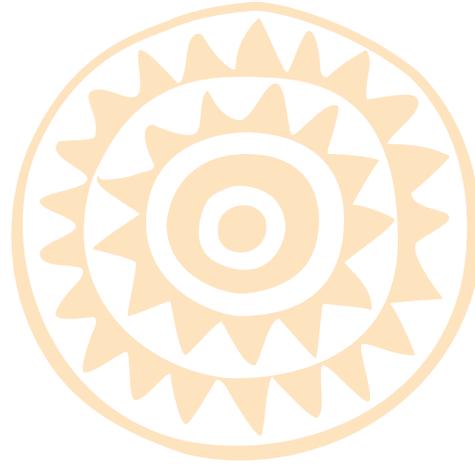


CALIDAD  
DEL AGUA  
EN LA PRESA DE AGUAMILPA,  
NAYARIT, MÉXICO.



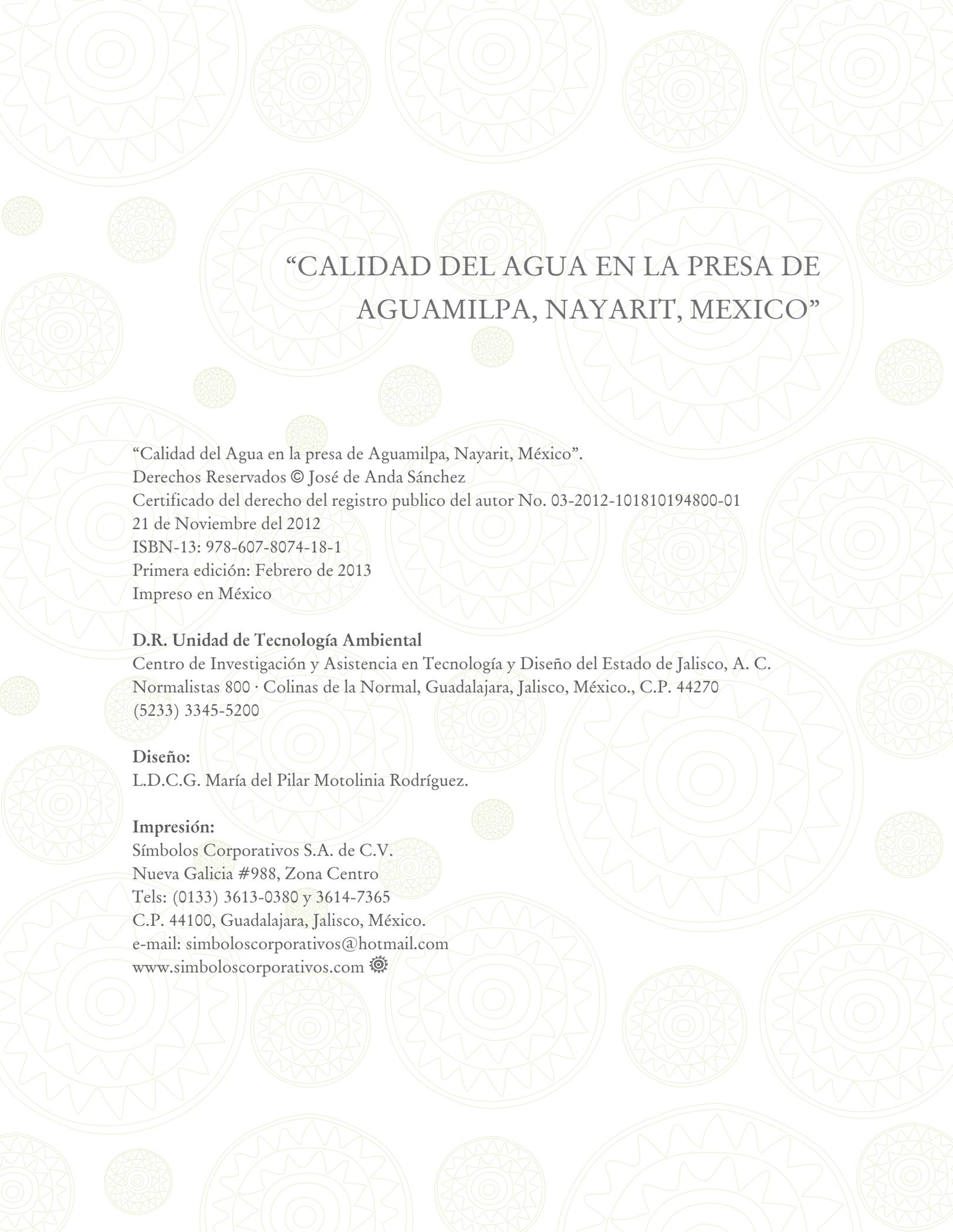
EDITORES:  
JOSÉ DE ANDA SÁNCHEZ Y FERNANDO A. GONZÁLEZ FARIAS

Ta  
tata matü ta tei  
aramara tukari memü teu  
netüa, ta matsima memu waru  
rey aramara memati nerüa tsie  
yu kie meku yarrirrüanike metatsi  
üwiyatü iku urrayari me nütü meta  
nuiwari inüariyari.

*Nuestro dios sol y nuestra diosa el agua, dadores de  
la vida, vieron a los hermanos venados salir del  
mar para quedarse entre nosotros y guiarnos.*

*Cinco son los colores del maíz y cinco  
los dias que tardó el mundo en  
crearse.*





# “CALIDAD DEL AGUA EN LA PRESA DE AGUAMILPA, NAYARIT, MEXICO”

“Calidad del Agua en la presa de Aguamilpa, Nayarit, México”.

Derechos Reservados © José de Anda Sánchez

Certificado del derecho del registro publico del autor No. 03-2012-101810194800-01

21 de Noviembre del 2012

ISBN-13: 978-607-8074-18-1

Primera edición: Febrero de 2013

Impreso en México

## **D.R. Unidad de Tecnología Ambiental**

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C.

Normalistas 800 · Colinas de la Normal, Guadalajara, Jalisco, México., C.P. 44270

(5233) 3345-5200

## **Diseño:**

L.D.C.G. María del Pilar Motolinía Rodríguez.

## **Impresión:**

Símbolos Corporativos S.A. de C.V.

Nueva Galicia #988, Zona Centro

Tels: (0133) 3613-0380 y 3614-7365

C.P. 44100, Guadalajara, Jalisco, México.

e-mail: [simboloscorporativos@hotmail.com](mailto:simboloscorporativos@hotmail.com)

[www.simboloscorporativos.com](http://www.simboloscorporativos.com) 

# CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	13
PREFACIO .....	17
CAPÍTULO I	
Introducción .....	27
1. Los impactos ambