75 ^{1,2}	19.40	47.00	0.02	4.84	0.07	0.26	20.10 ³	-	11.61	?	130.00	94.70	7.95	1.69
M6	9.46 ^{1,2}	19.20	49.00	0.03	4.84	0.00	1.32	2.30	318.50	8.98	-	520.00	82.00	6.89	1.63
M7	9.48 ^{1,2}	20.00	53.00 ²	0.03	10.34	0.02	0.32	10.20	306.00	17.21	0.06	20.00	126.90	10.66	1.29
M8	9.35 ^{1,2}	19.10	64.00 ²	0.04	9.24	0.02	0.38	6.90	307.00	17.20	0.00	40.00	120.60	10.13	-
M9	9.37 ^{1,2}	19.30	59.00 ²	0.06	11.00	0.00	0.35	11.15	-	13.91	0.01	0.00	114.00	9.58	1.17
M11	9.44 ^{1,2}	19.80	56.00 ²	0.03	9.24	0.00	0.37	1.10	328.00	20.97 ³	0.06	35.00	140.60	11.81	1.04

Resultados de la primera campaña en la presa El Sabino.

Muestra	pH	Temp (°C)	Transparencia (cm)	NO2- (mg/l)	N NO3- (mg/l)	N NH3 (mg/l)	PO4 3- (mg/l)	SST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	Cla (mg/l)	Coliformes fecales (UFC/100ml)	% sat. OD	O.D. (mg/l)
A	8.92 ^{1,2}	21.5	-	0.05775	7.04	0.475	2.925	41.81 ^{3,4,5}	392	30.04 ^{3,4,5}	0.03752	2040	28	2.35 ^{2,7}
B	8.22 ¹	21	-	0.099	9.24	1.688	3.6	48.88 ^{3,4,5}	462	33.28 ^{3,4,5}	?	1760	46.7	3.92 ^{2,7}

¹ Parámetros que rebasan los límites establecidos en los Criterios ecológicos CE-CCA-1989 para el riego agrícola.

² Parámetros que rebasan los límites establecidos en los Criterios Ecológicos CE-CCA-1989, para la carpa

³ Parámetros que rebasan los límites establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1996 para el uso de agua residual tratada con contacto directo.

⁴ Parámetros que rebasan los límites establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1996 para el uso de agua residual tratada con contacto indirecto.

⁵ Parámetros que rebasan los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para el uso de agua residual en el uso público urbano.

⁶ Parámetros que rebasan los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para el uso de agua residual en riego agrícola.

⁷ Parámetros que rebasan los límites establecidos en los Criterios Ecológicos CE-CCA-1989, para la vida acuática.

Tabla 5.1: Resultados de los estudios fisicoquímicos y bacteriológicos para la primera campaña de muestreo en la Laguna de Zupitlán y la presa el Sabino (abajo). Elaboración propia.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio (Zupitlán)	Desviación estándar	Media (Sabino)	% remoción
pH	8.76	9.78	9.47	0.26	8.57	-10.53
Temp (°C)	18.90	21.10	19.85	0.66	21.25	6.57
Transparencia (cm)	34.00	64.00	49.80	9.56	-	-
NO ₂ - (mg/l)	0.00	0.13	0.04	0.03	0.08	53.82
NO ₃ - (mg/l)	2.64	11.00	6.94	2.73	8.14	14.77
N NH ₃ (mg/l)	0.00	0.09	0.02	0.03	1.08	98.12
PO ₄ 3- (mg/l)	0.20	1.54	0.49	0.40	3.26	84.95
SST (mg/l)	1.10	159.50	20.77	40.31	45.35	54.20
DQO (mg/l)	306.00	357.00	323.38	13.99	427.00	24.27
DBO ₅ (mg/l)	8.58	25.31	14.84	4.74	31.66	53.12
Cla (mg/l)	0.00	0.07	0.03	0.03	0.04	11.65
Coliformes fecales (UFC/100ml)	0.00	1560.00	275.87	414.81	1900.00	85.48
O.D. (mg/l)	6.56	13.69	9.40	2.05	3.14	-199.63
% sat. OD	78.10	163.00	111.91	24.38	37.35	-199.63

Tabla 5.2: *Análisis estadístico descriptivo para la Laguna de Zupitlán y El Sabino, se incluye la remoción de contaminantes entre los dos cuerpos.*

Para facilitar la interpretación de los resultados de las tablas 5.1 y 5.2 se ha utilizado el software Surfer (versión 10) para interpolar los datos obtenidos y representarlos en un mapa geolocalizado (importado de un software GIS) como curvas de nivel de isoconcentraciones. Los ejes horizontal y vertical de los mapas son las coordenadas UTM del mapa, la barra inferior es una barra de escala (en metros) y la escala de colores, a la derecha, muestra a qué valor numérico del parámetro hace referencia cada color en el mapa.

En las secciones 5.1.2 (a continuación) y 5.1.4 se presentan algunos de los isomapas del primer y segundo muestreo, que son relevantes para las observaciones y conclusiones de este trabajo. Para observar la totalidad de los isomapas de ambas campañas de muestreo, el lector puede referirse al apéndice A, en la página 140.

5.1.2. Análisis de los resultados de la primera campaña

- **Parámetros asociados a la eutrofización: Fósforo, Clorofila *a* y Transparencia con disco Secchi.**

Los tres parámetros anteriores han sido analizados de forma simultánea, pues, en el apartado 5.4 éstos son los indicadores utilizados para la definición del índice de estado trófico de la laguna.

En el caso del fósforo, los fosfatos analizados muestran una alta concentración en el centro de la laguna, con un pico en su costado oeste, en su conexión hidráulica con la presa El Sabino (punto *Entrada 2* del muestreo), lo que podía esperarse a partir de la suposición de la laguna fusible. La concentración de este nutriente se reduce gradualmente hacia los costados de la laguna, alcanzando un mínimo de 0.20 mg/l en el punto *M4* al norte del embalse (ver figura 5.1).

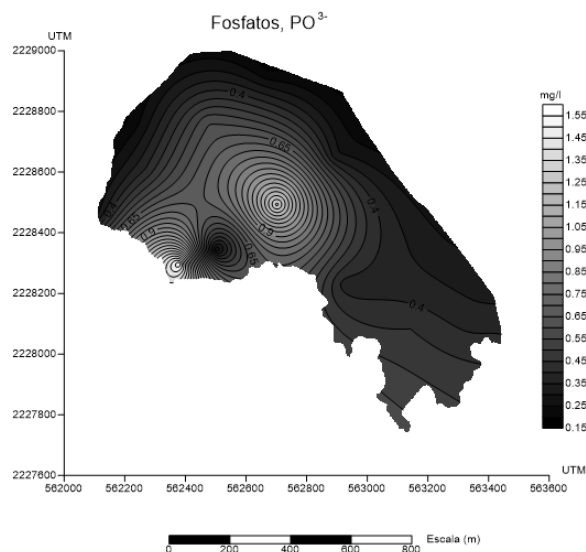


Figura 5.1: Mapa de isoconcentraciones para los fosfatos en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.

El fósforo es el nutriente limitante en el fenómeno de eutroficación, lo que quiere decir que es aquel que permite el desarrollo de la biomasa algal de la laguna.

Esta biomasa fue medida de forma indirecta con el pigmento clorofila *a*, lo que sugiere una relación entre los dos parámetros.

No obstante, dicha relación no existe, pues las concentraciones máximas de clorofila *a* difieren, en su posición, de aquellas de los fosfatos (ver figura 5.2). Esta discrepancia entre la ubicación de las máximas concentraciones de clorofila *a* y fósforo puede explicarse recurriendo al reciclaje de nutrientes (abordado en la sección 2.1.4 de este estudio), que explicaría la posible presencia de grandes cantidades de fosfatos en las orillas de la laguna con mayor acumulación de sedimentos (al norte y al sur de la laguna).

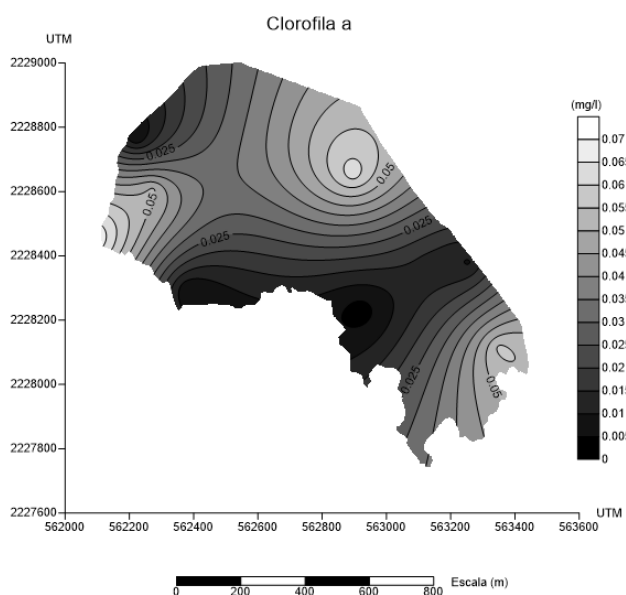


Figura 5.2: Mapa de isoconcentraciones para la clorofila *a* en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.

El parámetro de transparencia tiene una tendencia marcada de aumento al sur de la laguna y disminución al norte (ver figura 5.3). Esto no guarda relación con los resultados de fosfatos o clorofila *a* encontrados, lo que puede explicarse por el uso de una lancha de motor en la realización del muestreo.

La laguna de Zupitlán es un cuerpo de agua somero, las hélices del motor de la lancha son capaces de remover sedimentos del fondo de la laguna, ocasionando que la transparencia registrada con el disco Secchi no esté asociada a la bio-

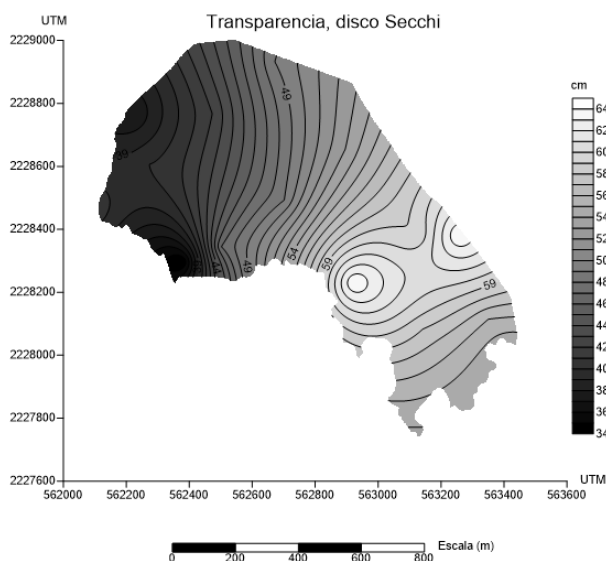


Figura 5.3: Transparencia con disco Secchi en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.

masa del agua, sino al sedimento arrastrado desde el fondo.

Si se observa la figura 5.1 para la columna transparencia, es posible ver que varios de los valores muestreados están fuera de lo recomendado por los Criterios Ecológicos CE-CCA-1989 para la carpa. Esto es, de hecho, algo positivo, pues el intervalo de entre 30cm y 50cm de transparencia con disco Secchi es rebasado, lo que significa que la claridad del agua supera la necesaria para permitir el aprovechamiento de la carpa.

■ Formas del nitrógeno

Las formas del nitrógeno presentes en la laguna de Zupitlán ayudan a comprender los flujos de agua que ocurren en el ambalse. Ha sido supuesto que en época de lluvias una conexión hidráulica superficial ocurre entre El Sabino y Zupitlán. Partiendo de este supuesto, la laguna de Zupitlán recibe nutrientes en su margen oeste y los elimina en la margen este (con la presencia de las derivaciones de riego).

A la laguna de Zupitlán no entra el efluente de ninguna planta de tratamiento de aguas residuales (recuérdese que la población de la zona utiliza fosas sépticas), por lo que el nitrógeno que entre a Zupitlán estará en su forma orgánica,

para pasar posteriormente a ser amoníaco, nitritos y, finalmente, nitratos. La figura 5.4 señala dicho movimiento utilizando los mapas de isoconcentración generados para las distintas formas del nitrógeno medidas en el primer muestreo.

El nitrógeno presente en la laguna (de la misma forma que el fósforo) indica la presencia de aguas residuales, que pueden provenir de las fugas en las fosas sépticas colindantes y de las excretas de los animales de pastoreo que se concentran en El Sabino y en la margen oeste de Zupitlán. La localización, al sur, de los nitritos en la figura 5.4 tiene su explicación en que éstos, además de ser la forma más tóxica del nitrógeno en el agua, no tienen una permanencia prolongada en los embalses, lo que sugiere que al norte de la laguna la actividad bacteriana oxidante lleva a los nitritos a niveles para los cuales la técnica Hach 8507 no tiene la suficiente sensibilidad.

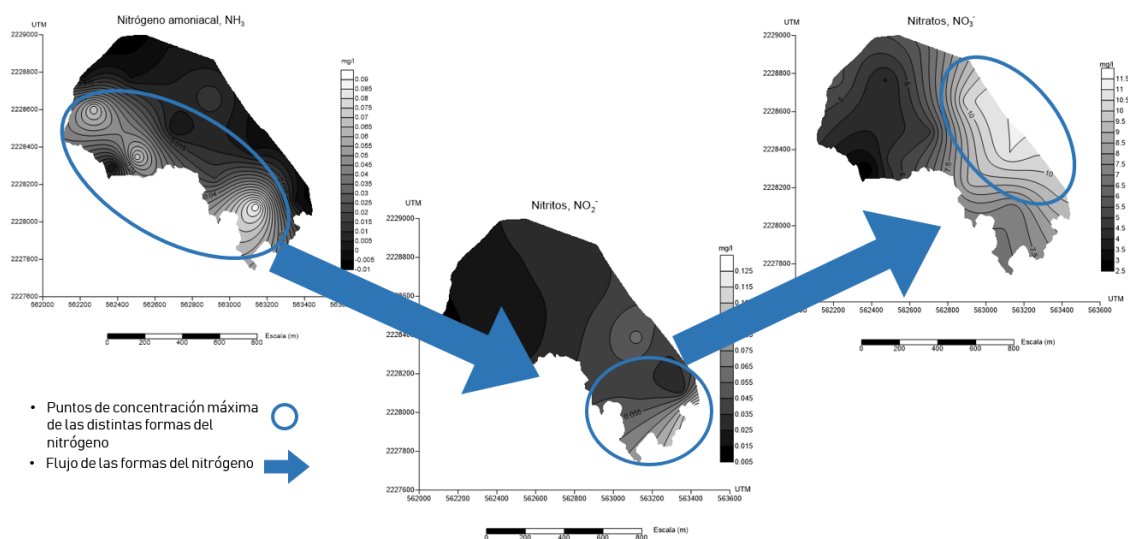


Figura 5.4: Movimiento de las diferentes formas del nitrógeno en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.

■ Sólidos Suspendedos Totales

Los sólidos suspendidos en el embalse son un indicador de la cantidad de materia suspendida en el embalse. Esta materia puede tener relación con la biomasa

presente en la laguna, así como con la cantidad de sedimentos arrastrados en la zona de influencia efectiva de ésta (ver figura 5.5).

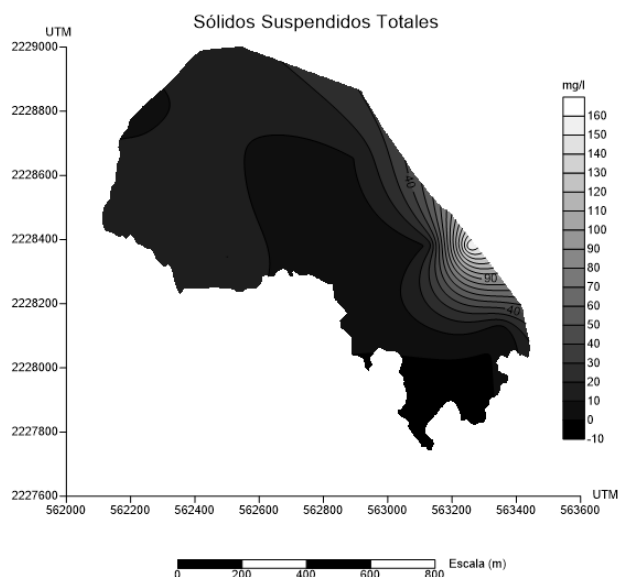


Figura 5.5: *Sólidos Suspendidos Totales en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.*

De la figura 5.5 es posible observar que los sólidos suspendidos aumentan su concentración al sureste de la laguna. Por un lado, como se revisó anteriormente, los sólidos no guardan relación con la biomasa algal. No obstante, en el contexto de los mecanismos de entrada y salida del agua de la laguna, la zona de concentración máxima de sólidos en suspensión es coincidente con el canal de riego más grande que abandona la laguna de Zupitlán, por lo que es posible aseverar que la turbulencia máxima, ocasionada por dicho canal de riego ocasiona una resuspensión de los sedimentos de la laguna (esta resuspensión podría también estar ligada, en menor manera, con el pico de nitritos encontrado en la misma zona).

■ **Materia orgánica en la laguna, DQO y DBO₅**

La cantidad de materia orgánica presente en la laguna de Zupitlán se evaluó por medio de las pruebas de DBO₅ y DQO, que miden la cantidad de materia orgánica bioquímica y químicamente biodegradable, respectivamente.

La figura 5.6 presenta los resultados para ambos parámetros en el muestreo durante época de lluvias. En el caso de la DBO_5 , el valor máximo encontrado fue de 25.31 mg/l, en la zona sur de la laguna; mientras que la DQO tuvo un máximo de 357 mg/l. Es de esperarse que la DBO_5 sea menor que la DQO, pues la segunda es capaz de oxidar químicamente toda la materia orgánica degradable usando el dicromato de potasio en ácido sulfúrico a altas temperaturas, sin embargo, también se esperaría que, geográficamente, ambos resultados guardaran una relación.

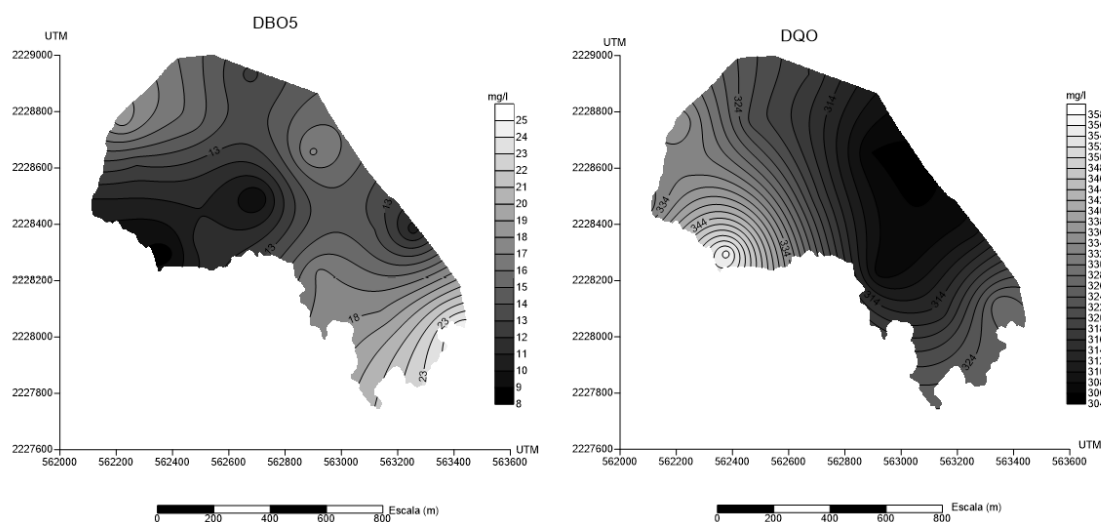


Figura 5.6: *Materia orgánica en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias, medida por medio de DQO y DBO_5 .*

Además de no guardar una relación geográfica, el parámetro DQO tiene valores mucho mayores que la DBO_5 . La relación DQO/DBO_5 ha sido estudiada ampliamente para la gestión de plantas de tratamiento de agua residual por medio de procesos biológicos, y se sugiere que razones DQO/DBO_5 mayores a 5 pertenecen a aguas altamente tóxicas y poco biofegradables (Cisterna, s.f.). En el caso del muestreo en lluvias, dicha relación es de 14.5, lo que colocaría al agua de Zupitlán en una situación de tal toxicidad que inhibiría los procesos de biodegradación del embalse. De acuerdo a este estudio, se sabe que ese no es el caso.

El error se atribuye a reactivos caducos utilizados durante la realización de la prueba de DBO_5 mediante el método de Winkler con la modificación de azida, puesto que los resultados de DQO fueron consistentes en el muestreo en lluvias y estiaje. Adicional a la consistencia de los resultados, las diferencias entre los dos parámetros durante el segundo muestreo fue mínima.

■ Coliformes fecales

Para el presente estudio se determinó el número de unidades formadoras de colonias de la bacteria *E. Coli* como indicador de la presencia de contaminación fecal. De acuerdo a los resultados obtenidos en el primer muestreo (ver figura 5.7), la margen oeste de la laguna presenta los valores más altos del parámetro.

Un par de comentarios merecen atención en este punto: primero, la bacteria *E. Coli* está presente en el intestino de la mayoría de los mamíferos sanos, por lo que es de esperar que en un embalse, al que el ganado bovino tiene libre acceso, el microorganismo esté presente; y segundo, no todas las cepas de *Escherichia Coli* son patógenas. Este microorganismo es, de hecho, la bacteria anaerobia más abundante en la microbiota del tracto intestinal del ser humano (Allocati, 2013).

Como se verá más adelante en el documento, y de acuerdo a la presencia natural antes mencionada de *Escherichia Coli* en un cuerpo de agua como Zupitlán, La Unión Europea, en su directiva 2006/7/EC, establece los criterios de calidad microbiológica para agua con fines de baño. En esta directiva un número de 1000 unidades formadoras de colonias (UFC) de *E. Coli* corresponde a una buena calidad del agua, mientras que una calidad excelente presenta 500 UFC. En contraste con estos datos, la laguna de Zupitlán tiene un promedio de 275.8 UFC de *E. Coli*, con un solo punto de muestreo (*Entrada 1,2*) rebasando el límite de la *buena calidad* del agua, con 1560 UFC's.

El hecho de que el único punto que se encuentre fuera de una buena calidad del agua, en términos bacteriológicos, sea la conexión física con la presa El Sabino, sirve para comprobar que la mayor carga contaminante que recibe Zupitlán proviene de este cuerpo de agua fusible.

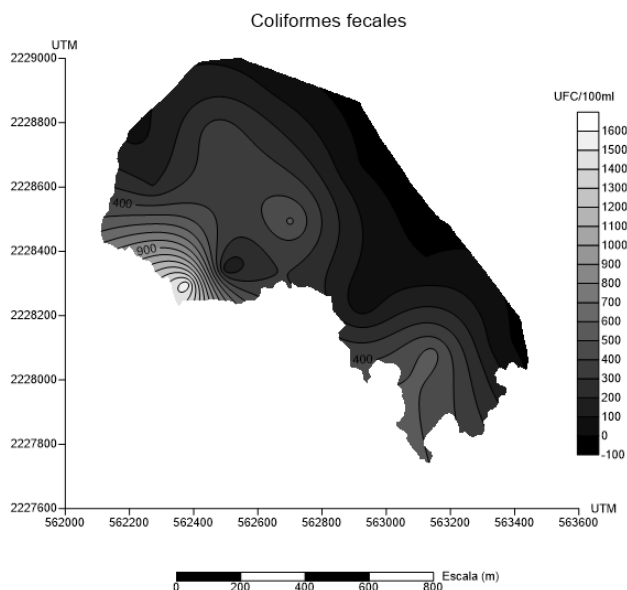


Figura 5.7: *Coliformes fecales en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en lluvias.*

■ Oxígeno disuelto

El parámetro oxígeno disuelto resultó mayormente homogéneo en el espejo de agua de la laguna de Zupitlán, con una desviación estándar de 2.05 mg/l.

La saturación del gas es casi del 100% en toda la extensión de la laguna, lo que significa que se alcanza y supera la máxima capacidad de retención de oxígeno disuelto. De forma empírica, al sumergir los cables y electrodos de los equipos, era posible ver la formación de burbujas en las superficies de los mismos. A pesar de que la superficie de la laguna estaba saturada de oxígeno, en visitas académicas posteriores a este trabajo se demostró que la saturación terminaba a los 30cm. A partir de dicha profundidad el oxígeno del agua caía hasta ser nulo a una profundidad de entre 70 y 90cm.

Entre la presa El Sabino y la laguna de Zupitlán, el oxígeno disuelto en ambos embalses sufre una caída del 200 %, esta baja se explica por el consumo del mismo debido a las descargas directas de industrias agrícolas en la presa El Sabino (ver figura 5.8). Dichas descargas proporcionan una enorme cantidad de

materia orgánica al agua, que es consumida por bacterias aerobias que agotan el oxígeno del reservorio.



Figura 5.8: Descarga puntual a la presa El Sabino proveniente de un centro de ganadería intensiva ($20^{\circ} 7'56.06''N$, $98^{\circ} 24'41.60''O$).

Se sugiere que, en algunos sitios de la presa El Sabino, el proceso de degradación de la materia orgánica llega a ser anaerobio, lo que significa que en los sedimentos de la laguna los sulfatos están siendo reducidos por bacterias que los utilizan para la oxidación de la materia orgánica, produciendo ácido sulfúrico (*ibid*), con el consiguiente olor desagradable.

■ pH

De acuerdo con la FAO (Ayers, 1989), los valores normales de pH para agua de irrigación (uno de los usos de la Laguna de Zupitlán) se encuentran entre 6.5 y 8.4. El pH según la misma fuente, no es un indicador directo de la calidad del agua, sino un parámetro que alerta sobre un síntoma distinto. En el caso de la laguna de Zupitlán, el valor de pH puede estar asociado a una alta actividad fotosintética, que consume CO_2 y aumenta la concentración de carbonatos en el agua (Fuentes, 2002).

La abundancia de carbonatos explica los altos valores de pH encontrados en

la laguna. El potencial de hidrógeno fue medido de forma superficial (a menos de 0.3m de profundidad) lo que está asociado a la capa de agua saturada de oxígeno por la acción fotosintética de la biomasa. De haberse hecho un muestreo estratificado de la laguna, habría sido posible esperar un detrimento del pH con la profundidad.

En el caso de la Presa El Sabino, el pH tiene un valor promedio 10.53 % (ver figura 5.2) menor que el de Zupitlán, lo que se atribuye al alto consumo de oxígeno de oxígeno por parte de las bacterias aerobias presentes en el embalse (*Ibid*).

■ Temperatura

La temperatura del agua ha sido supuesta como homogénea en toda la laguna. Gracias a esta suposición es que es posible evaluar los Índices de Estado Trófico a partir de muestreos no estratificados. A pesar de que la supuesta homogeneidad se justifica en función de la baja profundidad de la laguna, la realidad del primer muestreo revela que existe una ligera desviación estándar de 0.66°C.

A pesar de que la variación de la temperatura es muy baja, ésta puede explicarse por efectos del tiempo transcurrido entre el muestreo del primer punto y el último. El muestreo en Zupitlán tomó cuatro horas antes de moverse a la presa El Sabino, comenzando en el muelle localizado en la margen este de Zupitlán y recorriendo la laguna describiendo una elipse en contra del sentido de las manecillas del reloj.

Durante el primer muestreo no fue posible establecer una relación entre la temperatura de la laguna de Zupitlán y su batimetría, esto debido a que el segundo parámetro fue determinado hasta el segundo muestreo (estiaje).

Relación entre la presa El Sabino y la laguna de Zupitlán

Una de las premisas de esta investigación es que la presa El Sabino sirve como un sumidero de contaminantes para la laguna de Zupitlán, ofreciendo almacenamiento de sedimentos desde la cuenca que drena a ambas lagunas, y sirviendo como pretratamiento de las aguas que ingresan a Zupitlán por medio de la conexión que existe entre ambos embalses durante la época de lluvias. Dicho pretratamiento queda en evidencia si se observan los porcentajes de remoción de nutrientes, transparencia,

coliformes fecales y materia orgánica entre El Sabino y Zupitlán (que va desde el 14.7 % hasta el 98.12 %).

Análisis de correlaciones

De los isomapas para la campaña en lluvias (ser sección 5.1.2 y apéndice A.1) pueden apreciarse ciertas similitudes entre algunos parámetros, de acuerdo a las escalas de color elegidas. La semejanza visual de los parámetros resulta útil, sin embargo es necesario un respaldo analítico, por lo que se ha calculado el coeficiente de correlación lineal (r^2 o de Pearson), que cuantifica el grado de dependencia lineal entre dos variables.

El análisis del coeficiente de correlación lineal se ha realizado para todas las combinaciones de pares de parámetros posibles, de forma que aquellos coeficientes r^2 en el intervalo $[-1, -0.5] \cup [0.5, 1]$ (correlaciones fuertes) fueran encontrados. Las correlaciones fuertes indican que, en un diagrama de dispersión, los datos analizados se aproximan a una recta.

Para revisar que las correlaciones lineales fuertes no provengan de observaciones atípicas del muestreo, se utiliza una prueba de hipótesis usando el p-valor (comúnmente llamado *p-value*, del inglés), que es la probabilidad correspondiente para la estadística de ser posible bajo la hipótesis nula.

Para el caso del muestreo en lluvias tomemos, por ejemplo, el coeficiente de correlación lineal para el par de parámetros transparencia-nitratos, de 0.85 (ver tabla 5.3). La hipótesis nula, H_0 , será que ambos parámetros están relacionados linealmente. Si el p-valor es menor a un valor de significancia, α , entonces la hipótesis nula será inverosímil. El valor de significancia se elige pequeño pues es la medida en que aceptaremos una probabilidad de error (del 5 % si $\alpha=0.05$).

El p-valor para la relación lineal del par transparencia-nitratos es de 0.00004, lo que se traduce como una probabilidad del 0.004 % de acertar en que la hipótesis nula es verdadera (que existe una correlación lineal entre la transparencia y los nitratos), o, dicho de otro modo, un 99.996 % de probabilidad de que la hipótesis nula sea errada. Si hemos aceptado equivocarnos con una probabilidad de error no mayor del 5 %, la probabilidad de error para este caso es muy alto y se rechaza H_0 (La correlación lineal entre los parámetros transparencia y nitratos no es estadísticamente significativa).

En el caso del coeficiente de correlación lineal entre los nitratos y la batimetría (los parámetros del primer muestreo se contrastaron con la batimetría, pues, a pesar de que ésta fue obtenida durante el segundo muestreo, se ha supuesto constante a lo largo del tiempo, sin cambios significativos en la acumulación de detrito entre las dos campañas), $r^2=0.52$, con un p-valor de 0.0549, superior al nivel de significancia ($\alpha=0.05$), se dice que no hay evidencia suficiente para rechazar que dicha relación sea verosímil, por lo que se considera estadísticamente significativa.

En la tabla 5.3 se presentan las correlaciones de Pearson (o lineales) fuertes, así como el p-valor asociado a cada una, indicando si, con un nivel de significancia del 5 % la relación es estadísticamente significativa.

A un nivel de significancia del 95 %, la única relación estadísticamente significativa es la de los nitritos con la batimetría. Información de la FAO (1987) podría explicar esta correlación, pues, con el aumento de la profundidad de un cuerpo de agua, el contenido de gases disueltos se eleva, esto indica que la presencia de nitrógeno molecular, N_2 , en el agua crece a la par de la profundidad del reservorio. Asumiendo la presencia de bacterias nitrificantes, y suponiendo su distribución uniforme en la laguna, a mayor cantidad de nitrógeno molecular, mayor será también la producción de derivados oxidados de este. Lo anterior explica la relación proporcional entre la profundidad y los nitritos, sin embargo, no esclarece el por qué de la ausencia de una relación semejante entre la profundidad y el nitrógeno amoniacal y los nitratos.

En este trabajo se sugiere que la correlación nitritos-batimetría se debe a un tercer factor no considerado durante el diseño de la experimentación, como podría ser la cantidad de sedimentos en el punto de muestreo.

Conclusiones del muestreo en lluvias

Los resultados de la primera campaña de muestreo (en época de lluvias) permiten comprobar dos suposiciones previas a la campaña:

- La margen noreste, en la que se presenta ganadería intensiva y agricultura tecnificada no es la que presenta mayores concentraciones de nutrientes (con excepción de los nitratos, que pueden atribuirse a la salida del agua de la laguna de la última fase de oxidación del nitrógeno). Por lo que se sugiere que el bordo artificial, construido para el transporte de vehículos ligeros, en efecto,

Tabla 5.3: Correlaciones de Pearson fuertes del análisis estadístico multivariado, así como su respectivo p-value.

Parámetros	Pearson	P-valor	Estadísticamente
pH-Fosfatos	-0.6804	0.0047	No significativa
pH-coliformes fecales	-0.6586	0.0075	No significativa
Temperatura-transparencia	-0.5843	0.0221	No significativa
Transparencia-nitratos	0.8559	0.00004	No significativa
Transparencia-DQO	-0.8002	0.0010	No significativa
Transparencia-col. fecales	-0.5543	0.0320	No significativa
Transparencia-batimetría	-0.5495	0.0417	No significativa
Nitritos-DBO ₅	0.6219	0.0133	No significativa
Nitritos- % saturación de O.D.	0.6183	0.0140	No significativa
Nitritos-batimetría	0.5230	0.0549	Significativa
Nitratos-DQO	-0.6971	0.0080	No significativa
Nitratos-col. fecales	-0.6683	0.0064	No significativa
Nitratos-batimetría	-0.6584	0.0104	No significativa
Fosfatos-col. fecales	0.7988	0.003	No significativa
DQO-Coliformes fecales	0.6785	0.0107	No significativa
DBO ₅ - % saturación de O.D.	0.9803	1.5x10 ⁻¹⁰	No significativa
Col. fecales- % saturación de O.D.	-0.5347	0.0400	No significativa

La tabla muestra los resultados para las correlaciones de Pearson del análisis multivariado de la primera campaña de muestreo, El nivel de significancia elegido fue del 95 % ($\alpha=0.05$). O.D.= Oxígeno Disuelto.

ha funcionado también como una barrera física para los escurrimientos provenientes de las granjas.

Sobre este mismo hallazgo se sugiere evaluar el flujo aguas abajo de la laguna (antes de la siguiente mancha urbana), para saber si esta agricultura tecnificada tiene impactos negativos en el siguiente cuerpo de agua; que resulta ser el Río Grande de Tulancingo, kilómetros al norte de la Laguna de Zupitlán (Figura 5.9)

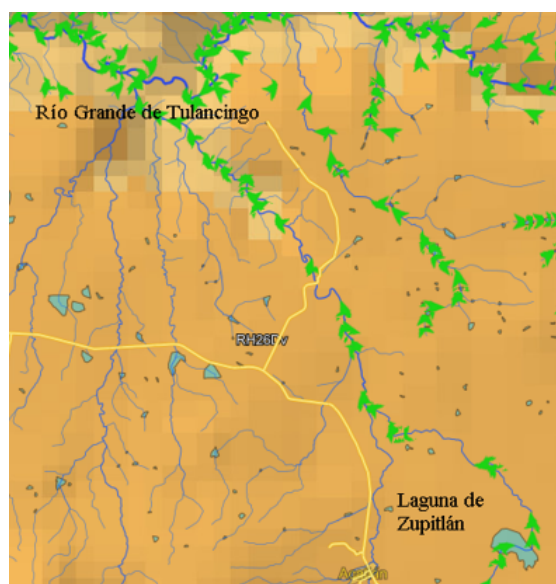


Figura 5.9: Líneas de flujo fuera de la Laguna de Zupitlán y en dirección al Río Grande de Tulancingo. Fuente: SIATL de INEGI, 2017.

- Existe una conexión hidráulica entre El Sabino y Zupitlán. Dicha conexión se aprecia en las representaciones cartográficas de INEGI (paquete de archivos Shape para el mapa 1:50,000, F14D82), sin embargo no pudo apreciarse durante las visitas de reconocimiento y campañas de muestreo. Es posible que la conexión entre ambos cuerpos de agua no haya sido encontrada durante los muestreos debido a que se encontraba dentro de los terrenos de los vecinos de las lagunas.

Anecdóticamente, los lancheros, que brindaron su apoyo durante los mues-

treos, hacen referencia a una entrada de agua desde el Sabino, principalmente en época de lluvia. Refieren que dicha entrada no es puntual, y que en los años más lluviosos puede ocupar cientos de metros del costado noroeste de Zupitlán. También puede verse esta conexión en la imagen de archivo de Google earth del lugar del 12/8/2016).

Se sugiere que la conexión superficial es de naturaleza intermitente, mientras que debe de existir comunicación subterránea entre ambos reservorios durante la época de estiaje.

La primera campaña de muestreo reveló la siguiente información sobre las distribución de las características físicas, químicas y bacteriológicas de la laguna:

- Existe un aumento puntual del contenido de nitritos en el centro de la laguna, probablemente causado por la mayor acumulación de sedimentos en el lugar.
- El crecimiento de microalgas es mayor al norte y al sur de la laguna.
- Hay una mayor DBO_5 al norte y al sur de la laguna.
- El valor del pH es superior a 9 en toda la laguna (con excepción del punto de muestreo “Entrada 2”).

5.1.3. Segunda campaña, estiaje

En la tabla 5.4 se presentan los resultados de los estudios de laboratorio para la Laguna de Zupitlán y la presa El Sabino durante el muestreo en estiaje.

De manera similar a la primera campaña de muestreo, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los resultados obtenidos durante el muestreo, esto para poder seguir el supuesto de que la Presa El Sabino funciona como un *fusible* para Zupitlán, recibiendo y neutralizando (dentro de sus capacidades químicas, biológicas e hidráulicas) un porcentaje de la carga contaminante proveniente de su zona de influencia. Este análisis puede encontrarse en la tabla 5.5.

Los puntos M8 y M10 de la red de muestreo no fueron accesibles durante esta toma de muestras; el primero debido al crecimiento de maleza acuática, y el segundo a causa de la conglomeración de redes de pesca que podían ser rotas por las aspas de la lancha en la que fueron recogidas las alícuotas.

La muestra para nitrógeno amoniacal para el punto “Salida 1, 2” se perdió debido a la fractura del contenedor muestreador durante el traslado al laboratorio.

Durante la segunda campaña se midió la batimetría de la laguna en todos los puntos de muestreo, esta medición se realizó utilizando la plomada y cadena del disco Secchi, sumergiéndolo en la laguna y tomando la medida al sentir el contacto entre la plomada y el lecho de sedimentos. La sensación al tacto de la plomada al tocar el fondo permitió identificar la profundidad del lecho de sedimentos, más no la del lecho firme de la laguna.

Resultados de la segunda campaña en la Laguna de Zupitlán

Muestra	pH	Temp (°C)	Transparencia (cm)	NO ₂ - (mg/l)	NO ₃ - (mg/l)	N NH ₃ (mg/l)	PO ₄ 3- (mg/l)	SST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	Cla (mg/l)	Coliformes Fecales (UFC/100ml)	% sat. OD	O.D. (mg/l)	Batimetría (m de profundidad)
Salida 1,2	10.19 ^{1,2}	20.4	68 ²	0.013	7.92	-	0.53	6	28.5	21.35 ³	0.019	10	143.5	11.77	1.5
Salida 3,4	10.15 ^{1,2}	21.2	66 ²	0.013	6.6	0.01	1.17	24 ³	49.5	31 ^{3,4,5}	0.036	0	151.3	12.41	1.04
Salida 5	10.32 ^{1,2}	21.5	61 ²	0.013	6.6	0	0.26	18	25	16.25	0.042	20	138.5	11.36	1.21
Entrada 1	10.94 ^{1,2}	22	74 ²	0.010	11	0.01	0.48	13	16.5	27.6 ³	0.017	45	109.4	8.97	1.23
Entrada 2	9.89 ^{1,2}	21	66 ²	0.000	17.16	0.01	1.115	21 ³	28	37.3 ^{3,4,5}	0.036	220	126.2	10.35	1.35
M1	9.99 ^{1,2}	21.1	60 ²	0.010	9.24	0.01	1.08	19	112.5	25.4 ³	0.033	300	118.5	9.72	1.33
M2	10.2 ^{1,2}	20.3	50 ²	0.018	8.58	0	0.135	171 ^{1,4,5,6}	32.75	19.9333	0.033	20	141	11.56	1.45
M3	10.22 ^{1,2}	20.4	73 ²	0.008	7.92	0	0.08	13	31	21 ³	0.040	0	148.8	12.20	1.64
M4	10.25 ^{1,2}	20.7	68 ²	0.030	7.48	0.02	0.19	16	24.5	13.25	0.034	20	150.8	12.37	1.1
M5	10.24 ^{1,2}	20.7	65 ²	0.007	8.8	0.01	0.21	9	42.5	37.1 ^{3,4,5}	0.044	0	165.5	13.57	1.69
M6	10.25 ^{1,2}	20.8	64 ²	0.007	5.94	0.01	0.56	11.5	38.5	37.2 ^{3,4,5}	0.037	45	141.7	11.62	1.63
M7	10.22 ^{1,2}	20.6	50 ²	0.015	3.96	0	0.215	14.5	26	16.75	0.037	0	155.9	12.78	1.29
M9	10.05 ^{1,2}	20.6	57 ²	0.010	7.48	0.01	0.11	9	31	17.6	0.046	0	175.5	14.39	1.17
M11	10.13 ^{1,2}	21.7	65 ²	0.003	7.92	0.01	0.48	11	27.5	40.4 ^{3,4,5}	0.031	20	167	13.69	1.04

Resultados de la segunda campaña en la Presa El Sabino

Muestra	pH	Temp (°C)	Transparencia (cm)	N NO ₂ - (mg/l)	N NO ₃ - (mg/l)	N NH ₃ (mg/l)	PO ₄ 3- (mg/l)	SST (mg/l)	DQO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	Cla (mg/l)	Coliformes fecales (UFC/100ml)	% sat. OD	O.D. (mg/l)
A	8.79 ²	23.7	-	0.07	7.92	0.1 ⁷	8.20	19.00	261.00	102 ^{3,4,5,6}	0.21	100.00	112.80	9.25
B	8.43 ²	26.7	-	0.08	6.60	0.25 ⁷	7.23	21.67 ³	234.00	111.6 ^{3,4,5,6}	0.22	800.00	91.10	7.47

¹ Parámetros que rebasan los límites establecidos en los Criterios ecológicos CE-CCA-1989 para el riego agrícola.

² Parámetros que rebasan los límites establecidos en los Criterios Ecológicos CE-CCA-1989, para la carpa

³ Parámetros que rebasan los límites establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1996 para el uso de agua residual tratada con contacto directo.

⁴ Parámetros que rebasan los límites establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1996 para el uso de agua residual tratada con contacto indirecto.

⁵ Parámetros que rebasan los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para el uso de agua residual en el uso público urbano.

⁶ Parámetros que rebasan los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 para el uso de agua residual en riego agrícola.

⁷ Parámetros que rebasan los límites establecidos en los Criterios Ecológicos CE-CCA-1989, para la vida acuática.

Tabla 5.4: Resultados de los estudios fisicoquímicos y bacteriológicos para la segunda campaña de muestreo en la Laguna de Zupitlán y la presa El Sabino (abajo). Elaboración propia.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio (Zupitlán)	Desviación estándar	Media (Sabino)	% remoción
pH	9.89	10.94	10.22	0.24	8.61	-18.67
Temp (°C)	20.3	22	20.87	0.52	25.20	17.19
Transparencia (cm)	50	74	63.36	7.25	-	-
NO ₂ - (mg/l)	0	0.0297	0.01	0.01	0.07	84.89
NO ₃ - (mg/l)	3.96	17.16	8.33	3.02	7.26	-14.72
N NH ₃ (mg/l)	0	0.02	0.01	0.01	0.18	95.60
PO ₄ 3- (mg/l)	0.08	1.17	0.47	0.39	7.71	93.87
SST (mg/l)	6	171	25.43	42.20	20.33	-25.06
DQO (mg/l)	16.5	112.5	36.70	23.31	247.50	85.17
DBO ₅ (mg/l)	13.25	40.4	25.87	9.23	106.80	75.78
Cla (mg/l)	0.01737	0.04618	0.03	0.01	0.22	84.00
Coliformes fecales (UFC/100ml)	0	300	50.00	91.63	450.00	88.89
O.D. (mg/l)	8.97	14.39	11.91	1.51	8.36	-42.47
% sat. OD	109.4	175.5	145.25	18.47	101.95	-42.47

Tabla 5.5: Análisis estadístico descriptivo para la Laguna de Zupitlán y El Sabino, en el segundo muestreo, se incluye la remoción de contaminantes entre los dos cuerpos.

5.1.4. Análisis de los resultados de la segunda campaña

- **Parámetros asociados a la eutrofización: Fósforo, Clorofila *a* y Transparencia con disco Secchi.**

Durante el segundo muestreo realizado en este estudio (estiaje) los fosfatos en la laguna alcanzaron un máximo en la margen oeste. Esto, como en el primer muestreo, está asociado con la entrada de la presa El Sabino.

La concentración máxima de fosfatos en el segundo muestreo fue de 1.17 mg/l, lo que significa una reducción del 24% en relación al pico encontrado durante el muestreo en lluvias. Este hallazgo es contrario a lo esperado dentro de un embalse que ha disminuido su volumen por acción de la evapotranspiración y está falto de entradas de precipitación.

Lo anterior puede traducirse como una menor entrada de fosfatos, lo que es consecuente con el supuesto de una conexión hidráulica periódica intermitente entre Zupitlán y El Sabino: En época de lluvias hay una mayor entrada de fosfatos debido a que El Sabino y Zupitlán están físicamente conectadas, mientras que en estiaje el fósforo encontrado se limita a aquel que proviene de los terrenos de la zona de influencia efectiva y al del reciclaje interno de nutrientes en la laguna de Zupitlán.

La clorofila *a* mantuvo una distribución geográfica similar a la del primer muestreo, concentrándose al norte de la laguna con un mínimo al sur (ver la figura 5.10). A pesar de que los valores máximos y mínimos en el segundo muestreo fueron ligeramente mayores a aquellos encontrados en la época de lluvias, el promedio de clorofila *a* se mantuvo constante a lo largo del año, de lo que se concluye que las variaciones en el sustrato (fósforo y nitrógeno) no son suficientes para afectar la variabilidad en la reducción de biomasa a lo largo del año.

En el segundo muestreo, con el fin de evitar errores causados por la turbulencia ocasionada por la lancha de motor al leer la transparencia del agua, se dejó *reposar el agua* 5 minutos una vez ubicado cada punto de muestreo. De esta forma los sólidos resuspendidos no ocasionarían interferencias al disco Secchi. Esta precaución se reflejó en los resultados; que muestran una mayor transparencia al centro de la laguna, en dirección este a oeste. Este resultado ayuda, en conjunto con el movimiento de las formas del nitrógeno del primer muestreo, y la mayor presencia de fosfatos del lado oeste, a sugerir que las líneas de flujo en la laguna describen una trayectoria similar a la descrita en la figura 5.10.

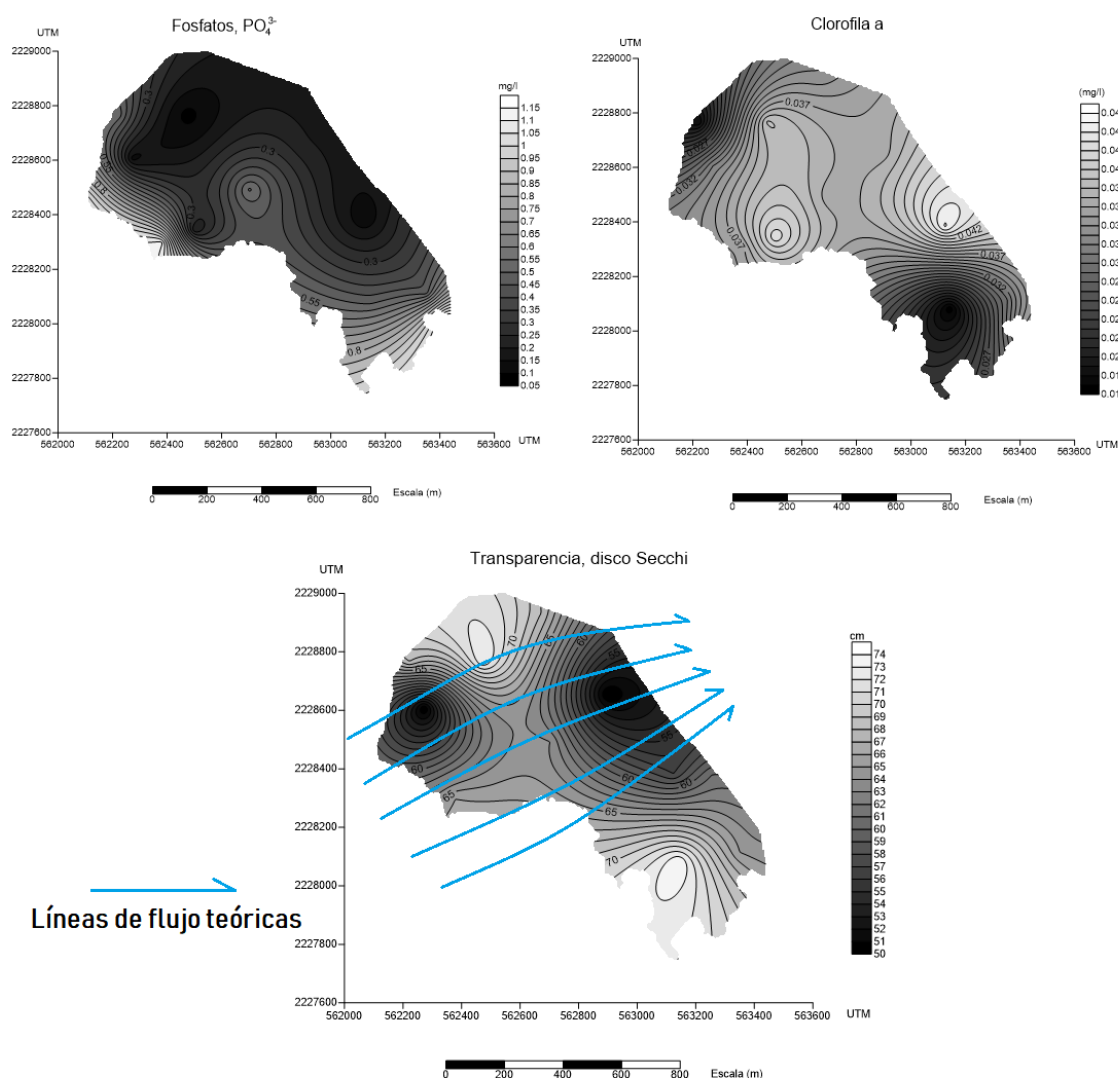


Figura 5.10: *Parámetros relacionados con la eutrofización en la laguna de Zupitlán durante el muestreo en estiaje. Se muestran las líneas de flujo teóricas de la laguna, sugeridas a partir de los resultados de la transparencia.*

■ Formas del nitrógeno

El amoníaco encontrado en el segundo muestreo fue considerablemente más bajo que durante el primero (50 % más bajo). El comportamiento de los nitritos y los nitratos fue similar, con valores que resultaron 50 % y 20 %, respectivamente.

Lo más relevante ocurrido con el nitrógeno en la laguna de Zupitlán fue que el movimiento de sus diferentes formas (amoniaco-nitritos-nitratos, de acuerdo a la oxidación de estos productos ocasionada por las bacterias presentes en la laguna) cambió su sentido, con el amoniaco concentrado al noreste de la laguna, llegando a un máximo de nitratos en el este de la misma (ver figura 5.11). Dicho sentido implica que el nitrógeno recién descargado a la laguna proviene del margen contrario que en el muestreo en lluvias, lo que puede asociarse con una falta de ingresos de nitrógeno que provoca que la principal fuente del nutriente provenga de la carga interna de los sedimentos en el fondo del embalse.

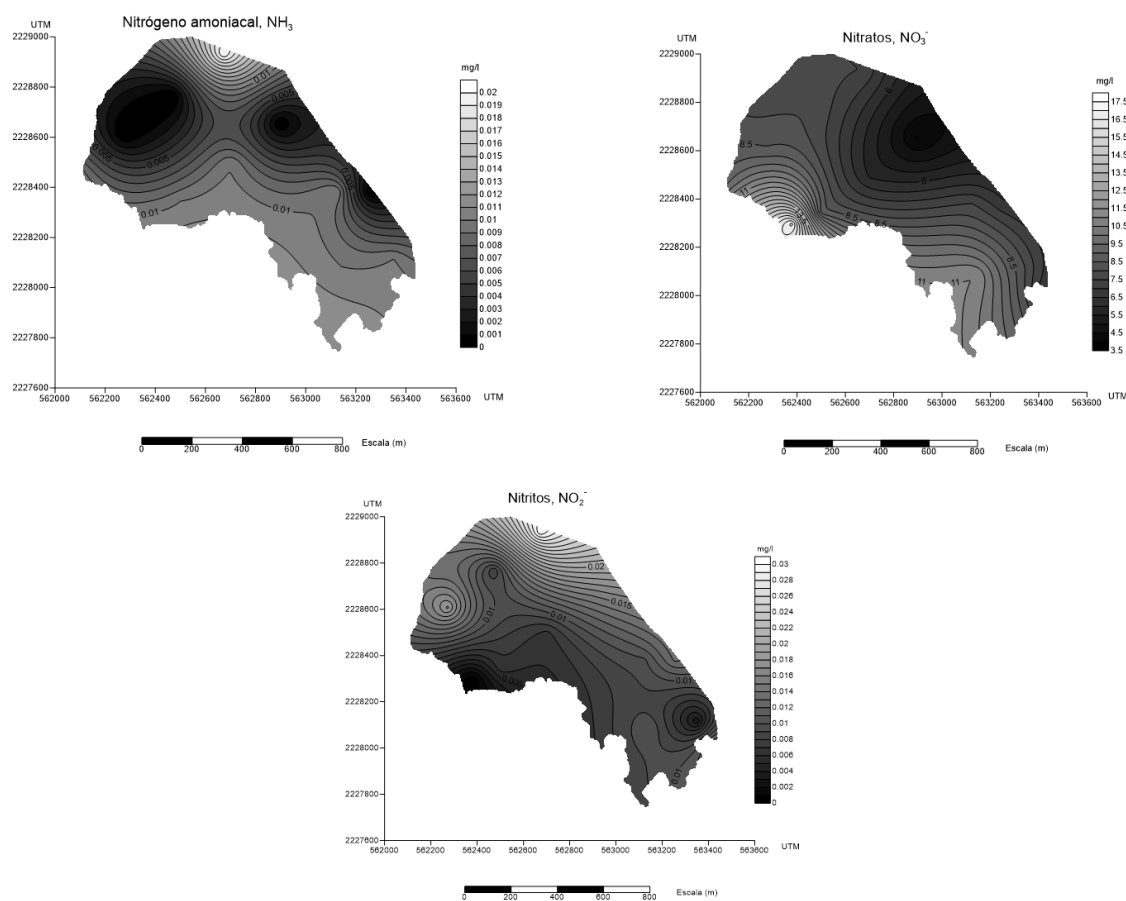


Figura 5.11: Distintas formas del nitrógeno encontradas en la laguna de Zupitlán durante el muestreo en estiaje.

■ Sólidos Suspendedos Totales

Los sólidos suspendidos encontrados en el segundo muestreo aumentaron su valor un 22.4 %, con un máximo al noroeste de la laguna en el punto M2 de la red de muestreo. Durante el primer muestreo el punto de máximos sólidos (que se asoció con el punto de máxima turbulencia) estuvo ubicado en la margen contraria de la laguna.

La discrepancia entre los valores del primer y segundo muestreo, sugiriendo una modificación en el lugar de la máxima turbulencia en la laguna, lleva a pensar que existe un error en la determinación de los sólidos en el punto *M2*, error que se vuelve evidente observando que el valor de los sólidos en suspensión en este punto es de 171 mg/l, muy por arriba del siguiente valor máximo, de 24 mg/l en el punto *Salida 3,4*.

Asumiendo el error, y desestimando el punto *M2*, el promedio de Sólidos Suspendidos Totales es de 14.23 mg/l, valor que es menor que el promedio hallado durante estiaje, y consistente con una menor turbulencia ocasionada por la falta de un flujo entrando desde El Sabino. La distribución de los sólidos suspendidos se observa en la figura 5.12.

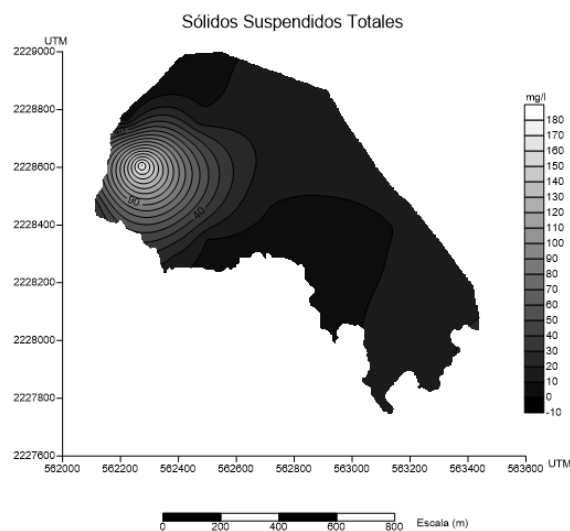


Figura 5.12: *Sólidos Suspendidos Totales en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en estiaje.*

■ Materia orgánica en la laguna, DQO y DBO₅

A diferencia del primer muestreo, los valores de DBO_5 y DQO resultaron tener diferencias menores, con una relación promedio DQO/DBO_5 de 2.3. De acuerdo con Cisterna (s.f.), efluentes con relaciones $(\text{DQO}/\text{DBO}_5) < 2.5$ resultan fácilmente biodegradables, esto se ajusta a lo esperado en un cuerpo de agua que recibe contaminantes provenientes de la agricultura.

En la sección 5.1.4 se aborda la relación entre la DQO y DBO_5 con los fosfatos, mismas que indican que la alta cantidad de materia biodegradable es producto de la abundancia de la biomasa.

Los valores máximos de materia biodegradable en el segundo muestreo se encuentran en las entradas provenientes de la presa El Sabino. Esto lleva al siguiente razonamiento: mayor cantidad de fósforo, mayor producción de biomasa, mayor cantidad de biomasa, más materia biodegradable para las pruebas de DQO y DBO_5 (ver figura 5.13).

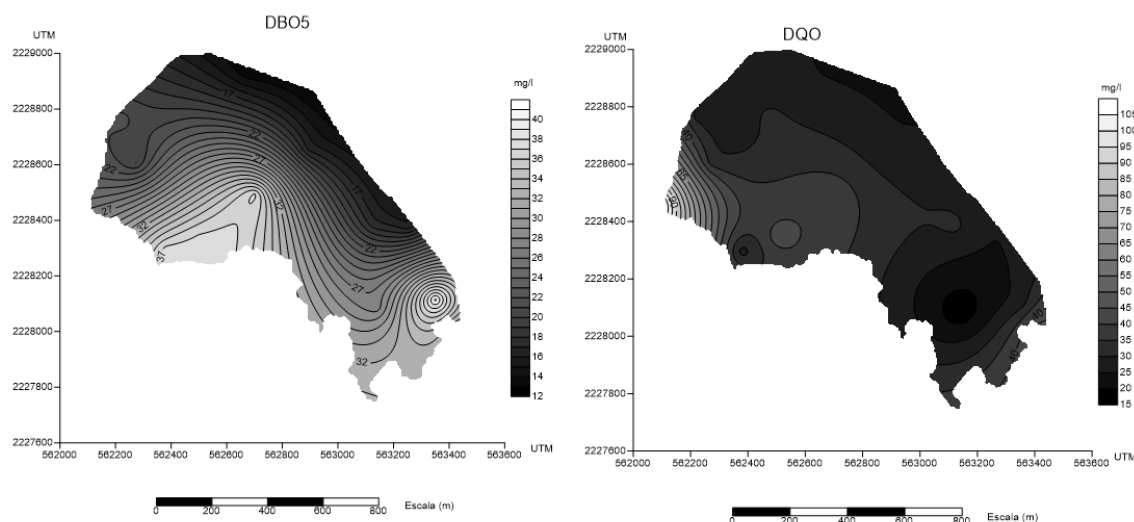


Figura 5.13: Materia orgánica en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje, medida por medio de DQO y DBO_5 .

■ Coliformes fecales

Las coliformes fecales (puntualmente, el microorganismo *Escherichia Coli*), como ha sido mencionado antes, son un indicador de la presencia de desechos fecales provenientes de aguas residuales crudas y tratadas (ausentes en este

estudio), fugas desde las fosas sépticas de las casas aledañas y mamíferos asociados a la ganadería de la zona.

Durante el segundo muestreo, la concentración de los coliformes fecales disminuyó un 82% respecto al muestreo en época de lluvias, manteniendo un máximo en la margen izquierda de la laguna.

Lo que puede concluirse de este resultado es que los coliformes fecales provienen de la misma margen de la laguna (oeste) a lo largo del año de forma consistente, de forma que la fuente de éstos es continua, y se trata de los animales aprovechados en la ganadería extensiva por los pobladores de la localidad de Los Pocitos. Los coliformes constantes también podrían deberse a las fugas de las fosas sépticas, sin embargo los alcances de este trabajo no permiten confirmar esta última afirmación.

En la figura 5.14 se aprecia la distribución de este parámetro. Al norte de la laguna se observa un círculo sin color, lo que se debe a que el software interpolador interpreta resultados negativos en este lugar. Con fines prácticos, dichos valores negativos, se interpretan como una zona carente de *E. Coli*.

■ Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en la laguna presentó valores de entre 8.97 mg/l y 14.39 mg/l, ambos por encima de del 100% de la saturación del gas esperada a esa temperatura y altitud.

Los valores de oxígeno encontrados permiten fácilmente el desarrollo de especies aprovechables como la carpa (que requiere únicamente 5 mg/l de oxígeno disuelto) y se relacionan a la alta actividad fotosintética de la laguna.

El porcentaje de saturación de oxígeno disuelto distribuido en la laguna (ver figura 5.15) revela, al igual que otros parámetros, que la margen de la laguna de Zupitlán colindante con la presa El Sabino tiene características desfavorables para el desarrollo de la vida acuática y el aprovechamiento del embalse para los pobladores. En términos del oxígeno disuelto, su concentración aumenta en el centro y margen este, lo que podría ser un indicador de un estancamiento del

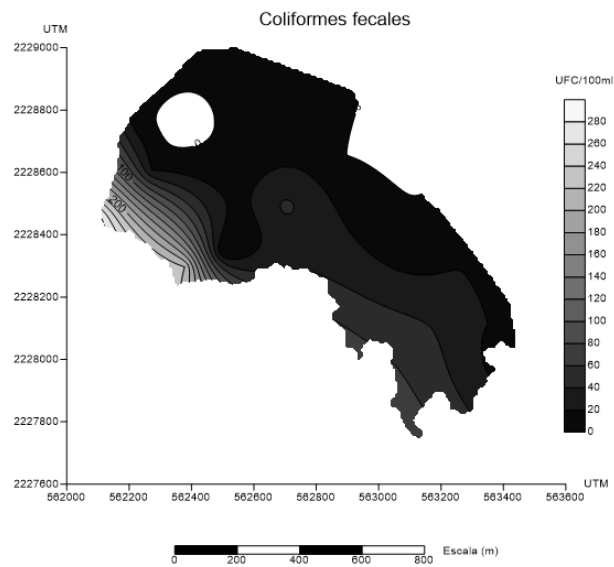


Figura 5.14: *Coliformes fecales, medidas como Unidades Formadoras de Colonias de E. Coli, en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje.*

agua al oeste, o bien de una alta actividad de bacterias aerobias consumiendo los restos de la biomasa algal en la zona.

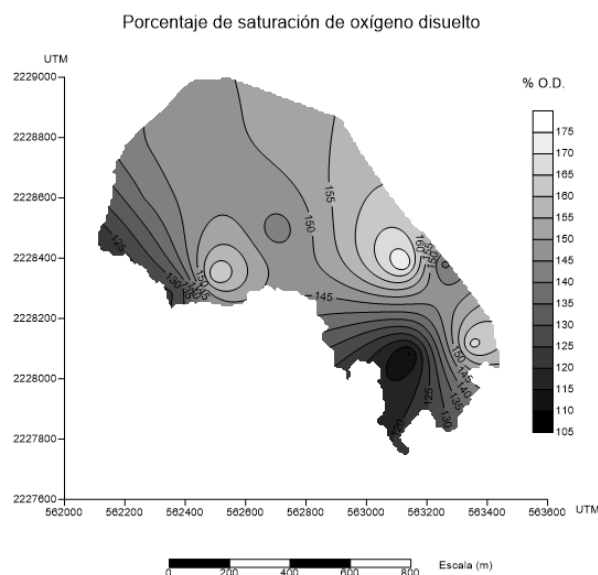


Figura 5.15: Oxígeno disuelto, medidas como porcentaje de saturación del gas, en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje.

■ pH

El pH encontrado en el muestreo en época de estiaje subió, en términos del valor promedio en la laguna, 0.75 puntos, llegando a detectarse valores máximos de 10.94 unidades de pH en el sitio de muestreo *Entrada 1*.

Geográficamente, el potencial de hidrógeno tiene valores más altos al suroeste de la laguna, descendiendo hasta un mínimo de 9.89 en el punto *Entrada 2*, al noroeste.

Valores de pH muy altos, por encima de 10, pueden desarrollarse a partir del agotamiento fotosintético del CO_2 (Talling, 2010). Las elevadas concentraciones de oxígeno disuelto en la laguna están asociadas a gran cantidad de biomasa algal (al menos en la capa superior de agua muestreada en este estudio), misma que agota el dióxido de carbono del agua en el proceso de fotosíntesis, evitando la formación de especies ácidas, como el ácido carbónico.

Adicional a lo dicho previamente, el volumen reducido de la laguna en verano (por evaporación) es propicio para la acumulación de carbonatos y bicarbonatos, y explica el aumento del parámetro pH. La distribución del pH en la

alguna durante el estiaje se observa en la figura 5.16.

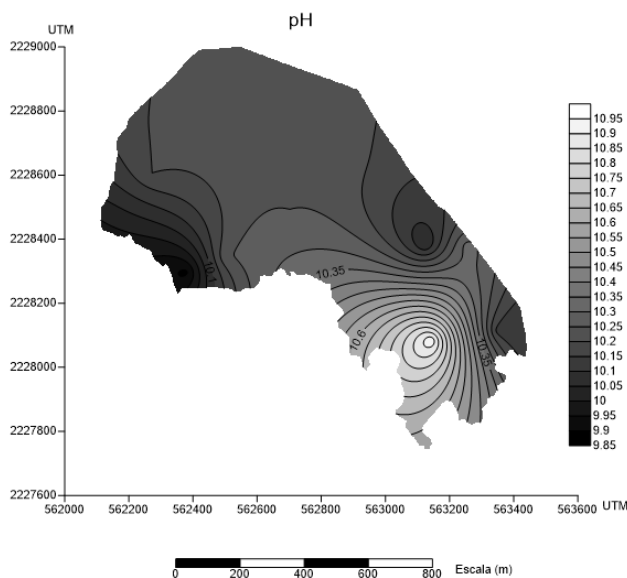


Figura 5.16: Valores de pH en la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje.

■ Temperatura

La variación de la temperatura durante el segundo muestreo es atribuible a la variación estacional de la temperatura local (en el segundo muestreo, en verano, la temperatura se incrementó 1.02°C respecto a la época de lluvias).

Geográficamente, la temperatura máxima está ubicada al sur de la laguna, sin embargo, esto no tiene mayores implicaciones, pues es fácilmente explicado por la duración del muestreo, que comenzó por la mañana (con una temperatura moderada) y terminó pasado el medio día con el sol en su mayor intensidad.

■ Batimetría

La parte más profunda de la laguna corresponde con su margen este, donde también se encuentra el bordo artificial para el paso de vehículos. Este estudio supone que la mayor profundidad se debe a que, al momento de construir el bordo, la maquinaria que dragó la laguna y utilizó el material retirado como relleno (probablemente retroexcavadoras) debió raspar el fondo del embalse y

usar la margen como apoyo, lo que provocó un aumento de la profundidad de la laguna en esta sección. Esta teoría se fundamenta en el hecho de que el resto del perímetro de la laguna conserva formas geométricas irregulares, naturales, que coinciden con una batimetría menos diferenciada.

No existe información sobre la construcción del paso de vehículos en la laguna. Sin embargo, un mapa de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, SRH (ahora CONAGUA), muestra una laguna de Zupitlán de perímetro menos anguloso. Lo que indica que la construcción del sendero fue posterior a 1976, año en que la SRH publicó el mapa (Ver figura 5.17).

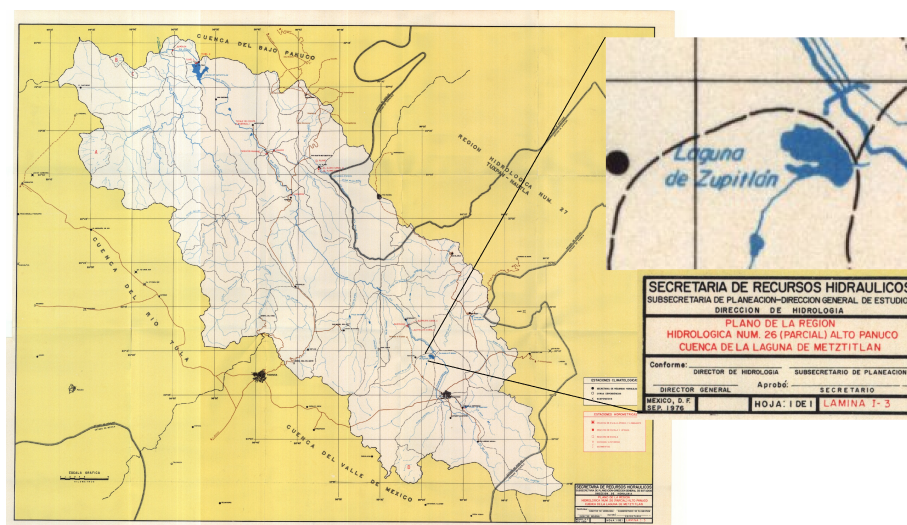


Figura 5.17: Mapa de la región hidráulica-administrativa 26 (Alto pánuco), de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (1976). Se aprecia un borde menos anguloso en el costado este de la Laguna de Zupitlán.

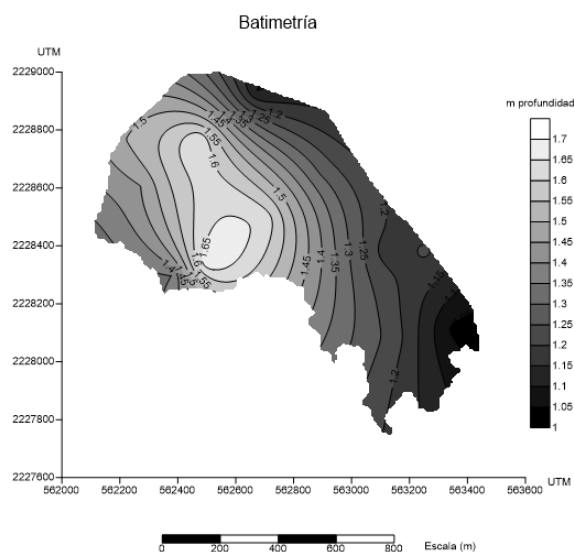


Figura 5.18: Batimetría de la Laguna de Zupitlán durante el muestreo en época de estiaje. En este trabajo se supone que la batimetría es constante a lo largo del año.

En la figura 5.18 se observa que la máxima profundidad de la laguna está en una franja al centro que va de sur a norte, como se ha mencionado antes, esto coincide con las actividades de dragado que debieron realizarse en la construcción del camino de terracería y con la limpieza mecánica realizada por el municipio.

El perfil de la laguna, sin accidentes topográficos importantes, y con una amplia zona litoral (amplias orillas) es favorable para el desarrollo de maleza acuática en grandes áreas de la laguna, lo que ofrece resguardo a las crías de peces que viven en el embalse (Harper, 1992) y aumentan su beneficio en la economía local.

Relación entre la presa El Sabino y la laguna de Zupitlán

En el segundo muestreo, los parámetros: temperatura, nitritos, nitrógeno amoniacal, fosfatos, DQO, DBO₅, clorofila *a* y coliformes fecales disminuyeron, en promedio, un 78 % su valor entre El Sabino y Zupitlán; mientras que el pH, los nitratos, los sólidos suspendidos totales y el oxígeno disuelto aumentaron su valor promedio un 25.23 % (ver figura 5.19).

En el tenor de la línea de investigación que establece a la presa El Sabino como una laguna *fusible* para Zupitlán, los resultados muestran, en su mayoría, una disminución

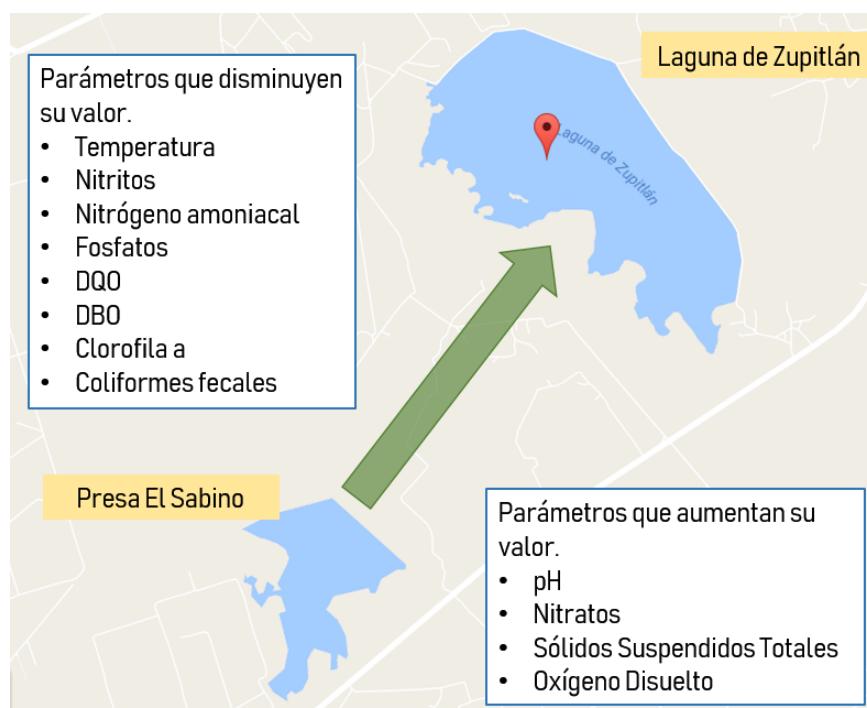


Figura 5.19: Reducción y aumento, entre la presa El Sabino y la Laguna de Zupitlán, de los diferentes parámetros analizados durante el muestreo en estiaje.

de sus valores promedio registrados, al pasar el agua de un embalse a otro. Aunque algunos de los parámetros mostraron un aumento entre El Sabino y Zupitlán, dicho crecimiento encuentra interpretaciones consistentes con el supuesto de la laguna fusible:

- El aumento del pH indica que el agua es más ácida en la presa El Sabino, lo que se explica por la ocurrencia de procesos de descomposición anaerobia de materia orgánica, que tienen entre sus subproductos el CO_2 , que en solución acuosa forma ácido carbónico.
- El aumento de nitratos puede deberse a que la toma de muestra fue realizada en una zona accesible a pie de la presa, misma que podría presentar un estancamiento importante, y por tanto presentar una abundancia de la última forma oxidada del nitrógeno.
- El incremento de los sólidos suspendidos totales puede explicarse por la presencia de espuma en la capa superficial del agua de El Sabino, además del tirante

extremadamente bajo en el lugar de la toma de muestra (debido a que zonas más profundas resultaban inaccesibles sin equipo o protección especial), que conllevaba la resuspensión del detrito al sumergir el recipiente de muestreo.

- El oxígeno disuelto aumenta entre El Sabino y Zupitlán debido a que en el primer embalse las bacterias aerobias que descomponen a las microalgas muertas tienen una alta demanda de oxígeno disuelto, agotándolo en algunas zonas del embalse, llegando a un esquema de respiración bacteriana anerobia. Lo anterior no ocurre en Zupitlán, pues la materia orgánica a degradar no es la suficiente para que las bacterias agoten el oxígeno, mismo que regresa a la laguna por efecto de la fotosíntesis de la biomasa y el viento.

Análisis de correlaciones

Tras la comparación de cada uno de los parámetros estudiados en el segundo muestreo, por medio de todas las combinaciones posibles de los mismos para obtener el valor del coeficiente de correlación lineal (o de Pearson) entre ellos, se han encontrado relaciones que son fuertes y significativas estadísticamente (ver sección 5.1.2 para mayores detalles) en los resultados del segundo muestreo. A continuación se presentan las relaciones encontradas (tabla 5.6) así como sus posibles interpretaciones.

Las relaciones estadísticas significativas que se encontraron en esa campaña fueron proporcionales para los pares fosfatos-DBO₅ y fosfatos-DQO, esto se explica debido a que los fosfatos y sus diferentes formas disueltas en la laguna sirven de sustrato a la flora y fauna del lugar. Ambas pruebas (DQO y DBO) miden la cantidad de materia orgánica, sea bioquímica o químicamente biodegradable. Entre más sustrato disponible, mayor biomasa (y subproductos de desecho biológico), lo que se traduce como más material oxidable para las pruebas de demanda de oxígeno.

Las relaciones encontradas que fueron significativas, y proporcionalmente inversas, se dieron entre la transparencia y los sólidos suspendidos totales y el pH y la clorofila *a*. La primera puede explicarse de forma simple, pues es conocido que mientras menos sólidos se encuentren en el agua, esta será más transparente. Para la segunda (a mayor pH, menor clorofila *a*), el autor propone que existe, para las especies de microalgas en la laguna de Zupitlán, un rango de pH óptimo, dentro del cual la biomasa puede desarrollarse, mismo que se supera en las zonas de menor abundancia de algas (y la consecuente menor abundancia del pigmento clorofila *a*).

Tabla 5.6: Correlaciones de Pearson fuertes del análisis estadístico multivariado, así como su respectivo p-value, para la segunda campaña de muestreo.

Parámetros	Pearson	P-value	Estadísticamente
pH-Clorofila <i>a</i>	-0.5001	0.0685	Significativa
Temperatura-Batimetría	-0.5460	0.0433	No significativa
Transparencia-SST	-0.5321	0.0501	Significativa
Nitritos-DBO ₅	-0.7589	0.0016	No significativa
Nitratos-Coliformes fecales	0.6023	0.0226	No significativa
Fosfatos-DQO	0.5268	0.0529	Significativa
Fosfatos-DBO ₅	0.5049	0.0654	Significativa
Fosfatos-Coliformes fecales	0.6780	0.0076	No significativa
DQO-Coliformes fecales	0.6907	0.0062	No significativa
Clorofila <i>a</i> - % saturación de O.D.	0.5646	0.0354	No significativa
col. fecales- % saturación de O.D.	-0.6220	0.0175	No significativa

La figura muestra los resultados para las correlaciones de Pearson del análisis multivariado de la segunda campaña de muestreo, El nivel de significancia elegido fue del 95 % ($\alpha=0.05$). O.D.= Oxígeno disuelto, SST= Sólidos Suspendidos Totales.

Conclusiones del muestreo en estiaje

La campaña de muestreo en época de lluvias arrojó las siguientes conclusiones:

- La remoción de nitritos y nitrógeno amoniacal está por encima del 80 % entre la presa El Sabino y la laguna de Zupitlán. Esto no pasa con los nitratos, lo que podría deberse al estancamiento del agua en la presa El Sabino, que propicia que la especie del nitrógeno más abundante sea la última que se obtiene por la secuencia de oxidación bacteriana: nitrógeno orgánico, amoníaco, nitritos, nitratos. Lo que se traduce como una contaminación ya estabilizada con nitrógeno.
- El fósforo, en forma de ortofosfatos, es retenido por El sabino casi en su totalidad, con un porcentaje de remoción cercano al 94 %, lo que produce una caída similar en la producción de biomasa algal (hay una disminución de producción de clorofila *a* de un 84 %).
- Como en el primer muestreo, el oxígeno disuelto en la superficie de la laguna aumentó entre El Sabino y Zupitlán, sin embargo, a diferencia del primer muestreo (Donde se observó un aumento del 199 %), en este caso el aumento en

el parámetro fue menor, con únicamente un alza de 42 %. Esto no quiere decir que la calidad del agua de Zupitlán haya bajado drásticamente, este resultado está asociado a la mayor aireación del Sabino, relacionada con mayores vientos (que pudieron apreciarse durante el muestreo) y al oxígeno disuelto aportado por la lluvia.

Diferencia entre los muestreos

En la tabla 5.7 se aprecia la diferencia entre las medias de cada parámetro medido en la Laguna de Zupitlán durante el primero y segundo muestreo. Las variaciones de los parámetros pueden ser positivas (aumento en el parámetro), negativas (disminución en el parámetro) o bien, nulas.

La tabla 5.7 es también importante para apoyar una de las hipótesis que fueron supuestas al principio del trabajo: La presa El Sabino es responsable de la mayor parte de la carga orgánica que entra a la Laguna de Zupitlán. Al ser, la zona de influencia de la cuenca del Sabino la envolvente de la de Zupitlán, se ha supuesto que la mayor parte del agua que fluye desde la cuenca hacia éste segundo cuerpo, pasa primero por El Sabino. Suponiendo que los contaminantes que llegan a los dos embalses son los mismos, pues la vocación de los terrenos en la cuenca de la zona de influencia es similar, un comportamiento de disminución de la carga contaminante sería de esperarse, causado por los efectos de la retención mecánica y el procesamiento bioquímico de ésta.

Ninguna de las visitas a la laguna fue coincidente con la observación de una conexión física superficial entre El Sabino y Zupitlán, sin embargo esta conexión está plasmada en la cartografía disponible (y actualizada) de INEGI, y debe ser de naturaleza intermitente, generando zonas de inundación que unen a los dos reservorios durante los eventos de precipitación pluvial extraordinarios. La aseveración anterior se sustenta en el hecho de que, durante la época de estiaje, las concentraciones de nitritos, nitrógeno amoniacal, ortofosfatos, DQO y coliformes fecales disminuyen.

La disminución del valor promedio de los parámetros antes mencionados es contraria a la lógica de que la concentración de un contaminante es igual a la razón entre la masa de este y el volumen de la dilución.

Si el volumen de la laguna disminuye en época de estiaje (a causa de la evaporación),

Parámetro	Promedio primer muestreo (lluvias)	Promedio segundo muestreo (estiaje)	Tipo de variación	Valor de la variación
pH	9.47	10.22	Aumento	0.74
Temp (°C)	19.85	20.87	Aumento	1.02
Transparencia (cm)	49.80	63.36	Aumento	13.56
NO ₂ - (mg/l)	0.04	0.01	Disminución	0.02
NO ₃ - (mg/l)	6.94	8.33	Aumento	1.39
N NH ₃ (mg/l)	0.02	0.01	Disminución	0.01
PO ₄ 3- (mg/l)	0.49	0.47	Disminución	0.02
SST (mg/l)	20.77	25.43	Aumento	4.66
DQO (mg/l)	323.38	36.70	Disminución	286.69
DBO ₅ (mg/l)	14.84	25.87	Aumento	11.02
Cla (mg/l)	0.03	0.03	Nula	0.00
Coliformes fecales (UFC/100ml)	275.87	50.00	Disminución	225.87
O.D. (mg/l)	9.40	11.91	Aumento	2.51
% sat. OD	111.91	145.25	Aumento	33.34
Batimetría (m de profundidad)	1.33		No aplica	

Tabla 5.7: Diferencia y análisis descriptivo de las medias de cada parámetro analizado en los muestreos (estiaje y lluvias) de la Laguna de Zupitlán.

es de esperar que la concentración de los contaminantes aumente. En contraste, las cargas de nitrógeno, fósforo, materia orgánica y *Escherichia Coli* disminuyen, debido a que la fuente de las mismas sufre un corte cuando terminan las lluvias. Las concentraciones encontradas durante el estiaje tienen fuentes distintas y de menor impacto, lo que deja ver que la solución al problema de contaminación del agua en la Laguna de Zupitlán se encuentra en el manejo de su conexión hidráulica con la presa El Sabino.

5.2. Análisis de la calidad del agua

el concepto de *calidad del agua*, está en función de los usos para los que se destinará (Olkowski, 2009; EPA, 2010). Un agua de calidad apta para el riego de un cierto cul-

tivo puede no serlo para uno distinto, así como un agua con fines recreativos puede ser de mala calidad para el consumo humano.

Para poder establecer un marco de conceptos dentro del cual se defina la calidad del agua de la laguna de Zupitlán, es necesario definir primero sus usos.

Según la FAO (2016), existen tres actividades extractivas principales: Extracción de agua agrícola, extracción de agua industrial y extracción de agua municipal.

En México, CONAGUA (2011) tiene una clasificación similar, que incluye: agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida sin termoeléctricas y energía eléctrica excluyendo electricidad. El agua destinada a fines agrícolas representa el 75.72 % del volumen de agua extraído en México (CONAGUA, 2014), y es uno de los usos del agua de la laguna de Zupitlán. A su vez, la misma institución subdivide al abastecimiento agrícola en: agrícola, acuacultura, pecuario, usos múltiples y otros usos (ver figura 5.20).

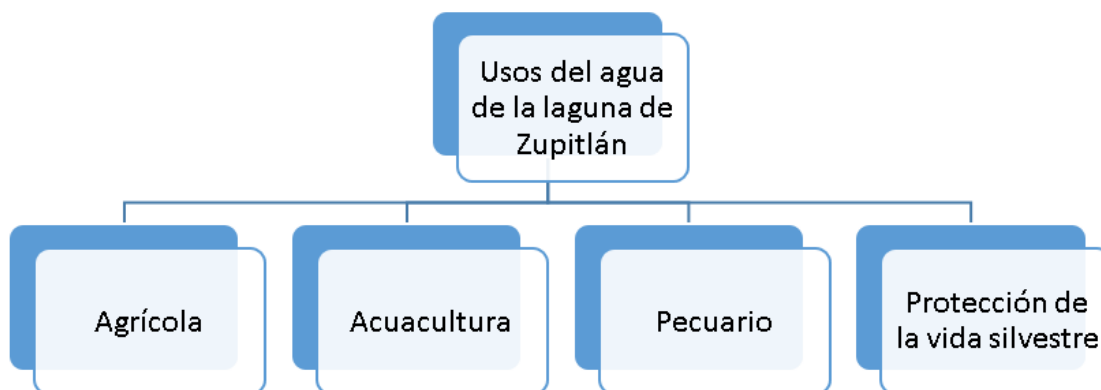


Figura 5.20: *Usos actuales del agua para la Laguna de Zupitlán.*

En la figura 5.20 se ha agregado “Protección de la vida silvestre” (EPA, 2010), basándose en la Ley de aguas limpias de los Estados Unidos de América, que incluye usos como: vida acuática, hábitat de especies de aguas cálidas, e incluso usos culturales y espirituales.

A pesar de que únicamente los valores de nitritos y nitratos registrados en ambos muestreos superan el valor de un agua residual de concentración media (concentración de 0.00 mg/l) (Metcalf y Eddie, 1998), se ha considerado razonable considerar a la presa El Sabino como una fuente de agua residual puntual, y a su conexión con Zupitlán, una suerte de pretratamiento (como se ha visto en la tabla 4, la reducción de contaminantes llega a ser de hasta el 98 %, en el caso del nitrógeno amoniacal, en el primer muestreo; y de 96 % en el segundo). De esta manera, a los usos ya descritos, se añaden dos nuevas clasificaciones: Descargas de aguas residuales en aguas nacionales y descargas de aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, normas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, respectivamente.

Para poder tener un juicio integral de la calidad del agua de la laguna de Zupitlán, se realizó una búsqueda de normas nacionales e internacionales que cubrieran los parámetros y criterios de análisis de las campañas de muestreo. La figura 5.8 muestra los resultados de las campañas de muestreo realizadas en este trabajo, en contraste con los límites permisibles, intervalos y clases dentro de los cuales los documentos consultados clasifican el agua. En el apéndice C, página 147, pueden observarse dichas clasificaciones.

La tabla 5.8 contrasta los resultados de las campañas de muestreo con lineamientos de calidad del agua (ver apéndice C). En la tabla pueden observarse dos juicios, con y sin paréntesis. Los valores sin paréntesis corresponden al primer muestreo, mientras que los valores entre paréntesis corresponden al segundo.

Se eligió presentar los juicios como: En norma (EN), por encima de la norma (PE) y por debajo de la norma (PD). Esto permite obtener diferentes observaciones de los juicios comparativos, por ejemplo; en el caso de la transparencia y la temperatura, un valor por debajo de lo sugerido apunta a una mejor calidad del agua.

Los documentos consultados y criterios de cada uno, fueron:

- NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1996. Bajo el supuesto de que la laguna El Sabino funciona como un sistema de tratamiento que elimina gran cantidad de la carga contaminante que llega a Zupitlán, y suponiendo que la calidad de agua del sabino es tan mala que se puede considerar un agua residual (con o sin tratamiento), las normas 001 y 002 de SEMARNAT establecen los límites máximos permisibles para descargas de aguas residuales en aguas nacionales y aguas residuales tratadas que se reusen en servicios,

Norma Parámetro	NOM-001- SEMARNAT-1996		NOM-003- SEMARNAT-1996		Criterios ecológicos CE-CCA- 001/89			UNECE	2006/7/E C
	Riego agrícola	Público urbano	Contacto directo	Contacto indirecto	Vida acuática	Riego agrícola	Carpa		
pH						PE (PE)	PE (PE)	CLASE I (CLASE I)	
Temperatura (°C)	EN (EN)	EN (EN)			EN (EN)		PD (EN)		
Transparencia (cm)							PD (PD)		
N NO ₂ - (mg/l)									
N NO ₃ - (mg/l)									
N NH ₃ (mg/l)					EN (EN)				
PO ₄ 3- (mg/l)									
SST (mg/l)	EN (EN)	EN (EN)	PE (PE)	EN (EN)		EN (EN)			
DQO								CLASE V (CLASE V)	
DBO ₅ (mg/l)	EN (EN)	EN (EN)	EN (EN)	EN (EN)					
Clorofila a (mg/l)								CLASE IV (CLASE IV)	
Col. fecales (UFC/100ml)									BUENA (BUENA)
OD (mg/l)					EN (EN)		EN (EN)	CLASE I (CLASE I)	
O.D (% de saturacion)								CLASE II (CLASE IV)	

Tabla 5.8: Parámetros de calidad del agua de Zupitlán contrastados con normas y lineamientos de calidad del agua de las normas 001 y 002 de SEMARNAT, los criterios ecológicos CE-CCA-1989, la clasificación de calidad de agua superficial de la UNECE y la directiva 2006/7/EC de la Unión Europea.

EN= En norma, PE= Por encima de la norma, PD= Por debajo de la norma.

respectivamente.

- Criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89. Criterios que la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, facultados por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, establece como marco de referencia para que las autoridades puedan clasificar a los cuerpos de agua según su uso.
- UNECE. Clasificación estadística estándar de la calidad del agua dulce superficial para el mantenimiento de la vida acuática de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, UNECE por sus siglas en inglés (Helmer, 1997).

La clasificación de la UNECE es la siguiente:

- CLASE I. Se refiere a un sistema acuático natural, visualmente imperturbado. Esta clase admite todos los tipos de aprovechamiento.
 - CLASE II. Puede destinarse a cualquier uso de forma adecuada, incluyendo el soporte de ecosistemas acuáticos funcionales. Para potabilizar este tipo de agua se requieren métodos de tratamiento simples.
 - CLASE III. Este tipo de agua no puede potabilizarse con métodos simples. No es apta para salmónidos (como las truchas, en el caso de México (GBC, 2011)). Puede esperarse un deterioro del ecosistema acuático.
 - CLASE IV. Permitirá solamente usos que demandan aguas de baja calidad, y requerirá de un tratamiento intensivo para su potabilización. En estas aguas, las condiciones para los ciprínidos (carpas) están en duda.
 - CLASE V. Esta clase de agua es suficiente solo para usos que no requieran calidad, como la generación de energía.
- Directiva 2006/7/EC del parlamento europeo sobre la calidad de agua para su uso recreativo. Tiene por objeto la clasificación, monitoreo y manejo de cuerpos de agua naturales con gran cantidad de usuarios para fines recreativos (la clasificación de aforo de bañistas como “grande” queda a criterio de la municipalidad y la afluencia histórica del lugar). Este documento clasifica la calidad del agua en pobre, suficiente, buena y excelente, y está basado principalmente en criterios bacteriológicos.

De acuerdo a la tabla 5.8, el agua de la laguna de Zupitlán tiene una calidad superior a la de un agua residual cruda o un agua residual tratada (con fines de uso urbano directo o indirecto). Es apta para riego según las normas mexicanas NOM 001 y 003 de SEMARNAT, y para conservación de la vida acuática (de especies de peces resistentes como la carpa), aunque presenta valores de pH por encima de lo recomendado por la CE-CCA-001/89 para el riego y la cría de carpa.

Según la directiva 2006/7/EEC (para aguas continentales), el agua de la laguna también es de buena calidad bacteriológica para actividades recreativas (<500 UFC/100ml= Excelente calidad).

Desde el enfoque ecosistémico de la UNECE (Helmer, 1994) se han buscado límites permisibles que garanticen la salud de las comunidades acuáticas y vayan de la mano con objetivos de calidad del agua. De acuerdo a esta fuente, la calidad de la laguna de Zupitlán oscila entre Clase I y Clase V. Su mejor aspecto de calidad es el alto pH (lo que contrasta con las normas mexicanas), mientras que sus parámetros más

desfavorables son la clorofila *a* y la DQO, ambos asociados a cantidades importantes de materia orgánica que consume oxígeno al ser degradada por bacterias aerobias.

No existe una normatividad que regule la calidad del agua para bebida de ganado (Ayers, 1989), sin embargo, Sager (2000) propone algunas recomendaciones, que se centran principalmente en la salinidad del agua para el ganado, así como en algunos metales pesados que pueden resultar nocivos. Los parámetros coincidentes con aquellos muestreados en Zupitlán para este trabajo son:

- pH: Valores de pH por debajo de 5 y por encima de 8 podrían causar problemas en la digestión de rumiantes (*Íbid*). Los valores de pH de la laguna de Zupitlán fueron de 9.47 en estiaje y 10.22 en lluvias.
- Nitritos: El límite máximo permisible es de 10 mg/l, el valor promedio en la laguna es de 0.04 mg/l en estiaje y 0.01 mg/l en lluvias.
- Nitritos + Nitratos: el límite máximo permisible es de 10 mg/l. El valor promedio en la laguna es de 6.98 mg/l en estiaje y 8.34 mg/l en lluvias.

Los procesos involucrados con la salud del ganado bovino y la calidad del agua que ingieren son sumamente complicados, sin embargo, los parámetros para los cuales pudo realizarse un contraste con la literatura especializada, así como las observaciones realizadas durante las visitas al lugar, sugieren que el agua de la laguna es de calidad suficiente para mantener una actividad ganadera extensiva alrededor de la laguna.

En cuanto a la ganadería intensiva, como se mencionó anteriormente, no existen evidencias de que se trate de un factor de riesgo para la laguna de Zupitlán; lo que, no obstante, podría cambiar con el tiempo, de no tener cuidado con los escurrimientos desde granjas y rastros aledaños a la laguna, en la medida que éstas incrementan su actividad.

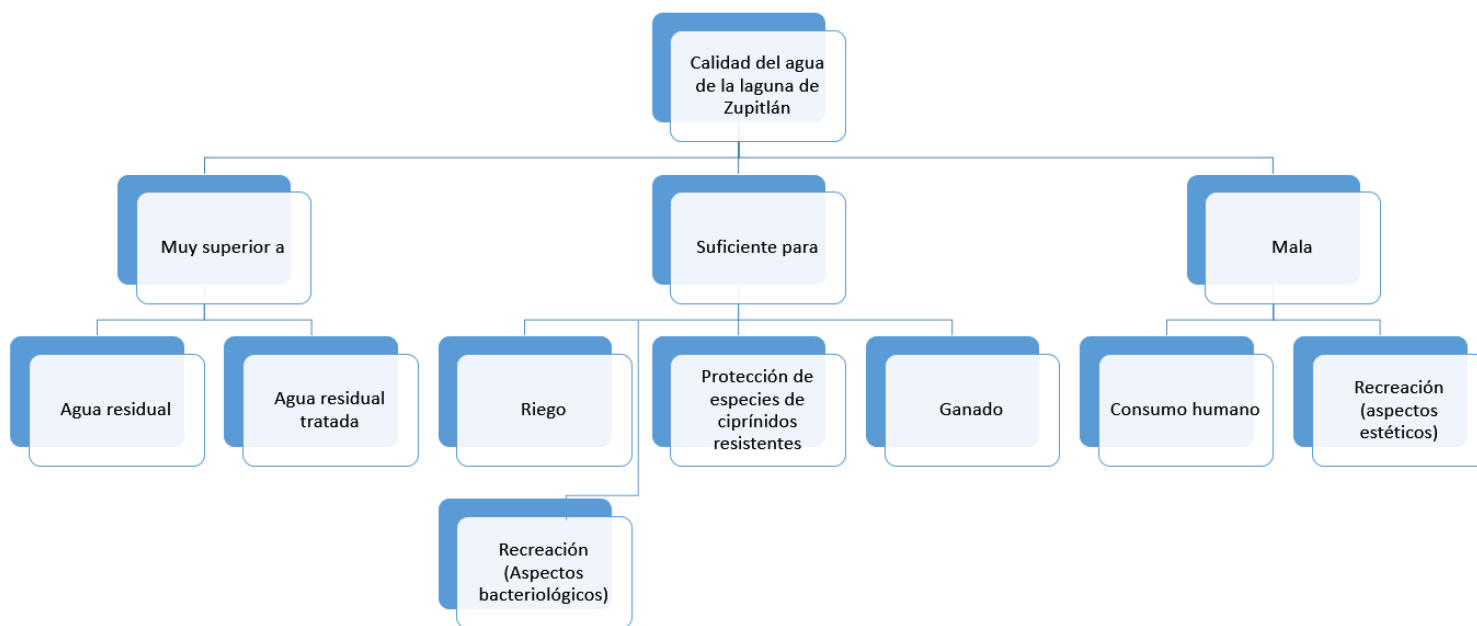


Figura 5.21: La figura esquematiza la calidad del agua de la laguna de Zupitlán en función de su uso, siguiendo los resultados de la tabla 5.8.

La figura 5.21 sintetiza la discusión derivada de la tabla 5.8 de acuerdo a la calidad del agua de la laguna de Zupitlán y los usos que actualmente se le dan al embalse.

Desde el punto de vista de las actividades recreativas, se sabe, gracias a las entrevistas realizadas a algunos habitantes de la localidad, que la zona ha sufrido un abandono gradual en los últimos 30 años, y que en algún momento fungió como atractivo turístico (algunos letreros antiguos indican que había venta de truchas en las inmediaciones). Por otro lado, de acuerdo con Morales (2015), la adecuación de la laguna de Zupitlán como corredor turístico requeriría de una gran inversión en infraestructura, y de una re-definición de los usos de suelo alrededor de la misma. La relevancia (y razón por la que fue añadido el uso recreativo) viene de la consideración de un aprovechamiento futuro que vaya más allá de actividades primarias.

5.3. Índice de la Calidad Bacteriológica y Fisico-química, IQBP.

Durante la definición de los parámetros de muestreo, se había mencionado al IQBP como una referencia útil para la definición de los descriptores de calidad del agua a utilizar, pues, el índice canadiense creado por Hébert (1996) tiene su base en la simplicidad y economía de los análisis.

En este apartado se determina el IQBP para la campaña de muestreo en estiaje, pues dicha metodología está recomendada únicamente para su uso exclusivo durante el periodo más desfavorable para la calidad del agua.

No todos los parámetros analizados en este trabajo son compatibles con el índice, o se encuentran en este. Además de esto, los resultados mostrados en la tabla 5.4 están dados en unidades que facilitaron los análisis o corresponden a las unidades utilizadas por defecto en cada método, no necesariamente coincidentes con aquellas del IQBP.

En la figura D.1 del anexo D pueden observarse los parámetros de la campaña de estiaje compatibles con el IQBP. En esta misma figura, las unidades reportadas han sido ajustadas para permitir su comparación con las curvas de apreciación de la calidad del agua (véase también anexo D, figuras D.1 a D.10).

Las curvas de apreciación se derivan de un polinomio de grado n^e para cada des-

criptor de calidad. Para leerlas, es necesario introducir en el eje de las abscisas los resultados del muestreo para un cierto parámetro, en unidades compatibles con la curva (para la curva de nitritos y nitratos disueltos, por ejemplo, se transforman las unidades de la tabla 5.4 de nitritos y nitratos en sus equivalentes en nitrógeno y luego se suman esos resultados). trazar una línea paralela a las ordenadas que toque la curva. Finalmente, en ese punto de la curva se lee el subíndice de calidad correspondiente al eje de las ordenadas (ver figura 5.22 para ver un ejemplo de cálculo con el punto *M1* y el parámetro *nitritos + nitratos*).

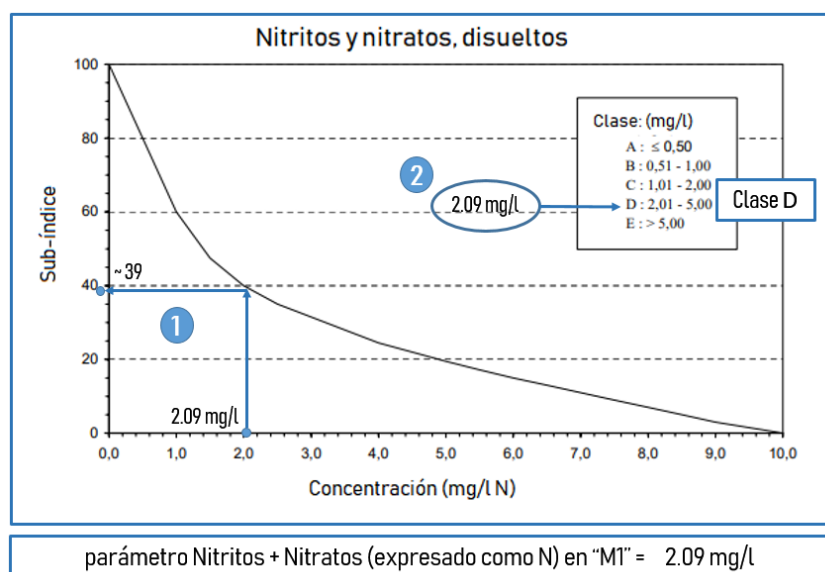


Figura 5.22: Ejemplo de cálculo del IQBP: 1) leyendo de la gráfica, 2) leyendo directamente el parámetro.

El IQBP de cada punto de muestreo queda definido por el descriptor limitante de calidad, es decir, aquel que tiene el subíndice (puede ser también la clase) de calidad menos favorable.

En la tabla 5.9 se observan los resultados del IQBP para todos los puntos analizados en la campaña de muestreo en estiaje dentro de la Laguna de Zupitlán, presentados como clase (donde *A* es la mejor calidad de agua y *E* es la menos favorable).

La tabla 5.9 debe de leerse línea por línea, pues cada una representa una de las

Muestra	Coliformes Fecales (UFC/100ml)	Ortofosfatos	NH ₃ (como N)	Nitritos+ nitratos (como N)	DBO ₅ (mg/l)	pH	SST (mg/l)	% sat. OD	Cla (mg/l)	IQBP global
Salida 1,2	A	E	-	C	E	E	A	D	A	E
Salida 3,4	A	E	A	C	E	E	C	E	A	E
Salida 5	A	E	A	C	E	E	C	C	A	E
Entrada 1	A	E	A	D	E	E	B	A	A	E
Entrada 2	B	E	A	D	E	E	C	B	A	E
M1	B	E	A	D	E	E	C	A	A	E
M2	A	E	A	C	E	E	E	D	A	E
M3	A	C	A	C	E	E	B	D	A	E
M4	A	D	A	C	E	E	C	E	A	E
M5	A	E	A	C	E	E	B	E	A	E
M6	A	E	A	C	E	E	B	D	A	E
M7	A	E	A	B	E	E	C	E	A	E
M9	A	D	A	C	E	E	B	E	A	E
M11	A	E	A	C	E	E	B	E	A	E

Tabla 5.9: Resultados del IQBP para cada punto de muestreo de la Laguna de Zupitlán. Se han señalado en color naranja los descriptores limitantes de cada uno.

estaciones de muestreo, seguida por la clasificación de su calidad desde A hasta E, según el IQBP. Para cada punto, el IQBP global quedará dado por la clase más desfavorable que se encuentre.

Las clases de calidad del agua usando el IQBP tienen definiciones sencillas, pensadas para los tomadores de decisiones y políticos implicados en la gestión del recurso hídrico, y se aprecian en la tabla 5.10.

De la tabla 5.9 se concluye que la calidad del agua de la Laguna de Zupitlán es del tipo E, un agua de muy mala calidad para cualquier uso.

El juicio anterior, como el índice IQBP mismo, es conservador, y se debe al mecanismo de selección del índice para cada punto de muestreo, escogiendo la clase de calidad del agua más desfavorable. Si se observa, por ejemplo, la línea del sitio de muestreo M_4 de la tabla 5.9 puede verse que las calidades del agua dominantes son la A y la E, que son los extremos de mejor y peor calidad del índice. Si el índice ponderara las clases, el punto M_4 tendría una clase de calidad intermedia. El IQBP, sin embargo, selecciona la clase más desfavorable para el punto de muestreo en su conjunto.

Tabla 5.10: Clases de calidad del agua definidas por el índice quebequés IQPB. Tomado de Hébert (1996).

Clase	Sub-índice	Definición
A	(80-100)	Agua de buena calidad que permite en general todos los usos, incluyendo el recreativo.
B	(60-79)	Agua de calidad satisfactoria que permite la mayoría de los usos.
C	(40-59)	Agua de dudosa calidad, ciertos usos están en resgo de estar comprometidos.
D	(20-39)	Agua de mala calidad, la mayoría de los usos están en riesgo de estar comprometidos.
E	(0-19)	Agua de muy mala calidad, todos los usos pueden estar comprometidos.

En la práctica, el Índice de la Calidad Bacteriológica y Fisicoquímica (IQBP, en francés) de Québec surgió para la regulación del agua para consumo humano. Si se considera que este uso requiere una muy alta calidad, entonces la clase D es consistente con la conclusión del apartado 5.21: la laguna de Zupitlán tiene buena calidad para el riego y la cría de carpa y otros peces versátiles respecto al oxígeno disuelto; pero mala calidad para el consumo humano, pues sería necesario un proceso costoso de clarificación para evitar la presencia de materia orgánica en el proceso de desinfección con cloro (que juntos provocan la presencia de trihalometanos carcinogénicos como subproducto).

A pesar de entregar un resultado uniforme de muy mala calidad del agua, el IQBP tiene la ventaja de permitir encontrar los *parámetros problemáticos*, que son los de clase más desfavorable. En el caso de este estudio, la tabla 5.9 refleja claramente las columnas de los descriptores de calidad más desfavorables, que son: El fósforo (como ortofosfatos), la DBO_5 , el pH y, en menor medida, el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto.

¿Son los valores arrojados por el IQBP consecuentes con los resultados e interpretaciones de las campañas de muestreo? ¿Cómo se interpretan los parámetros problemáticos?

El fósforo es el nutriente limitante para el desarrollo de la biomasa algal en la laguna de Zupitlán, misma que, en exceso es causante del problema de eutroficación. A pesar de que el nitrógeno también contribuye al desarrollo de la maleza acuática y es más abundante en la laguna de Zupitlán, el fósforo es más importante para el

metabolismo de las microalgas en Zupitlán, y regula los florecimientos problemáticos para la calidad del agua, por lo que su control resulta prioritario si se desea mejorar la clase E del embalse de acuerdo al IQBP.

Para la interpretación de la clasificación de los descriptores DBO_5 , pH y oxígeno disuelto según el IQBP, recuérdese que este índice se usa primordialmente en el abastecimiento de agua para consumo humano, misma que es casi universalmente desinfectada usando cloro. Si existe materia orgánica en abundancia, mayor será la probabilidad de obtener trihalometanos al combinarse con el cloro. Mayor valor de la Demanda Bioquímica de Oxígeno indica mayor cantidad de materia orgánica, mayor valor de pH indica el agotamiento del CO_2 por una alta actividad fotosintética por parte de las microalgas que, eventualmente morirán y se convertirán en materia orgánica biodegradable. Lo anterior va de la mano con los valores altos de oxígeno disuelto, que también indican una alta actividad fotosintética en la laguna.

Parámetros con una buena calidad del agua, como el de las coliformes fecales (Clase A para más del 85 % de los sitios de muestreo y clase B para el resto) confirman el posible uso de la laguna con fines recreativos, mismo que es respaldado por los resultados de la tabla 5.8, donde la directiva 2006/7/EC de la Unión Europea ubican el agua de la laguna en una buena calidad.

5.4. Clasificación del grado de eutrofia

La preocupación por la calidad del agua de lagos y embalses a causa del creciente aporte de nutrientes proveniente de actividades humanas (ver apartado 2.1.3 para mayor detalle) surgió de manera formal en países desarrollados durante la segunda mitad del siglo XX (Ryding, 1992).

A partir de entonces se han realizado diversos esfuerzos para la generación de modelos matemáticos e indicadores biológicos del grado de eutrofia. Estas herramientas, sin embargo, necesitaban de gran cantidad de datos para entregar un resultado, del juicio subjetivo del investigador, o no podían atribuir una condición precisa de eutrofia al cuerpo receptor. Un índice debe ser inequívoco y expresarse en un lenguaje imparcial común que resulte sencillo de entender (Moreno A., 2010).

El primer esfuerzo para generar un índice de eutrofia ocurrió en 1968, cuando Vollenweider hizo una aproximación a la clasificación cuantitativa del estado trófico de lagos, de acuerdo a su concentración de nitrógeno y fósforo. Reconociendo que estas

concentraciones están determinadas por la carga de nutrientes, optó por convertirlas en *cargas permisibles* (oligotrófico debajo de este valor) y *cargas peligrosas* (eutrófico por encima de este valor).

El índice de Vollenweider (ver tabla 5.11) reconoce las relaciones entre la entrada de cargas contaminantes, la profundidad del lago y su tasa de limpieza.

Tabla 5.11: Índice de cargas de Vollenweider para fósforo y nitrógeno total ($\text{g}/\text{m}^2/\text{año}$) para diferentes profundidades medias.

Profundidad	Carga permisible desde		Carga peligrosa	
	P	N	P	N
1.3m	0.05	0.63	0.07	1.26
5m	0.07	1.0	0.13	2.0
10m	0.1	1.5	0.2	3.0
50m	0.25	4.0	0.5	8.0
100m	0.4	6.0	0.8	12.0
150m	0.5	7.5	1.0	15.0
200	0.6	9.0	1.2	18.0

La tabla muestra la carga permisible y peligrosa de nitrógeno y fósforo para un embalse. Se ha añadido al material original la profundidad media de Zupitlán, de 1.3m. Tomado de Harper (1992).

En la tabla 4.8 de la sección 4.4 (página 66) se estimaron las cargas anuales de nitrógeno y fósforo por unidad de área. Comparando esos valores con la clasificación de Vollenweider, la carga de nitrógeno ($0.05 \text{ g}/\text{m}^2/\text{año}$) está en el límite para tratarse de una carga permisible, mientras que la carga de fósforo ($0.017 \text{ g}/\text{m}^2/\text{año}$) está por debajo del permisible, lo que significa que, de tratarse de las cargas calculadas por uso de suelo, la laguna de Zupitlán no debería presentar problemas de eutroficación.

Esto deja ver que el problema en Zupitlán se debe, además de los usos del suelo, a la carga de nutrientes que ingresa desde la presa El Sabino y al reciclaje interno de nutrientes del embalse.

Posterior al índice de Vollenweider. El Índice de Estado Trófico de Carlson (o TSI por sus siglas en inglés) utiliza tres parámetros diferentes para calificar el grado de

eutrofia de un cuerpo de agua: Profundidad de disco Secchi (DS), clorofila *a* (Clorf *a*) y fósforo total (Pt). Cada uno de los parámetros anteriores se introduce a una ecuación adimensional para obtener su TSI.

$$TSI_{DS} = 60 - 14.41(\ln(DS)) \quad \text{Ecuación 1 TSI para Disco Secchi}$$

$$TSI_{Pt} = 14.42(\ln(Pt)) + 4.15 \quad \text{Ecuación 2 TSI para fósforo total}$$

$$TSI_{Clorfa} = 9.81(\ln(Clorfa)) + 30.6 \quad \text{Ecuación 3 TSI para clorofila a}$$

Figura 5.23: La figura muestra las ecuaciones para calcular el estado trófico de Carlson, a partir de la transparencia con disco Secchi, la clorofila *a* y el fósforo total.

Los valores promedio de cada parámetro, necesarios para el cálculo del TSI, con sus unidades ajustadas para las ecuaciones de la figura 5.23, se muestran en la tabla 5.12. A partir de estos valores, se pueden calcular los índices de estado trófico de Carlson para cada uno de los tres descriptores de la calidad, en cada uno de los muestreos. Estos índices se pueden ver en las tablas 5.13 y 5.14.

Tabla 5.12: Medias de los parámetros involucrados en el cálculo del Índice de Estado Trófico de Carlson (TSI) para los muestreos realizados en lluvias y estiaje.

Muestreo	Parámetro		
	Clorf <i>a</i> ($\mu\text{g/l}$)	P _t ($\mu\text{g/l}$)	Transparencia (m)
(1) Lluvia	30	490	0.49
(2) Estiaje	30	470	0.63

Tabla 5.13: Índices de Estado Trófico de Carlson (TSI) para la laguna de Zupitlán.

Muestreo	TSI		
	Clorf <i>a</i> ($\mu\text{g/l}$)	P _t ($\mu\text{g/l}$)	Transparencia (m)
(1) Lluvia	64.9	93.5	70.27
(2) Estiaje	64.9	92.87	66.65

De acuerdo con Carlson (1983) el mejor de los indicadores es la clorofila *a*, pues su índice fue diseñado para la predicción del crecimiento de biomada algal, mientras que el fósforo y la turbiedad sirven como parámetros de soporte, por lo que no debe de reportarse un promedio, sino los resultados individuales para cada parámetro

Tabla 5.14: Interpretación de los valores del TSI para la laguna de Zupitlán.

Muestreo	TSI		
	Clorofila a	P_t	Transparencia
(1) Lluvia	Eutrofia-hiereutrofia	Hipereutrofia	Hipereutrofia
(2) Estiaje	Eutrofia-hipereutrofia	Hipereutrofia	Eutrofia-hiereutrofia

(Carlson, 1996).

No puede ignorarse, sin embargo, que los resultados arrojaron una condición de hipereutrofia para el fósforo. Un valor conservador considerando que en ambas campañas no se midió el fósforo total, sino los fosfatos (PO_4^{3-}).

Tomando en cuenta el TSI de la clorofila a como el más representativo (que arrojó valores medios iguales en ambos muestreos), la laguna de Zupitlán se encuentra en un estado de eutrofia. Para valores del TSI entre 60 y 70 existen algunos cambios en la calidad del agua de la laguna (en relación a una oligotrófica) que pueden consultarse en la tabla 5.15.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) condujo en la década de 1970 el más ambicioso estudio sobre la eutrofización en lagos (Moreno, 2010; Ryding, 1992). El objetivo era la caracterización del grado de eutrofia basado en diferentes parámetros (como el contenido de nitrógeno, fósforo, clorofila a , etc.) del cuerpo de agua.

La conclusión del estudio fue que, debido a la complejidad de las interacciones entre los diferentes parámetros medidos, no es posible elaborar una sola categoría trófica, sino intervalos para cada parámetro, dentro de los cuales el reservorio se acercará más a un nivel oligotrófico o eutrófico (ver figura 5.24).

Los resultados para el grado de eutrofia, según la OCDE, de la laguna de Zupitlán en los dos muestreos realizados se presentan en la tabla 5.16. Para estimarlos, se compararon los valores medios, mínimos y máximos de los tres parámetros involucrados, para cada campaña de muestreo, con la figura 5.24.

Tabla 5.15: Aspectos de la calidad del agua y la pesca, relacionados con intervalos de valores del Índice de Estado Trófico de Carlson. Tomado de Carlson (1996).

TSI	Atributos	Suministro de agua	Pesca y recreación
<30	Oligotrofia; agua clara, oxígeno todo el año en el hipolimnion.	El agua podría suministrarse sin filtración	Dolmina la pesca e salmón
30-40	El hipolimnion de lagos poco profundos podría volverse anóxico		Pesca de salmón sólo en lagos profundos
40-50	Mesotrofia; agua moderadamente clara; mayor probabilidad de anoxia hipolimnética en el verano.	Los problemas por hierro, manganeso, sabor y olor empeoran; El agua requiere filtración por su turbiedad.	La anoxia hipolimnética resulta en pérdida del salmón. Presomina la perca.
50-60	Eutrofia; Hipolimnion anóxico, posibles problemas de macrófitas.		La pesca sólo se da en lagos templados, puede dominar el robalo.
60-70	Dominio de algas verde-azules, problemas con la biomasa muerta en el fondo y problemas de macrófitas.	Posibles episodios de mal olor y sabor.	Acumulaciones de biomasa algal, poca transparencia y macrófitas pueden alejar a los bañistas y pescadores.
70-80	Hipereutrofia; (productividad limitada por la luz), algas densas y macrófitas.		
>80	Biomasa algal muerta, pocas macrófitas.		Especies resistentes de peces. Muertes de peces en verano.

Categoría trófica	P_t ($\mu\text{g/L}$)	$\text{Clorf } a$ ($\mu\text{g/L}$)		Transparencia D_s (m)	
		Media	Máxima	Media	Mínimo
Ultraoligotróficos	< 4.0	< 1.0	< 2.5	6 > 12.0	> 6.0
Oligotrófico	< 10.0	< 2.5	< 8.0	> 6.0	> 3.0
Mesotrófico	10 - 35	2.5 - 8	8.0 - 25	6.0 - 3.0	3.0 - 1.5
Eutrófico	35 - 100	25 - 75	25 - 75	3.0 - 1.5	1.5 - 0.7
Hipertrofico	> 100	> 75	> 75	< 1.5	< 0.7

Figura 5.24: Valores de la OCDE (1982) para un sistema completo de clasificación trófica. Tomado de Moreno (2010).

Tabla 5.16: Grado de eutrofia de la laguna de Zupitlán, según los criterios de la OCDE (1982).

Muestreo	Grado de eutrofia según la OCDE		
	$\text{Clorf } a$ ($\mu\text{g/l}$)	P_t ($\mu\text{g/l}$)	Transparencia (m)
(1) Lluvia	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico
(2) Estiaje	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico

Los índices estudiados en esta sección (Vollenweider, Carlson y OCDE) ubican a la laguna de Zupitlán en un estado que va de la eutrofia a la hipereutrofia, con cargas de nutrientes que se encuentran dentro de lo permisible. Lo anterior se traduce en una disminución de la calidad del agua con posibles episodios de olor y sabor; y, para los habitantes de Zupitlán, en la disminución de la productividad del embalse, la menor capacidad de la laguna de dar soporte a especies con grandes demandas de oxígeno disuelto (de mayor valor comercial) y la imposibilidad de convertir a la laguna en un corredor turístico por los efectos antiestéticos de los florecimientos de algas.

Existe una discrepancia entre las cargas permisibles (que se esperarían en un lago no eutroficado), descritas por Vollenweider, y los resultados de los índices de Carlson y la OCDE, que colocan a la laguna de Zupitlán en un estado de eutrofia a hipereutrofia. Dicha discrepancia puede explicarse tomando en cuenta que el uso de suelo no describe dos fuentes importantes de nutrientes: La presa El Sabino y el reciclaje interno de nutrientes de la laguna.

Los alcances de este trabajo no incluyen el cálculo de dichas cargas, en el primero de los casos; porque los aportes provenientes del Sabino son variables a lo largo del año, en términos de concentración de nutrientes y caudal, y en el segundo; porque el cálculo de nutrientes que regresan a la laguna desde el detrito requeriría un análisis

de sedimentos que no está contemplado en esta investigación.

Capítulo 6

Propuestas para el control de la eutroficación

6.1. Métodos preventivos y correctivos

Como ha sido analizado, la laguna de Zupitlán se encuentra en un estado de eutrofia que afecta su calidad del agua para un posible aprovechamiento en el abastecimiento público urbano y la reproducción de peces de alto valor comercial (actualmente, según el gobierno de Hidalgo (2013), la carpa es la especie aprovechada comercialmente en la laguna debido a su tolerancia a bajas concentraciones de oxígeno disuelto).

A pesar de que existen en la actualidad técnicas y procesos para el control de la eutroficación como la disminución de nutrientes por medio de control químico (Martino, 1989; Ryding, 1989), las soluciones propuestas en este trabajo intentan reflejar la realidad de la población de Zupitlán, en términos de su perfil socioeconómico (de falta de drenaje, marginación, carencia alimentaria y salarios por debajo del mínimo de bienestar) y de la gestión que el municipio de Acatlán ha tenido históricamente sobre el embalse (con una única limpieza registrada, en la que se invirtieron 120,000 pesos (Gobierno de Acatlán, 2013)). En la figura 6.1 se observa un aviso de la Comisión Nacional del Agua sobre el inicio de los trabajos de limpieza de la laguna en 2006, mismos que terminarían en 2013. Según los pescadores de la laguna, son ellos quienes manualmente retiran el Tule para evitar la obstrucción de los canales de riego.

Los métodos de control de la eutroficación se clasifican en dos grandes grupos: preventivos y correctivos (Martino, 1989; Ryding, 1989; Harper, 1992). Los métodos



Figura 6.1: Señalización cercana a la laguna de Zupitlán que menciona la limpieza que comenzara en 2006. Puede leerse “La gerencia estatal en Hidalgo en apoyo a la comunidad y optimización de la infraestructura hidráulica (ininteligible) trabajos de limpieza (ininteligible) maleza (ininteligible). Julio, 2006”. Fotografía obtenida en 2017.

preventivos se dedican a tratar las causas básicas, limitando la productividad del embalse al disminuir la carga de nutrientes entrantes o desviarlos a otro ecosistema.

Los métodos correctivos lidian con el ecosistema mismo, eliminando los organismos indeseables y reduciendo el reciclaje de nutrientes del cuerpo de agua. Aunque en la práctica es común que se necesite de la aplicación de más de un método de control de la eutroficación (ya sea preventivo o correctivo), las técnicas seleccionadas varían entre países y lagos dependiendo de la fuerza de la opinión pública, la voluntad política de tomar acciones y la percepción de la gravedad del problema (Harper, 1992).

A continuación se presenta un catálogo de técnicas para el control de la eutroficación (adaptado de Harper, 1992), remarcando la factibilidad de su aplicación a una zona rural marginada como Zupitlán. El catálogo incluye la clasificación y subclasificación de las técnicas, remarcando con letras negritas los métodos puntuales.

- Métodos preventivos: Reducción de la entrada de nutrientes a la laguna.

- Uso del suelo agrícola. La gestión eficiente de los terrenos agrícolas puede llevar a una reducción en la carga de nutrientes que ingresan a la laguna, y se centra en tres criterios:
 - Naturaleza del cultivo. La frecuencia y duración de la exposición del suelo desnudo a la intemperie afecta su erosión, y con eso la cantidad de nutrientes que se pierden en la escorrentía. La solución es la aplicación de prácticas agrícolas que minimicen la erosión de la capa superior del suelo.
 - ◇ **Arado de contorno.** Es una práctica de labranza en la que los cultivos se siembran respetando los contornos del terreno con la misma pendiente, promoviendo un drenaje eficiente del agua y el aumento de la rugosidad del suelo, lo que reduce la velocidad de la escorrentía y limita la erosión (Shahvarrooghi, 2016). El arado de contorno es apto para regiones de topografía homogénea sin pendientes importantes, por lo que podría aplicarse en Zupitlán. La aplicación del arado de contorno puede observarse en la figura 6.2.
 - ◇ **Aplicación de una capa de mantillo o acolchado.** Aplicación de una capa de vegetación compostada, que tiene el doble propósito de brindar nutrientes al suelo y protegerlo de la erosión.
 - ◇ **Uso de cultivos de rápido crecimiento para evitar la compactación del suelo.** Consiste en la siembra de alfalfa o trébol que, a pesar de no tener un alto valor comercial para el agricultor, evita la compactación y erosión del suelo. La semilla de menor valor comercial se aplica en el periodo intermedio entre la cosecha de un cultivo y la siembra de otro.
 - ◇ **Barreras de árboles para disminuir la erosión por viento.** Disminuye la erosión del suelo por acción del intemperismo.
 - Aplicación de fertilizantes.
 - ◇ **Aplicación de fertilizantes de acuerdo a las necesidades de los cultivos.** En México, la falta de regulación y el mal uso de los fertilizantes ha llevado a la generación de problemas ambientales (Peña-Cabriaes, 2001). Los cultivos absorben entre el 10 % y el 60 % del total de fertilizantes artificiales, por lo que se tiende a usarlos en exceso, sin embargo, su uso excesivo no aumenta su eficiencia y, en cambio, provoca el florecimiento de hierbas no deseadas, que llevan al uso de herbicidas, cuya adquisición

se traduce en pérdidas económicas (Patil, 2014). Su aplicación en cantidades racionales evita que el nitrógeno y el fósforo se pierdan en la escorrentía y maximiza la producción del agricultor.

- ◊ **Aplicación de fertilizantes de liberación lenta en forma de pastillas.** Evita la mayor parte de la pérdida por escorrentía que ocurre en fertilizantes de una única aplicación (Harper, 1992).
- ◊ **Aprovechamiento de desechos animales.** En México, a partir de la introducción de los fertilizantes artificiales a gran escala en 1915 (Peña-Cabrales) se ha comenzado a abandonar el uso del estiércol, que se dispone sin mayor control, provocando la pérdida de nutrientes a través de la escorrentía.
 - Manejo de animales y sus desechos.
 - ◊ **Impermeabilización efectiva de suelos en granjas intensivas.** Las granjas intensivas pueden considerarse fuentes de contaminación puntuales según Harper (1992), por lo que es necesario que estas no tengan ningún tipo de filtración de desechos a cauces superficiales y subterráneos. Como se ha analizado en este trabajo, la ganadería intensiva no es un problema ambiental en Zupitlán.
- **Desviación de flujos entrantes.** En este caso, aplicable a entradas puntuales, se desvían las entradas de flujos contaminantes a cuerpos de agua de menor importancia. Esta técnica no es aplicable en Zupitlán Debido a que es el único cuerpo de agua receptor de su zona de influencia efectiva.
- **Sedimentación aguas arriba.** Un proceso que ocurre en una cadena de embalses. El fósforo y el nitrógeno son atrapados en un reservorio aguas arriba del cuerpo de agua de interés. Este proceso es el que actualmente protege la calidad ambiental de la laguna de Zupitlán, y tiene como cuerpo de agua fusible a la Presa El Sabino.
- Métodos correctivos: Control de la concentración de nutrientes dentro del lago.
 - **Limpieza de la laguna por reemplazo de agua.** Esta técnica consiste en el lavado de la laguna, y requiere una fuente de agua de mayor calidad que la del cuerpo a tratar, algo de lo que no se dispone en Zupitlán.
 - **Remoción de sedimentos.** Es una técnica costosa debido a la necesidad de equipo de bombeo y al posterior transporte de lodos para disposición. Se ha utilizado mayormente como último recurso en lagos someros con muy

alto valor público, habiendo fallado otras técnicas. A pesar de tratarse de un método altamente efectivo, otra limitante para su aplicación en Zupitlán es el efecto inmediato posterior a la remoción del sedimento; el aumento de turbiedad, la disminución del oxígeno disuelto y la muerte de especies, algo que una comunidad dependiente de la pesca no puede permitirse.

- **Inactivación de nutrientes por precipitación o sellado de fondo.** Se han realizado trabajos de saneamiento de lagos pequeños administrando hierro, aluminio y otras sales para lograr la coagulación-floculación del fósforo disuelto en el agua.

En estos lagos se muestra una reducción de más del 90 % del fósforo del fondo. Este, sin embargo, vuelve a su nivel normal si no vuelve a aplicarse el coagulante. Un efecto no deseado de esta tecnología es el crecimiento de macrófitas sumergidas, que repentinamente dejan de tener competencia por la luz (Harper, 1992).

- **Cosecha de biomasa.** La intención de esta técnica es la reducción del fósforo acumulado en la biomasa algal. Es una práctica ya común en Zupitlán y otros lagos, sin embargo, su efectividad en la remoción del macronutriente es reducida, y su aplicación se limita a periodos de crecimiento de macrófitas con efectos estéticos y de taponamiento de cauces.

Una desventaja adicional de la práctica es que no permite el retiro total del tule, pues este sirve como refugio y lugar de cría para los peces que habitan en la laguna.

- Manejo de lagos sin reducción de nutrientes. Existen métodos diseñados para el control de la eutroficación sin reducir los nutrientes en el embalse (aunque mayormente se usan en conjunto con técnicas de reducción de nutrientes). A continuación se muestran dos de ellos que podrían, al menos técnicamente, aplicarse en Zupitlán.

- **Aireación artificial.** El principio de la técnica es evitar una condición anaerobia en el fondo del lago, a la vez que su temperatura permanece inalterada. El oxígeno en el fondo favorece la acumulación de nutrientes y evita su reciclaje (ver sección 2.1.4, página 31).

La aireación se logra a través de un equipo que introduce aire comprimido a la interfase detrito-agua por medio de un difusor.

Esta metodología tiene sus mejores resultados en lagos eutroficados donde ocurre una estratificación térmica en verano. Ha de tomarse en cuenta que la laguna de Zupitlán no se estratifica térmicamente

debido a su poca profundidad.

La aireación artificial no es necesariamente realizada por difusores sumergidos. El Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua realizó trabajos de saneamiento en la laguna de Bojórquez (Robles, 2010) en los que las condiciones del lugar llevaron a optar por un aireador de cascada que succionaba agua de las secciones estancadas del embalse y la transportaba 350m hasta la aireación. El proceso es, sin embargo, costoso.

- **Biomanipulación.** Harper (1992) la define como la alteración deliberada de un componente de la red trófica limnética para promover cambios en ella que alivien los síntomas de eutroficación, como la alta cantidad de biomasa y la baja transparencia.

En el caso de lagos someros (como Zupitlán) el objetivo de las técnicas de biomanipulación es disminuir la biomasa algal del embalse, incrementando su consumo al promover la abundancia de los herbívoros del medio, que son principalmente cladóceros (suborden de crustáceos braquiópodos), lo cual se logra al retirar del lago peces planctívoros, introduciendo masivamente al embalse peces piscívoros que depreden a los primeros (Mazzeo, s.f; Harper, 1992).

Otra manera de lidiar con el exceso de microalgas es brindar un refugio efectivo al zooplankton para su reproducción, lo que se logra protegiendo la zona litoral de los lagos someros, esto es, la zona del margen del lago, donde protegidos por el tule estos organismos pueden prosperar.

Las técnicas de biomanipulación se consideran indispensables en lagos someros, donde su uso puede ser un determinante para el control de la eutroficación (Mazzeo, s.f.), posterior a la aplicación de un método preventivo.

Mazzeo (s.f.) propone una matriz de factibilidad para la selección de las técnicas de control de la eutroficación en función de la morfología, régimen hidráulico y temperatura de un lago. esta matriz se observa en la figura 6.3.

Para la lectura de la matriz de Mazzeo se requiere la siguiente información: la laguna de Zupitlán tiene un área de 0.717km^2 y una profundidad media de 1.3m, razón por la que no se estratifica. A pesar de que no se realizó un balance de gastos de entrada



Figura 6.2: Aplicación de la técnica de arado de contorno, que aumenta la infiltración del agua y limita la erosión y consecuente pérdida de nutrientes. Tomado de Shahvaroghí (2016) .

Área	> 1km ²				< 1km ²			
Estratificado	SÍ		NO		SÍ		NO	
Tiempo de retención (años)	>5	<5	>5	<5	>5	<5	>5	<5
MÉTODOS MECÁNICOS								
Remoción de sedimento	-	-	-	-	+	+	+	+
Tratamiento de las aguas profundas	?	+	-	-	?	+	-	-
Desestratificación	+	+	-	-	+	+	-	-
MÉTODOS QUÍMICOS								
Precipitación de fósforo	+	?	+	?	+	?	+	?
Tratamiento del sedimento con nitrato	-	-	-	-	+	?	+	?
Aireación de las aguas profundas	+	+	-	-	+	+	-	-
BIOMANIPULACIÓN								
Control de peces planctívoros	+	+	+	+	+	+	+	+

Figura 6.3: Matriz de factibilidad de métodos de control de la eutroficación. Se han resaltado en tonos rosas las características morfológicas y de temperatura de Zupitlán (+: Método económicamente factible y con amplias posibilidades de éxito, -: Método económicamente factible, o no, y sin posibilidades de éxito, ?: método que carece de evidencias científicas sobre su efectividad en las condiciones señaladas). Tomado de Mazzeo (s.f.) .

y salida de la laguna de Zupitlán (debido a la dificultad que representaba que uno de las entradas fuera un manantial sumergido), para que su tiempo de retención hidráulico fuera mayor a 5 años se necesitaría que el gasto que sale del embalse fuera igual o menor a 59ml/s, lo cual es, naturalmente, un flujo mucho menor al observado

a la salida de los canales de riego de la laguna.

A partir de la matriz de Mazzeo (s.f.) y el catálogo de métodos de control de Harper (1992) tenemos un abanico de posibilidades técnicas de saneamiento de la laguna de Zupitlán, así como criterios de factibilidad, tanto técnica como de las condiciones sociales particulares del embalse. En la figura 6.4 se observan las técnicas de protección ambiental que se consideran factibles de aplicar a Zupitlán para el control y remediación de la eutroficación.

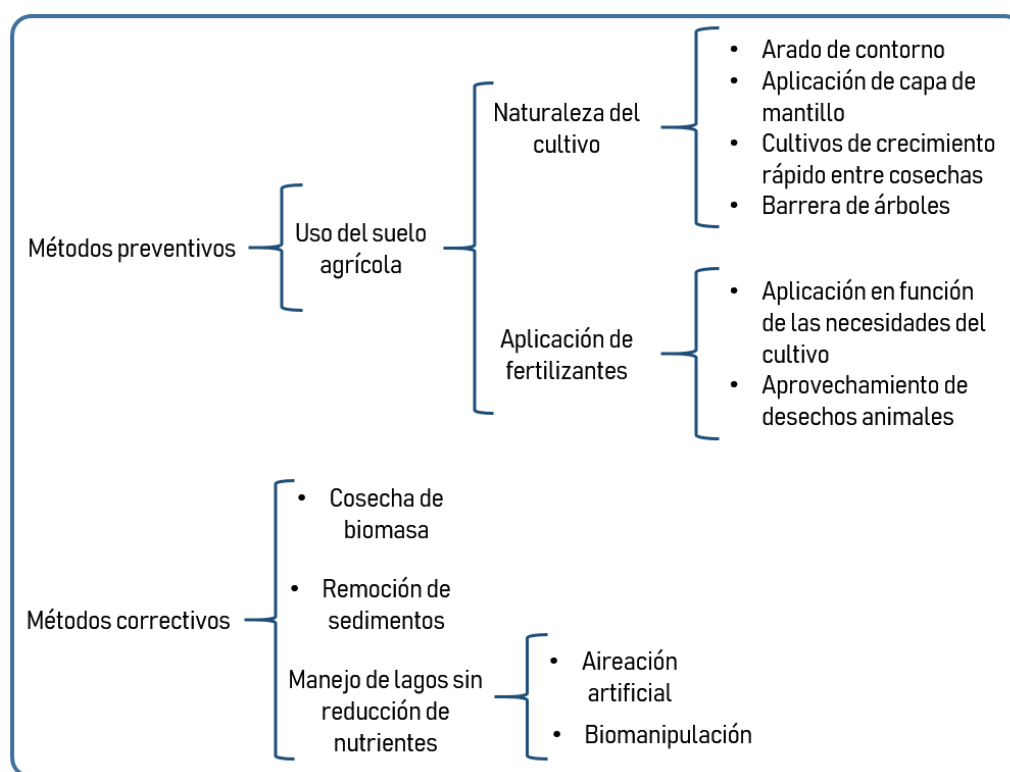


Figura 6.4: Árbol de opciones técnicamente factibles para el control de la eutroficación de Zupitlán. Elaborado a partir del catálogo de métodos de control de Harper (1992) y la matriz de criterios de selección de Mazzeo (s.f.).

La figura 6.4 resume las posibilidades técnicamente aplicables para el control de la eutroficación que actualmente sufre la laguna de Zupitlán. No obstante hay que hacer notar que la aireación artificial y la remoción de sedimentos son técnicas costosas (Robles, 2010; Harper, 1992; Mazzeo, s.f.), pues requieren de equipos especiales, cos-

tos de mantenimiento continuos o un lugar de disposición de sólidos. El municipio de Acatlán, como se ha mencionado antes, ha realizado una sola limpieza de la laguna de Zupitlán, misma que duró 6 años y costó \$120,000 (\$20,000/año) (Gobierno de Acatlán, 2013), por lo que puede ponerse en duda la disponibilidad de recursos para un programa de protección ambiental tecnificado.

Se sugiere un plan de acción en que la población de Zupitlán actúe por y para ella, tomando un papel protagónico en la protección y cuidado de la laguna a través de los, ya formados, comités de lancheros.

Esta estrategia tendría como eje rector el uso de métodos preventivos de control del problema de eutroficación, minimizando los efectos de la erosión de los suelos (ver las metodologías basadas en la naturalza de los cultivos de la figura 6.4), dosificando adecuadamente los fertilizantes artificiales y aprovechando los desechos orgánicos producidos por los animales de pastoreo.

En este supuesto, a través de la unión de las voluntades popular y política, podrían gestionarse los recursos económicos necesarios para la capacitación de los agricultores que laboran en la zona de influencia efectiva de la laguna de zupitlán con ayuda de una institución académica o gubernamental especializada (UNAM, IMTA, IPN, SAGARPA, entre otras), de tal modo que la carga de nutrientes que ingresa al embalse por medio de la escorrentía se viera reducido.

De manera paralela a los métodos preventivos, un control biológico podría ser aplicado, considerando la conservación de las especies que actualmente se aprovechan, y procurando que las nuevas especies introducidas tengan un valor comercial competitivo. La biomanipulación propuesta escapa a los alcances de este trabajo, sin embargo, es una técnica ampliamente probada en el mundo (mazzeo, s.f.; Harper, 1992; Ryding, 1989). Se insta a los pobladores de Zupitlán a continuar con su labor de cocecha de biomasa, misma que han realizado exitosamente las últimas décadas de forma autónoma e independiente.

Como integración de esta sección, es posible dividir los métodos propuestos en acciones inmediatas y a mediano y largo plazo.

- **Acciones inmediatas** Éstas están encaminadas al control físico de las macrófitas dentro del espejo de agua de la laguna de Zupitlán, lo que quiere decir, su

remoción por métodos convencionales, aplicables por los habitantes de la comunidad.

En este punto, debe considerarse la educación ambiental de los habitantes de la comunidad de Zupitlán como una necesidad igualmente inmediata, ésto en vista de que, meses después de finalizados los muestreos de este estudio, la laguna de Zupitlán ha sido protagonista en diferentes tabloides locales, debido a que un grupo de personas *no identificadas* removieron el tule del embalse y procedieron a quemarlo sobre la orilla de la laguna (González, 2018).

Si se recuerda la trascendencia de los pequeños embalses en la captura del carbono en el ambiente (sección , página 16), la quema del tule devuelve parte de ese carbono capturado, afectando, no sólo a la laguna de Zupitlán, sino a toda la atmósfera, que recibe un gas de efecto invernadero; esto, sin tomar en cuenta las posibles afectaciones a la salud de las personas expuestas al humo producido por la quema de las macrófitas.

- **Acciones a mediano plazo** En función del apoyo económico y técnico limitado en la zona, el paso natural a seguir (de acuerdo a este estudio) es la implementación de un control biológico, que tenga un doble objetivo de controlar la biomasa de la laguna y darle un valor estético, económico y turístico añadido con el aumento de los peces que la habitan.

También en el mediano plazo, la capacitación y educación de los habitantes de la laguna debería estar enfocada en el entendimiento y aplicación de los métodos preventivos que han sido analizados en esta sección (arado de contorno, capa de mantillo, barreras de árboles, entre otras).

- **Acciones a largo plazo** Para poder predecir cuantitativamente las variaciones temporales que experimentará la contaminación que entra a la laguna de Zupitlán, ya sea desde su zona de influencia efectiva, o aquella que comparte con la presa El Sabino, serían necesarios modelos matemáticos que asociaran la carga contaminante urbana, industrial y agrícola (de forma semejante a lo que se realizó en la sección 4.4) con el tiempo. Este modelo escapa a los alcances de este trabajo, sin embargo, existen procesos de urbanización que pueden esperarse en una región rural como Zupitlán y que tendrían efectos directos en la calidad ambiental de la laguna.

Irónicamente, la mejora de la infraestructura de saneamiento de la zona ad-

yacente a la laguna podría ser de gran impacto: Actualmente, la localidad de Zupitlán carece de una red de drenaje, por lo que el uso de letrinas y fosas sépticas es la regla. A pesar de que las fosas presentan grandes índices de infiltración (si no se construyen concienzudamente) el suelo funciona como un filtro natural que evita que la totalidad de los nutrientes liberados alcance el embalse (o el acuífero). En un futuro altamente probable Zupitlán se unirá a la red de drenaje municipal, para la cual no hay plantas de tratamiento de aguas residuales inventariadas en el sistema SIATL del INEGI. Si las casas cercanas a la laguna, adjuntas a la hipotética red de drenaje, descargan; en un primer escenario, sus aguas residuales crudas al embalse, entonces la calidad bacteriológica de sus aguas estaría comprometida para todos sus usos, y los nutrientes entrantes se sumarían al problema de eutroficación.

Por otro lado, si se instala una planta de tratamiento de agua residual, su efluente liberaría nitrógeno y fósforo orgánicos, la forma más fácilmente asimilable por la biomasa algal de estos nutrientes, que implicaría un rápido florecimiento de las microalgas (esto ocurrió en la década de 1970 en los grandes lagos canadienses, con la introducción de plantas municipales de tratamiento de agua residual (Harper, 1992)).

Para el escenario de futuras descargas, crudas o tratadas, es crucial que el municipio lleve un control de algunos descriptores de calidad del agua en el largo plazo, de modo que se puedan tomar acciones eficientes en caso se percibirse cambios en éstos. Al control de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos se sumarán los efectos benéficos sobre la carga contaminante de las medidas preventivas, que habrían sido ya implementadas.

También al largo plazo, el control de los nutrientes entrantes desde El Sabino es una pieza clave en la gestión de la calidad ambiental de la laguna de Zupitlán. Se abunda de forma independiente en la siguiente sección.

6.2. La presa El Sabino

Mientras que los métodos propuestos en la sección anterior están diseñados para controlar las entradas de nutrientes a lagos desde fuentes difusas, la laguna de Zupitlán tiene un problema particular en la forma de la presa El Sabino.

Como lo revelaron los análisis de calidad del agua efectuados en este trabajo, la

presa El Sabino sirve como receptor de la carga contaminante de la cuenca de la zona semiurbana adyacente a la localidad de Zupitlán. De no ser por este embalse la laguna de Zupitlán estaría expuesta a los efectos directos de las altas concentraciones de materia orgánica y sedimentos que son arrastrados por la cuenca.

En palabras de Harper (1992), la presa el Sabino es en sí misma un método preventivo (llamado de sedimentación aguas arriba) en el cual, en un embalse de poca importancia económica o de abastecimiento, se permite la acumulación de sedimentos. En este embalse no es relevante el reciclaje de nutrientes por acción de los mecanismos de óxido-reducción de la carga interna, pues, al no esperar el aprovechamiento de especies de peces, no es importante que se dé la anaerobiosis, siempre y cuando los nutrientes sigan depositándose en el detrito del cuerpo de agua.

La problemática surge al no conocer la capacidad de retención de El Sabino antes de que, eventualmente, se sature de fósforo y nitrógeno y estos nutrientes puedan entrar libremente a Zupitlán en la época de lluvias, cuando ambos reservorios se conectan. La Laguna de Zupitlán corre el riesgo constante de dejar de tener la protección de su laguna fusible en el momento en que esta se sature.

El agotamiento de la capacidad de retención de El Sabino podría solucionarse si el embalse tuviera una capacidad infinita de almacenamiento de sedimentos, lo cual, por supuesto, no es posible. Pero ¿Qué pasaría si pudieran realizarse remociones periódicas de sedimentos del reservorio de una manera relativamente sencilla?, entonces Zupitlán estaría protegida de la carga contaminante por un tiempo indefinido.

Una visita realizada a El Sabino el 17 de octubre de 2018 abrió la posibilidad, que no había sido contemplada, de extender su capacidad de retención de nutrientes de manera indefinida a través de limpiezas de detrito relativamente sencillas. Durante esa visita, en la cual se planeaban tomar muestras de agua para su posterior análisis bacteriológico en el laboratorio, el embalse había simplemente desaparecido, dejando en su lugar un pequeño estanque de no más de 100m² (ver la figura 6.5).

Es probable que el tirante mínimo en el Sabino se debiera a la apertura extraordinaria de las compuertas que conectan con Zupitlán, posiblemente porque se necesitaba un mayor caudal en los canales de riego que salen de la laguna. Independientemente de lo que llevó a utilizar el agua de El Sabino, quedó en evidencia que este reservorio puede ser desalojado en su totalidad sin afectar la calidad del agua de Zupitlán (los análisis que se realizaron en la laguna ese día, con fines escolares, estuvieron en el



Figura 6.5: En la fotografía puede observarse el embalse de la presa El Sabino con un tirante mínimo, ocupando una superficie de apenas 100m^2 .

rango de los muestreos presentados en este trabajo).

El Sabino tiene una topografía accidentada, pero accesible, a la que podría acceder un camión de volteo y retroexcavadoras para retirar los sedimentos (que forman una capa de 40cm aproximadamente) de manera periódica. Estas actividades de limpieza serían considerablemente más rentables que las necesarias en un embalse lleno y estarían separadas temporalmente por periodos de varios años, pues no existe registro de ninguna limpieza anterior y el cuerpo de agua sigue siendo un sumidero de nutrientes eficiente (hasta un 98 % de remoción de nitrógeno amoniacal en época de lluvias).

Los estudios realizados en Zupitlán han revelado, a lo largo de este trabajo, que su relación con El Sabino es fundamental para la protección de su ecosistema acuático. El Sabino es el mayor sistema de control de nutrientes y protección ambiental con que cuenta la laguna, por lo que cualquier plan integral de manejo del recurso hídrico deberá incluir a los dos reservorios en sus consideraciones.

Aunque colocar al Sabino en el centro de la discusión sobre el saneamiento y control de la calidad ambiental de la laguna parece una sobre-simplificación del problema que acontece en el embalse, en esta investigación se han encontrado evidencias suficientes para apoyar esta afirmación, con el cálculo del Índice de Vollenweider siendo la más relevante de todas.

El índice de Vollenweider (ver apartado 5.4) ha sido estimado a partir de la carga de fósforo y nitrógeno que entra a la laguna de Zupitlán desde su zona de influencia efectiva, considerando los desechos aportados por los habitantes, el ganado y los cultivos (no se incluyó otro tipo de descarga, pues no fueron encontradas actividades productivas adicionales en el área). Este índice no considera los nutrientes que entran a Zupitlán desde la presa El Sabino, y arrojó cargas de nitrógeno y fósforo muy por debajo de aquellas que ocasionan problemas de eutroficación, lo que significa que las colindancias de Zupitlán no son la fuente del problema ambiental, dejando al Sabino como el responsable lógico de la problemática ambiental.

Capítulo 7

Conclusiones

- A través de las campañas de muestreo realizadas en esta investigación, se determinó que la calidad del agua de la laguna de Zupitlán es buena para las actividades que actualmente se realizan en el lugar; que incluyen la pesca de carpa, el riego de tierras agrícolas (mayormente destinadas al crecimiento de pastura para ganado) y la hidratación de los animales de ganadería extensiva que se encuentran mayormente en la margen oeste del embalse.

En términos bacteriológicos, la laguna resultó ser compatible con actividades de contacto directo, como la natación, el turismo de aventura y el ecoturismo. No obstante, su color, turbidez y baja profundidad no la vuelven atractiva para estos fines. Es factible, técnicamente, dragar el embalse para aumentar su calado. Esta operación, sin embargo, tiene un efecto inmediato de reducción del oxígeno disuelto y aumento de la turbiedad que puede ocasionar la muerte de peces.

La calidad de la laguna es mala para su aprovechamiento para el consumo humano, pues sería necesario un tren de tratamiento especializado para la remoción de la alta cantidad de materia orgánica, que combinada con una desinfección con cloro, podría provocar la aparición de trihalometanos (compuestos catalogados como carcinogénicos).

- La zona de influencia de la laguna de Zupitlán resulta ser parte de una microcuenca de mayores proporciones, que drena primero en el cuerpo de agua vecino, la presa El Sabino. El área que drena directamente a Zupitlán, sin pasar por El Sabino, es de 2.204 km², y su uso de suelo está mayormente dedicado a la agricultura no tecnificada.

- El comportamiento fisicoquímico de la laguna a lo largo del año (considerando una dualidad temporal estiaje-lluvias) es atípico, pues, contrario a lo esperado en el estiaje (periodo en el que la laguna alcanza su volumen mínimo y las concentraciones de las especies químicas disueltas en ella se esperan máximas), los resultados de las pruebas de laboratorio revelaron una disminución de la mayor parte de los contaminantes del embalse.

Lo anterior se explica a partir de la conexión transitoria con El Sabino, que al desaparecer en verano, reduce la carga contaminante que se incorpora a la laguna de Zupitlán, provocando una baja en las lecturas de los parámetros descriptores de la calidad del agua en la campaña de muestreo en estiaje.

- El Índice canadiense de la Calidad Fisicoquímica y Bacteriológica (IQBP, por sus siglas en francés) coloca al agua de la laguna de Zupitlán en la clase *E*, que es la más desfavorable, implicando un agua de mala calidad para todos sus posibles usos.

El IQBP ha resultado útil para el diseño de los muestreos y análisis de laboratorio de este trabajo, sin embargo, resulta arrojar resultados conservadores y simplistas respecto al agua de Zupitlán.

A pesar de la sobre-simplificación de la clasificación global de la calidad del agua del embalse, los resultados individuales del IQBP, para cada parámetro estudiado, fueron consistentes con el resto del estudio.

- Los parámetros analizados en cada muestreo fueron representados como mapas de isoconcentración georreferenciados. Estos mapas pueden servir como una fuente de información de rápida y simple interpretación, aprovechables para futuros estudios en el lugar y por los funcionarios encargados de la gestión hídrica del municipio de Acatlán.

Los isomapas también permitieron encontrar relaciones entre algunos de los parámetros analizados, así como identificar fácilmente las zonas en las que la calidad del agua resulta más desfavorable.

- Se determinaron tres diferentes índices de estado trófico para la laguna de Zupitlán: el índice de Vollenweider, el índice de Carlson y el índice propuesto por la OCDE. Los dos últimos dependen de los parámetros clorofila *a*, transparencia y fósforo; y colocan a la laguna de Zupitlán en un estado que va de la

eutrofia a la hipereutrofia.

Por otro lado, el índice de Vollenweider indica que las cargas de nitrógeno y fósforo que ingresan a la laguna desde sus inmediaciones no son suficientes para generar un problema de eutroficación.

Estos resultados indican que la eutroficación no está asociada a la carga de contaminantes que ingresa a la laguna desde su zona de influencia efectiva, sino desde su conexión con la presa El Sabino.

- El cálculo de las cuencas de drenaje de la presa El Sabino y la laguna de Zupitlán permitió entender que la mayor parte de los escurrimientos que llegan a ésta última atraviesan antes a El Sabino, que funciona como una laguna de estabilización que ofrece un pretratamiento a sus aguas antes de enviarlas Zupitlán, reduciendo los valores de algunos de los parámetros analizados, ahasta en un 98 %.

El índice de Vollenweider, como se indico en el punto anterior, no demuestra una relación entre la zona de influencia efectiva de la laguna de Zupitlán y su grado de contaminación. Relación que está presente entre la zona de influencia de El Sabino y la Laguna de Zupitlán.

- La presa El Sabino retiene mecánicamente, o bien procesa química o bioquímicamente la mayor parte de la carga contaminante que ingresa a la laguna de Zupitlán.

Los límites de la capacidad de pretratamiento y almacenamiento de contaminantes de El Sabino no han sido determinados, sin embargo, es seguro que habrán de ser eventualmente alcanzados. En este punto, la laguna de Zupitlán recibirá la totalidad de nutrientes y patógenos provenientes de la subcuenca de la presa, disminuyendo radicalmente su calidad ambiental.

A partir de las observaciones realizadas en visitas de reconocimiento de la zona, se sabe que existen periodos en que El Sabino llega a una capacidad mínima de almacenamiento (con un espejo de agua de pocas decenas de metros cuadrados, y un tirante no mayor de 10 cm). Se propone aprovechar estos espacios de tiempo para retirar los sedimentos acumulados en el fondo del embalse (cuidando que su disposición final no resulte en mayores problemas ambientales).

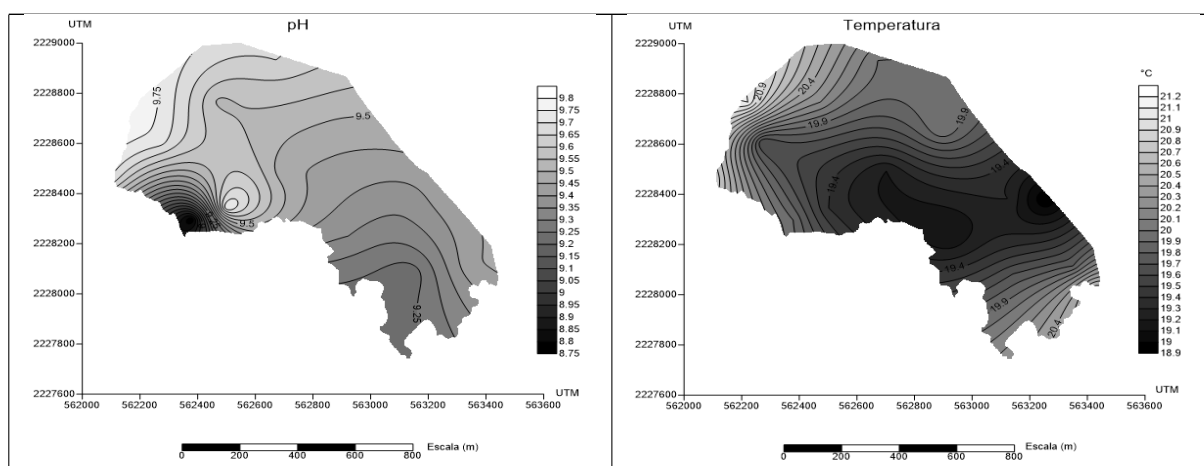
La limpieza periódica de los sedimentos de la presa El Sabino puede, en la teoría, prolongar la protección de la laguna de Zupitlán de forma indefinida, y está asociada a costos menores que aquellos de métodos que pudieran ser implementados directamente en la laguna.

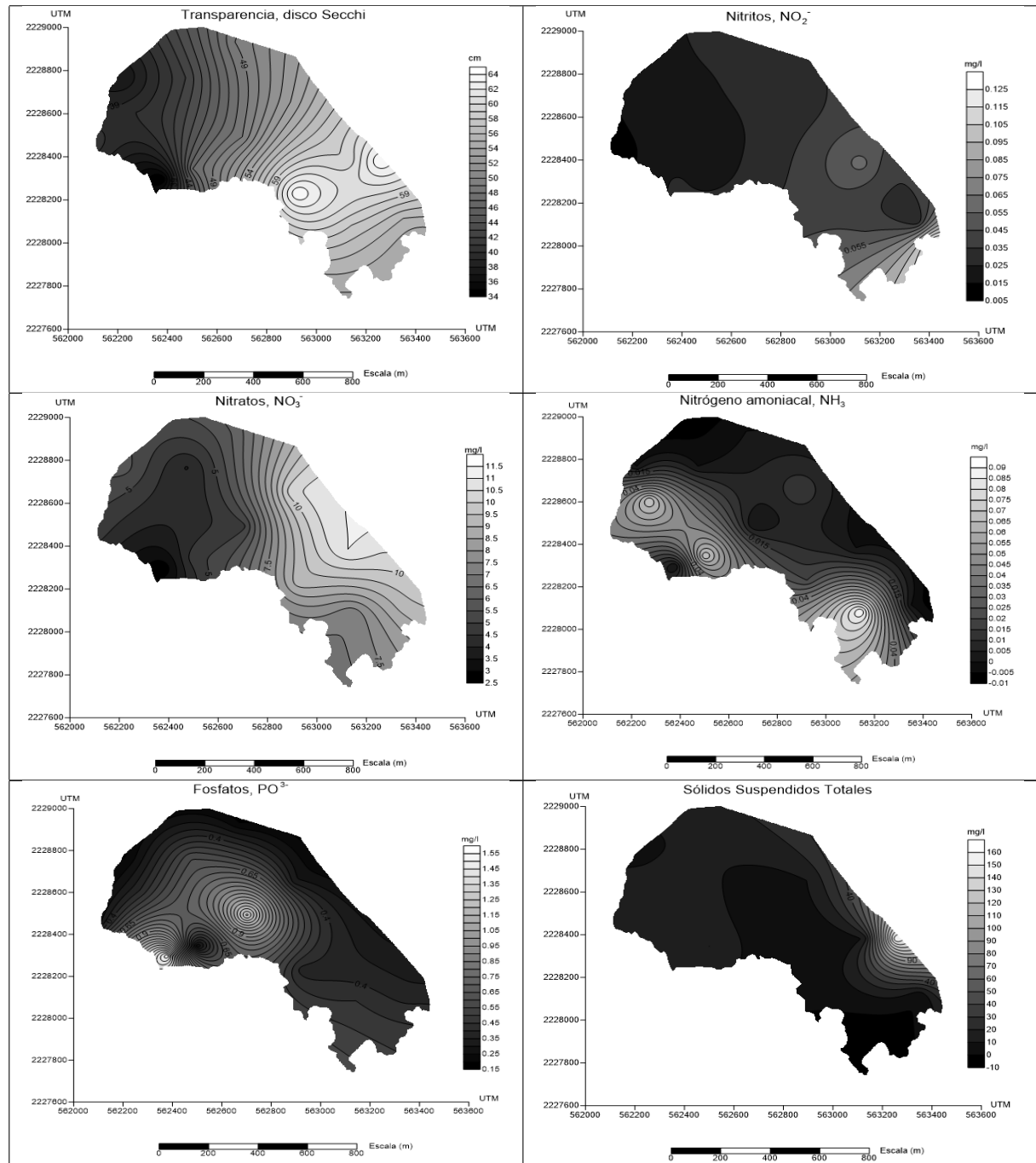
Se insta encarecidamente a quien pretenda seguir con el estudio de Zupitlán, o aún mejor, con su saneamiento, a considerar como parte integral de su estrategia a la presa El Sabino, pues esta resulta ser el blindaje ambiental natural que tiene Zupitlán a la carga de sedimentos provenientes de su cuenca.

Apéndice A

Mapas de isoconcentraciones

A.1. Primera campaña de muestreo





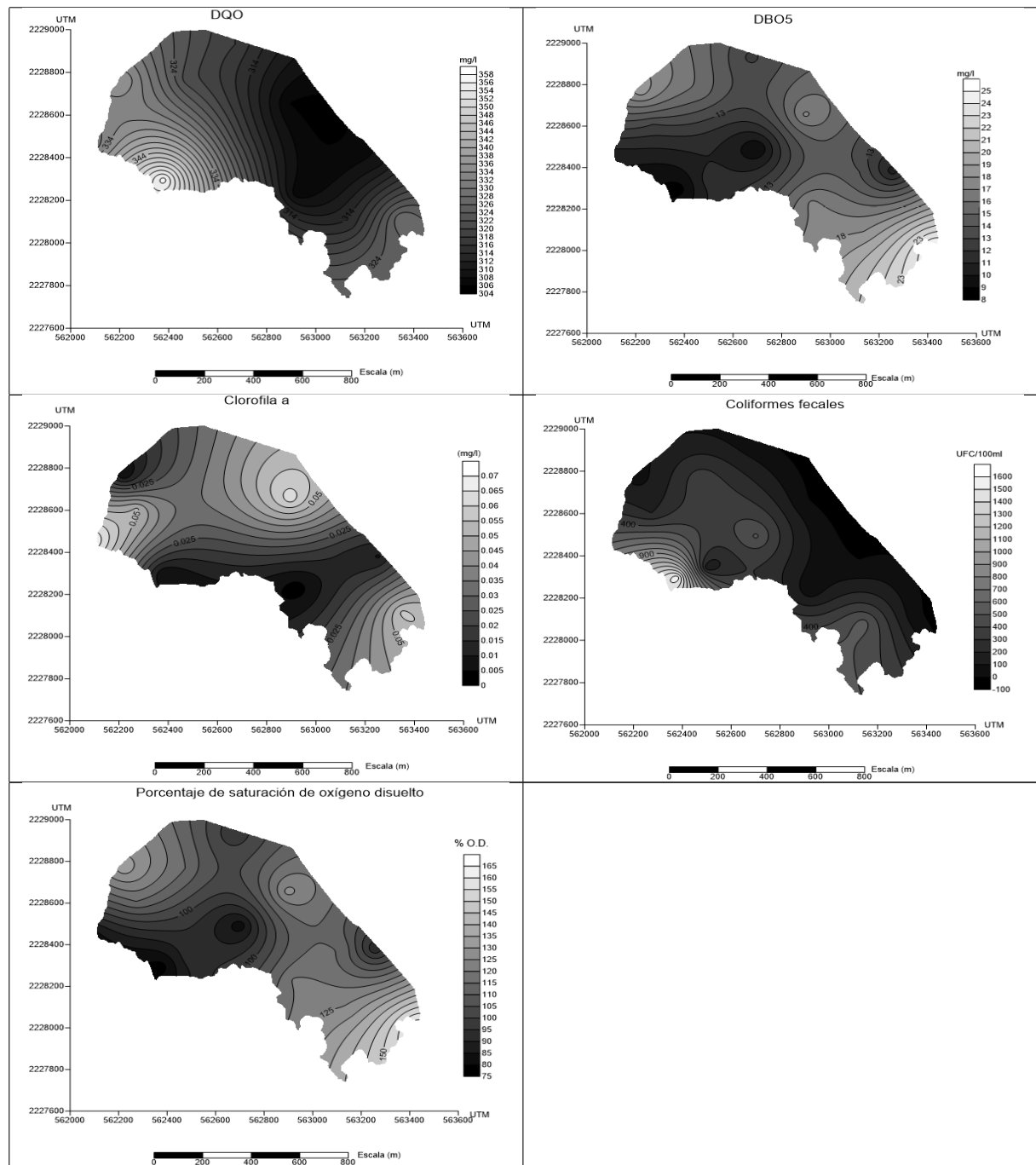
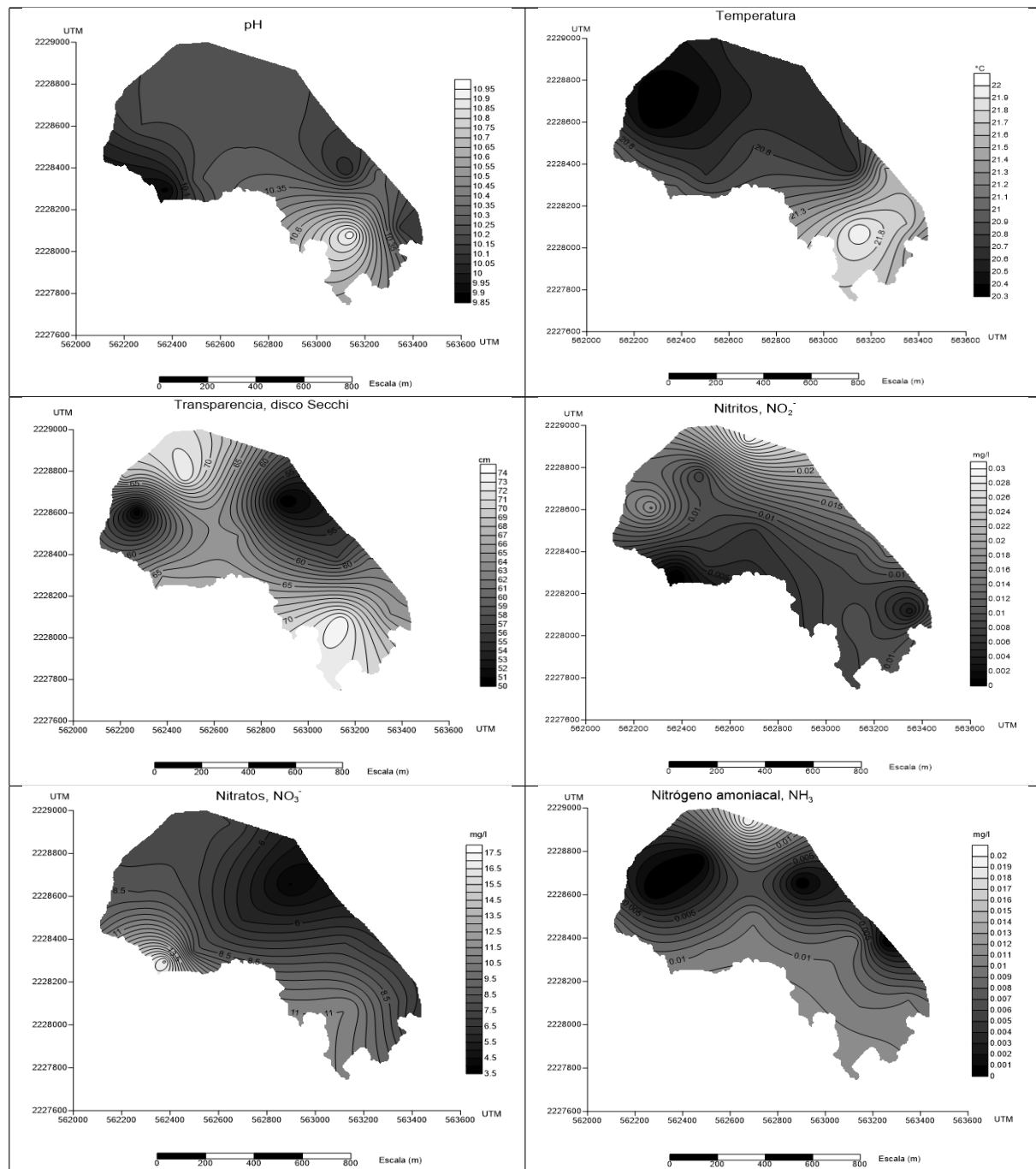
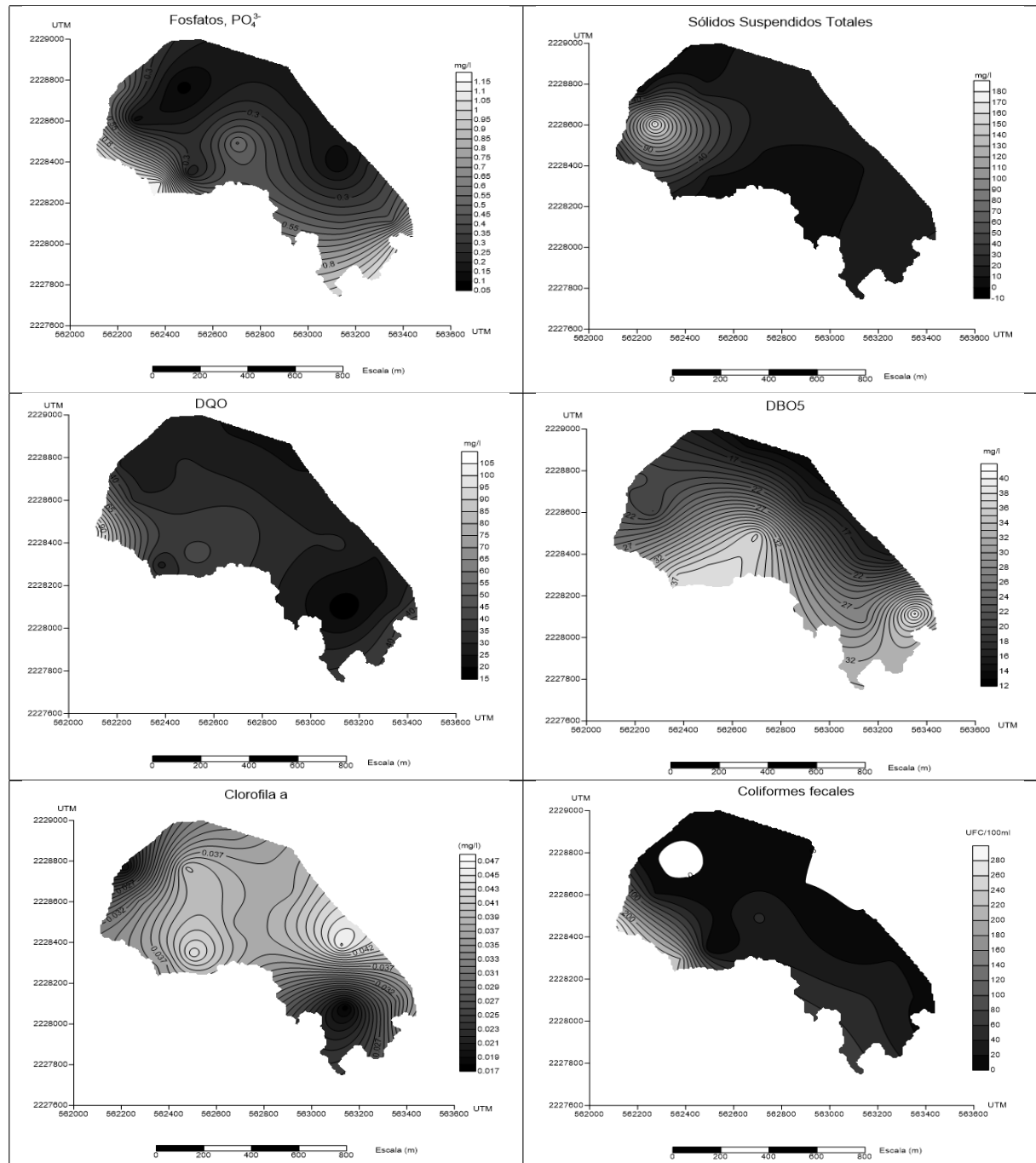


Tabla A.1: Mapas de isoconcentración correspondientes a todos los parámetros analizados durante la primera campaña de muestreo, realizada el día 5 de octubre de 2017

A.2. Segunda campaña de muestreo





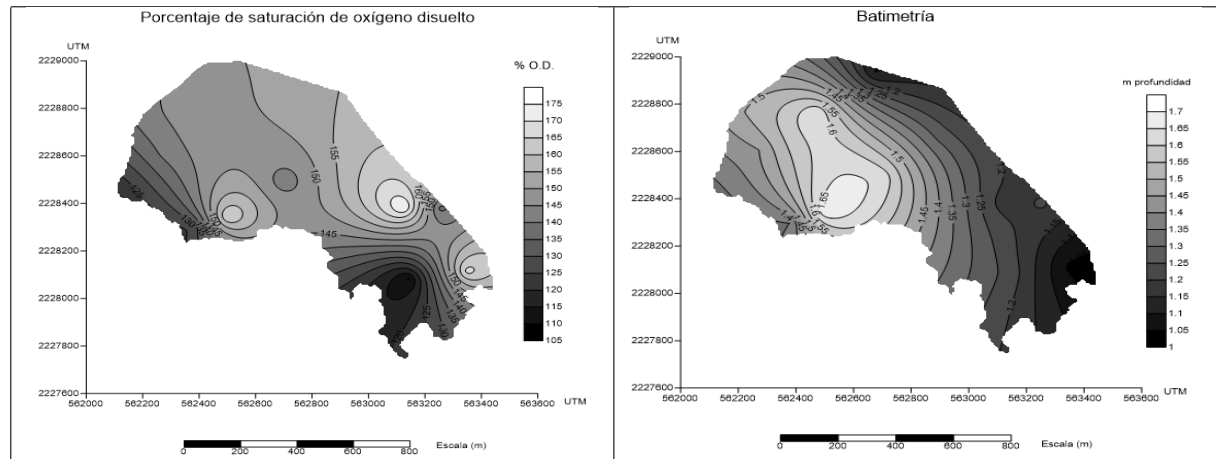


Tabla A.2: Mapas de isoconcentración correspondientes a todos los parámetros analizados durante la segunda campaña de muestreo, que tuvo lugar el día 1 de marzo de 2018

Apéndice B

Métodos analíticos

Tabla B.1: Métodos analíticos utilizados para la determinación de los parámetros medidos durante las campañas de muestreo en la Laguna de Zupitlán.

Parámetros	Método analítico o equipo utilizado
pH	Sonda Hanna 9146
Temperatura	Sonda Hanna 9146
Transparencia	Disco Secchi (D=30cm)
Nitritos	Hach, método 8507
Nitratos	Hach, método 8039
Nitrógeno amoniacal	Hach, método 8155
Fosfatos	Hach, método 8048
Sólidos suspendidos totales	Norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015
DQO	Hach, método 8000. Rango alto (250-15000mg/l)
DBO ₅	Norma oficial mexicana NOM-AA-28-1981
Clorofila a	Método de Stricklan y Parson
Coliformes fecales	Filtración con membrana, APHA 9222D. Medio de cultivo m-Colibblue24
Oxígeno Disuelto	Sonda Hanna 9146

La tabla presenta los métodos e instrumentos utilizados para realizar las determinaciones correspondientes a los muestreos en lluvias y estiaje en la laguna de Zupitlán

Apéndice C

Tablas comparativas, calidad del agua

En este apartado se presentan los límites permisibles, intervalos y clases dentro de las cuales se juzga la calidad del agua, para algunos de los parámetros (valores promedio) medidos en la Laguna de Zupitlán.

Norma Parámetro	NOM-001- SEMARNAT-1996		NOM-003- SEMARNAT-1996		Criterios ecológicos CE-CCA- 1989		
	Riego agrícola	Público urbano	Contacto directo	Contacto indirecto	Vida acuática	Riego agrícola	Carpa
pH						4.5-9	7-8.5
Temperatura (°C)	40	40			Natural +1.5		20-30
Transparencia (cm)							30-50
N NO ₂ - (mg/l)							
N NO ₃ - (mg/l)							
N NH ₃ (mg/l)					0.06		
PO ₄ 3- (mg/l)							
SST (mg/l)	75	40	20	30		50	
DQO							
DBO ₅ (mg/l)	75	30	20	30			
Cla (mg/l)							
Col. fecales (UFC/100ml)							
OD (mg/l)					5		5
O.D. (% de saturacion)							

Tabla C.1: La figura muestra los diferentes límites permisibles (mínimos, para el caso del oxígeno disuelto, O.D., y máximos para el resto de los descriptores de calidad del agua), así como los intervalos que se deben de cumplir según las normas oficiales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1996 y los criterios ecológicos CE-CCA-1989.

Clase Parámetro	Clase				
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V
O.D. (%)	90-70	70-50 O 110-120	50-30 O 120-130	30-10 O 130-150	<10 O >150
O.D. (mg/l)	>7	7-6	6-4	4-3	<3
DQO (mg/l)	<3	3-10	10-20	20-30	>30
Cla (µg/l)	<2.5	2.5-10	10-30	30-110	>110
pH	9-6.5	6.5-6.3	6.3-6	6-5.3	<5.3

Tabla C.2: La figura muestra los intervalos de valores que pueden tomar los descriptores de calidad del agua, según la clasificación estándar de la Comisión Económica Europea para el mantenimiento de la vida acuática en agua dulce superficial.

	Calidad		
	Excelente	Buena	Suficiente
Escherichia Coli (UFC/100ml)	500	1000	900

Tabla C.3: La figura muestra la clasificación de calidad de aguas continentales con fines recreativos, según la directiva 2006/7/EC de la Unión Europea.

Apéndice D

IQBP

En este anexo se presentan las curvas de apreciación de la calidad del agua para los parámetros sugeridos por el Índice de Calidad Bacteriológica y Fisicoquímica del Agua, IQBP, por sus siglas en francés, así como la tabla de resultados simplificado de la segunda campaña de muestreo, compatible con el IQBP.

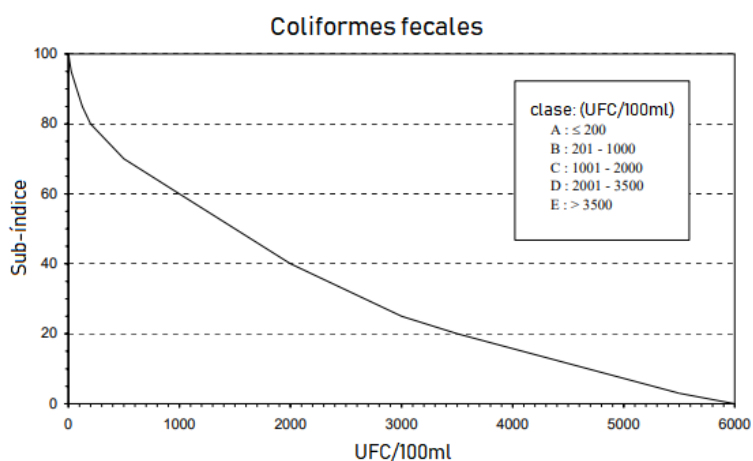


Figura D.1: Curva de apreciación de la calidad del agua para coliformes fecales, según el IQBP. La unidad de medida son las unidades formadoras de colonias (UFC) por cada 100ml de muestra. Adaptado de Hébert (1996).

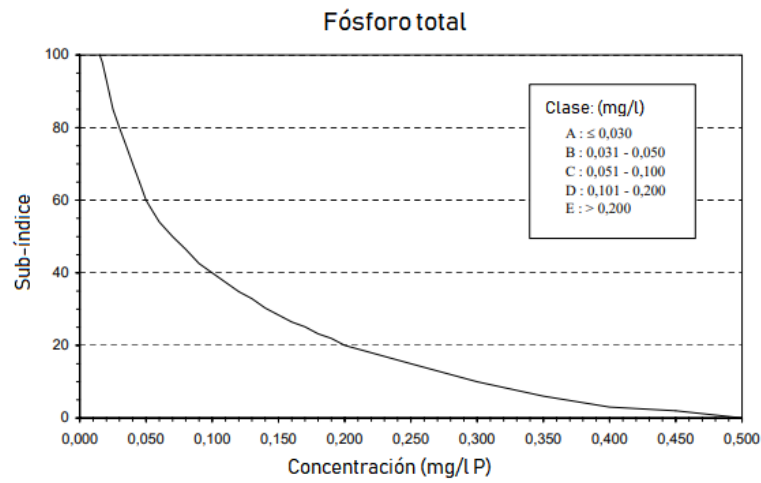


Figura D.2: Curva de apreciación de la calidad del agua para fósforo total, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996).

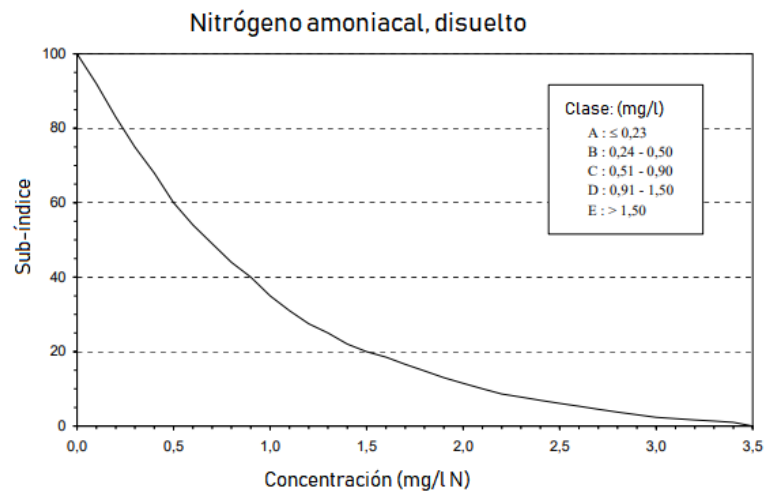


Figura D.3: Curva de apreciación de la calidad del agua para nitrógeno amoniacal, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996).

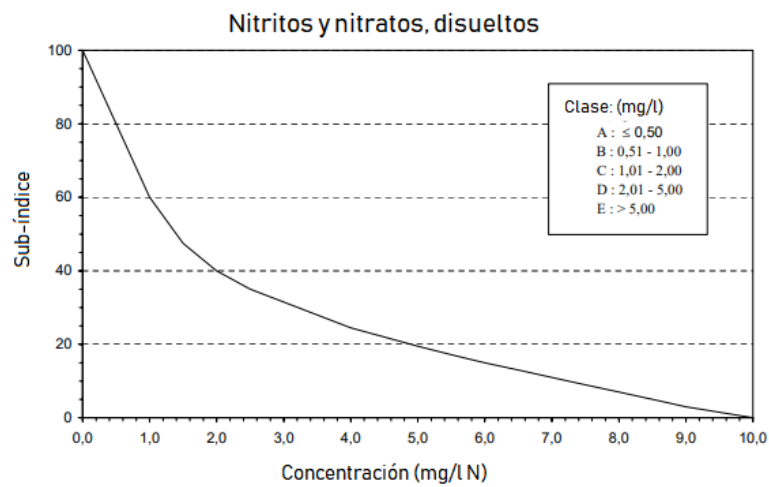


Figura D.4: Curva de apreciación de la calidad del agua para nitritos y nitratos, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996).

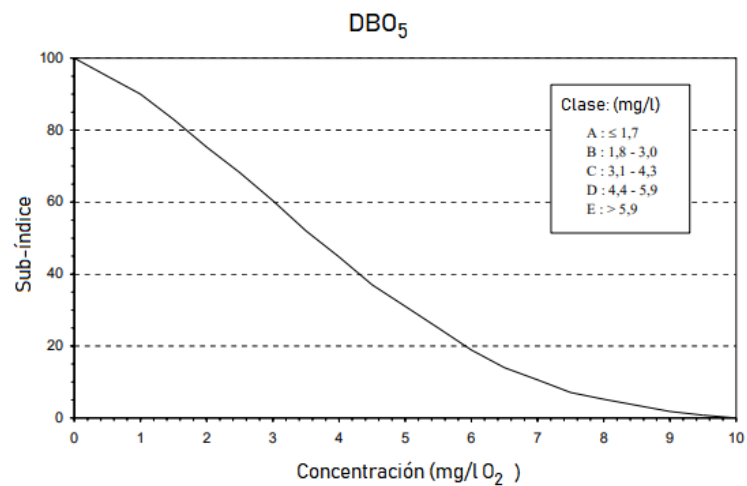


Figura D.5: Curva de apreciación de la calidad del agua para Demanda Biológica de Oxígeno, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996).

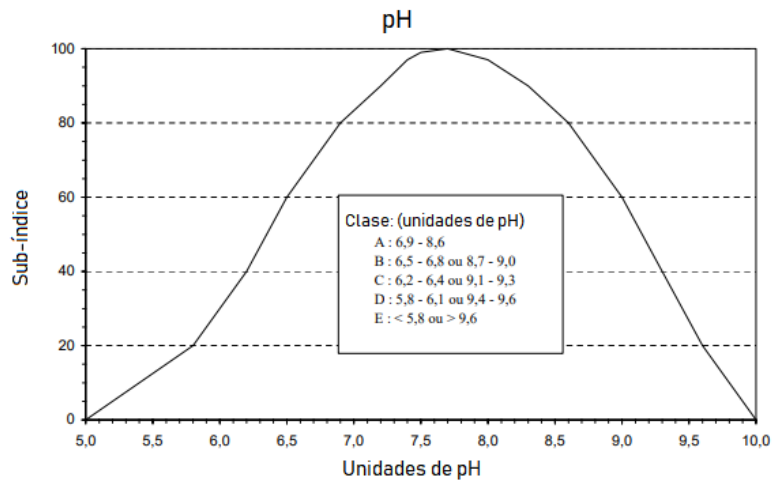


Figura D.6: Curva de apreciación de la calidad del agua para pH, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996).

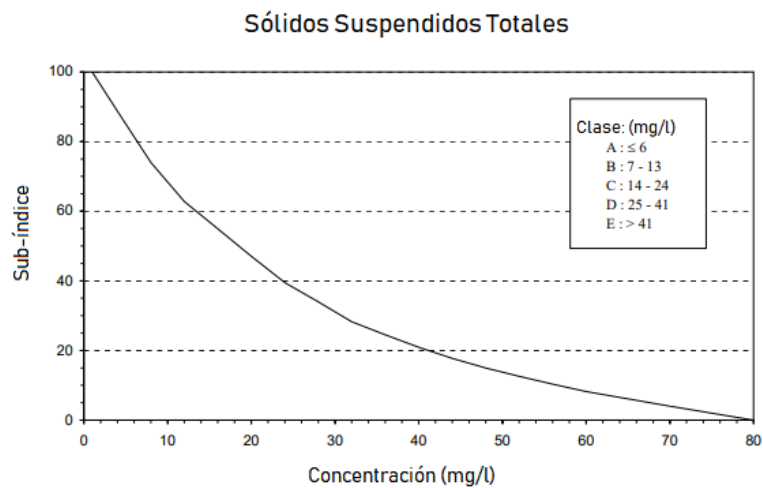


Figura D.7: Curva de apreciación de la calidad del agua para Sólidos Suspendidos Totales, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996).

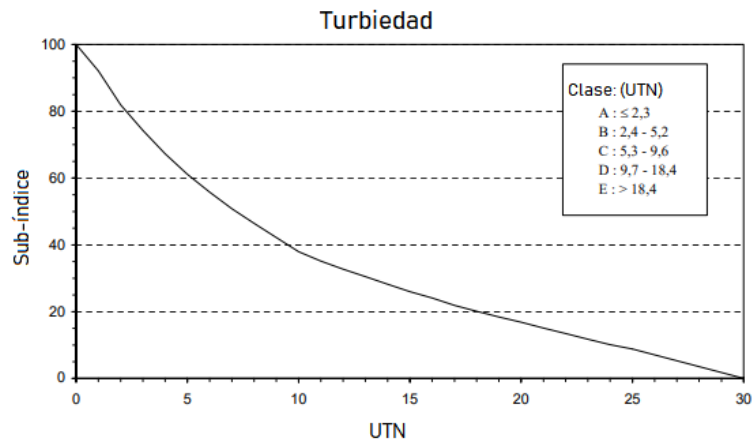


Figura D.8: Curva de apreciación de la calidad del agua para turbiedad, según el IQBP. La unidad de medida es la Unidad de Turbiedad Nefelométrica (UTN). Adaptado de Hébert (1996).

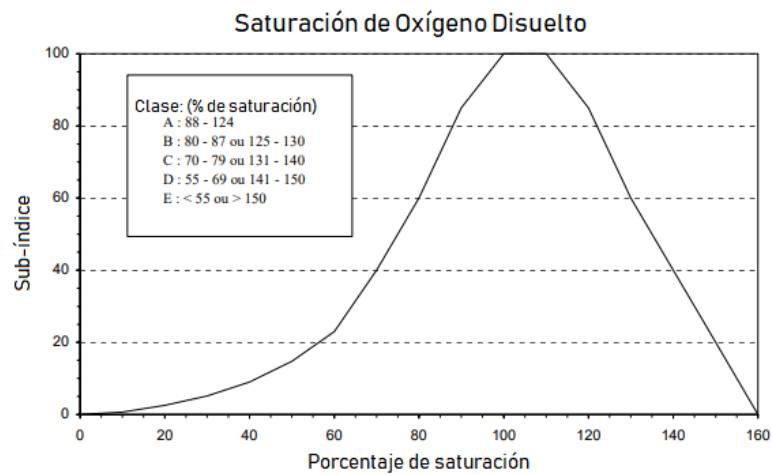


Figura D.9: Curva de apreciación de la calidad del agua para la saturación de oxígeno disuelto, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996).

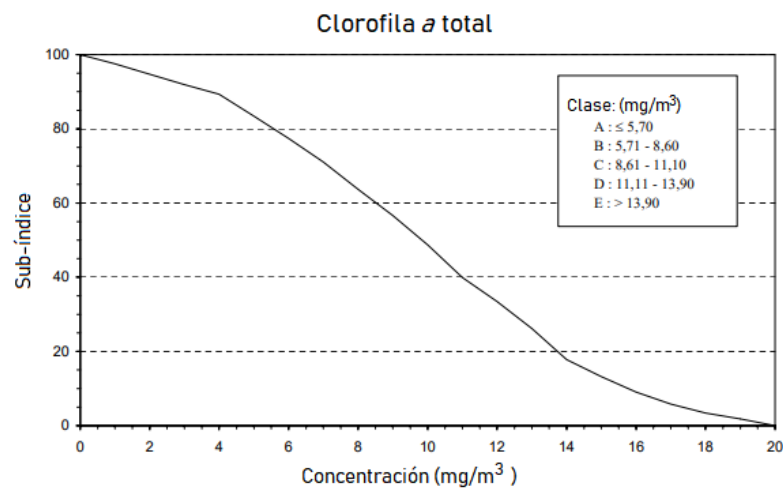


Figura D.10: Curva de apreciación de la calidad del agua para la clorofila *a*, según el IQBP. Adaptado de Hébert (1996).

Muestra	Coliformes Fecales (UFC/100ml)	Ortofosfatos	NH ₃ (como N)	Nitritos+nitratos (como N)	DBO ₅ (mg/l)	pH	SST (mg/l)	% sat. OD	Cla (mg/l)
Salida 1,2	10	0.53	-	1.79	21.35	10.19	6.00	143.50	0.02
Salida 3,4	0	1.17	0.01	1.49	31.00	10.15	24.00	151.30	0.04
Salida 5	20	0.26	0.00	1.49	16.25	10.32	18.00	138.50	0.04
Entrada 1	45	0.48	0.01	2.49	27.60	10.94	13.00	109.40	0.02
Entrada 2	220	1.115	0.01	3.88	37.30	9.89	21.00	126.20	0.04
M1	300	1.08	0.01	2.09	25.40	9.99	19.00	118.50	0.03
M2	20	0.135	0.00	1.94	19.93	10.20	171.00	141.00	0.03
M3	0	0.08	0.00	1.79	21.00	10.22	13.00	148.80	0.04
M4	20	0.19	0.02	1.70	13.25	10.25	16.00	150.80	0.03
M5	0	0.21	0.01	1.99	37.10	10.24	9.00	165.50	0.04
M6	45	0.56	0.01	1.34	37.20	10.25	11.50	141.70	0.04
M7	0	0.215	0.00	0.90	16.75	10.22	14.50	155.90	0.04
M9	0	0.11	0.01	1.69	17.60	10.05	9.00	175.50	0.05
M11	20	0.48	0.01	1.79	40.40	10.13	11.00	167.00	0.03

Tabla D.1: Resultados de los análisis de la campaña de muestreo en estiaje, ajustados para su comparación con las curvas de apreciación de la calidad del agua del IQBP.

Referencias

- [1] *Agricultura*. (2016), Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Hidalgo. [En línea] <<http://s-agricultura.hidalgo.gob.mx/?p=1558>> [Consultado 3 octubre 2016].
- [2] AGUILAR, A. (2008). *La contaminación agrícola del agua en México. Retos y perspectivas*. Problemas del desarrollo. Revista latinoamericana de economía, Vol 39, núm 153, abril-junio, pp 206-215.
- [3] ALLOCATI, N; ET AL. (2013). *Escherichia Coli in Europe: an overview*. International Journal of Environmental Research and Public Health. Suiza.
- [4] AMÉ, V. *Eutrofización en el embalse San Roque y floraciones masivas de cianobacterias. Seguimiento por técnicas geoespaciales*. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- [5] ÁVILA, A ET AL. (2009). *Índices de calidad del agua de la laguna de Zupitlán, municipio de Acatlán, estado de Hidalgo*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo-Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [6] CARVALHO, F. ET AL. (2013). *Cheese whey wastewater: Characterization and treatment*. Science of the total environment. Elsevier.
- [7] CCA A.C. (2015). *Conoce los 5 lagos mas grandes de México*. Consejo Consultivo del Agua A.C. México.
- [8] CEPIS, 2001. (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lags tropicales. Actualización 2001*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Organización Panamericana de la Salud.
- [9] CESEL. (2010). *Estudio de Impacto Ambiental y Social del Proyecto Hidroeléctrico Curibamba*. CESEL ingenieros.

- [10] CISTERNA, P. (s.f.). *Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la región VIII*. Universidad Tecnológica Federal Santa María. Chile.
- [11] CMPRALTA. (2014). *Estado de la calidad ambiental de la cuenca del lago Titicaca, ámbito peruano*. Comisión Multisectorial para la prevención y Recuperación Ambiental del Lago Titicaca y sus Afluentes. Perú.
- [12] CONAGUA. (2013). *Estadísticas del agua en México, edición 2013*. Comisión Nacional del Agua. México.
- [13] CONAGUA. (2015). *Estadísticas del agua en México, edición 2015*. Comisión Nacional del Agua. México.
- [14] CONAGUA. (2017). *Estadísticas del agua en México, edición 2017*. Comisión Nacional del Agua. México.
- [15] CONAPO. (2010). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio, 2010*. Consejo Nacional de Población, México. [En línea] <<https://goo.gl/9DQmLZ>> [Consultado 8 de noviembre 2016].
- [16] CRUZ, M. (2009). *IDENTIFICACIÓN DE BIOINDICADORES EN LA LAGUNA DE ZUPITLÁN, MUNICIPIO DE ACATLÁN, HGO., MÉXICO*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- [17] CUATEPOTZO, M; ET AL. (2010). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Estado de Hidalgo, Acatlán*. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, México. [En línea] <<https://goo.gl/cGq1kQ>> [Consultado 8 noviembre 2016].
- [18] DE LA LANZA, G. (2014). *Protocolo para el muestreo de calidad del agua en ríos endorréicos y exorréicos, y en humedales para la aplicación de la Norma de Caudal Ecológico (NMXAA-159-SCFI-2012)*. Instituto de Biología, UNAM.
- [19] *Ecoturismo en Acatlán, Hidalgo*. (2016), Pueblos mágicos de México. [En línea] <https://www.pueblosmexico.com.mx/imprimir-pueblo.php?id_article=23512> [Consultado 3 octubre 2016].
- [20] *Enciclopedia de los municipios de Hidalgo*. (2016). Gobierno del Estado de Hidalgo, México. [En línea]

- [21] FAO. (2004). *Uso de fertilizantes por cultivo en Argentina*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- [22] FAO. (1987). *Site selection for aquaculture, Chemical features of water*. Food and Agriculture Organization/Nigerian Institute for Oceanography and Marine Research, Nigeria.
- [23] GARMENDIA A. ET AL. (2005) *Evaluación de impacto ambiental*. Pearson Educación, España.
- [24] GERALDI, A. (2011). *Determinación de cargas de nitrógeno y fósforo en cuencas hidrográficas pampeanas*. Universidad Nacional del Sur. Argentina.
- [25] GOBIERNO DE HIDALGO. (2016). *Plan estatal de desarrollo, 2018-2022*. Gobierno de Hidalgo. México.
- [26] GOBIERNO DE HIDALGO. (2013). *Segundo informe de gobierno. Acatlán, Hidalgo. Administración 2012-2016*. Gobierno del estado de Hidalgo, Ayuntamiento de Acatlán. México.
- [27] GÓMEZ, A. ET AL. (2007). *Alternativas a la problemática ocasionada por lactosueros en el Valle de Tulancingo, Hidalgo*. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- [28] GONZÁLEZ, N. (2018). *Se deslindan pescadores de quema de tule en laguna*. Criterio Hidalgo. México. [En línea] <<https://www.criteriohidalgo.com/regiones/tulancingo/se-deslindan-pescadores-de-quema-de-tule-en-laguna>> [Consultado 7 enero 2019].
- [29] GROBEC. (2009). *Étude d'impact sur l'environnement. Restauration du seuil naturel du Lac Joseph. Municipalité d'Inverness*. Groupe de concertation du bassin de la rivière Bécancour. Canadá.
- [30] HARPER, D. (1992). *Eutrophication of freshwater*. Universidad de Leicester, Inglaterra.
- [31] HÉBERT. (1996). *Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau pour les rivières du Québec*. Ministerio del ambiente y la fauna de Quebec. Canadá.

- [32] INEGI. (Sin fecha). *Indicadores del cauce principal-Referencia teórica-cálculo del gasto o caudal*. Departamento de estructuración de información Geoespacial. INEGI. México. [En línea] <http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/CalculoGasto.pdf> [Consultado marzo 2017].
- [33] INEGI. (2012). *Información por entidad, Hidalgo, agua*. Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México. [En línea] <<https://goo.gl/28BF4y>> [Consultado 8 noviembre 2016].
- [34] INEGI. (2017). *INEGI-Productos-Cartas topográficas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. [En línea] <<https://goo.gl/7ie5Bm>> [Consultado marzo 2017].
- [35] INEGI. (2017b). *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas*. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. México. [En línea] <http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#> [Consultado marzo 2017].
- [36] INEGI. (2017c). *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas-Análisis del área de escurrimiento-metodología*. SIATL, INEGI. México. [En línea] <http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#app=86ae&4b36-selectedIndex=0&4033-selectedIndex=0&6fa8-selectedIndex=0&3e7e-selectedIndex=2> [Consultado marzo 2017].
- [37] Islas, E. (2011). *Resultados del estudio de diagnóstico sectorial en el estado de Hidalgo, 2010*. SAGARPA. México.
- [38] IZCAPA, C. (2011). *Lineamientos generales para la evaluación de sitios contaminados y propuesta de acciones para su restauración*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). México. [En línea] <<http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/blog/notas/item/164-conoce-los-5-lagos-mas-grandes-de-mexico>> [Consultado 5 diciembre 2016].
- [39] MACWAN, R. (2016). *Whey and its utilization*. Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci. 5(8): 134-155. India.
- [40] MARÍN, B. (2003). *MANUAL DE TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y CONTAMINANTES MARINOS*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Colombia.

- [41] MAZZEO, N. ET AL. *Eutrofización: causas, consecuencias y manejo*. Departamento de ecología y rehabilitación de ecosistemas acuáticos someros, Facultad de ciencias, UNAM. México.
- [42] MORALES, C. (2015). *Saneamiento de la laguna de Zupitlán y su adecuación como centro de recreo*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [43] MORENO, D. (2010). *Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia*. Revista ContactoS 78. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- [44] PARLAMENTO EUROPEO Y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. (2006). *Directive 2006/7/EC of the European Parliament and the Council of 15 February 2006 concerning the management of bathing water quality and repealing directive 76/160/EEC*. Official Journal of the European Union.
- [45] PATIL, S. (2013). *Excessive use of fertilizers and plant protection chemicals in paddy and its economic impact in Tungabhadra Project Command area of Karnataka, India*. Eco. Env. and Cons. 20(01). India
- [46] PEMEX. (2014). *Diagnósticos municipales PACMA. Entidad: Hidalgo (13)*. Programa de Apoyo a la Comunidad y Medio Ambiente. PEMEX, México.
- [47] PEÑA-CABRIALES, J. (2001). *Manejo de fertilizantes nitrogenados en México: Uso de las técnicas isotópicas*. Laboratorio de microbiología ambiental, CINVESTAV. México.
- [48] PIGEONUTT, V. (2015, abril) *Semana Santa deja derrama de 789 mdp en Acapulco*. El Universal, México. [En línea] <<http://archivo.eluniversal.com.mx/estados/2015/deja-semana-santa-derrama-economica-de-789-millones-de-pesos-en-acapulco-1090343.html>>[Consultado 3 octubre 2016].
- [49] RINCÓN, Z. (2009). *Riesgo de contaminar el agua del lago de Pátzcuaro con plomo por resuspensión de sedimentos*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [50] ROBLES, J. (2010). *Aplicación de un sistema de aireación en la laguna de Bojórquez, Cancún, México*. Ingeniería hidráulica y ambiental, VOL. XXXI, No. 3. IMTA.

- [51] RYDING, S. (1989). *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*. UNESCO, París.
- [52] SÁNCHEZ MARTÍNEZ, V. (2014). *Regiones geoculturales y biodiversidad*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. [En línea] <<https://goo.gl/ncS5Kd>> [Consultado 8 noviembre 2016].
- [53] SÁNCHEZ, R. (2016). *Agua embotellada: Identificación de impactos ambientales*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [54] SARH. (1980, modificada en 1992) *NORMA MEXICANA NMX-AA-14-1980*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México.
- [55] SECTUR. (2015). *Resultado de la actividad hotelera, diciembre 2015*. Secretaría de Turismo, México.
- [56] SEMARNAT. (2005). *MIA-Regional*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- [57] SEMARNAT. (2010). *Compendio de estadísticas ambientales 2010*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. [En línea] <http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html> [Consultado marzo 2017]
- [58] SSA. (1993). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-035-SSA1-1993, BIENES Y SERVICIOS. QUESOS DE SUERO. ESPECIFICACIONES SANITARIAS*. Secretaría de Salud. México.
- [59] STC. (2016). *Oferta Turística y Compendio Estadístico por Periodo Vacacional y su acumulado en cifra total 2015*. Secretaría de Turismo y Comunicación de Hidalgo, México.
- [60] TALLING, J. (2010). *pH, the CO₂ system and freshwater science*. Freshwater Reviews, Freshwater biological Association. Inglaterra.
- [61] TCRQ. (2015). *La qualité de l'eau- Fiche 1-05*. Table de Concertation Régionale. Zone de Québec. Canadá.
- [62] TIRKEY, P; BHATTACHARYA, T Y CHAKRABORTY, S. (2015). *Water quality indices-important tools for water quality assesment: a review*. International Journal of advances in chemistry. Vol. 1 (1). India.

- [63] TORRES, B. (1999). *Definición del suero de queso tipo Oaxaca en la región de Tulancingo y establecimiento del proceso óptimo para la obtención de proteínas*. Tesis de licenciatura. Universidad nacional Autónoma de México.
- [64] UNAD. (2016). *Implementación de planes de manejo ambiental. Lección 8: Identificación y delimitación del área de influencia directa e indirecta*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. México. [En línea] <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358023/Material_en_linea/leccin_8_identificacin_y_delimitacin_del_rea_de_influencia_directa_e_indirecta.html> [Consultado 28 noviembre 2016].
- [65] VALENCIA, E. (2009). *La industria de la leche y la contaminación del agua*. Universidad Autónoma de Puebla, México.
- [66] VÁZQUEZ, A. ET AL. (2015). *Evaluación de la calidad del agua mediante técnicas de percepción remota*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería, México.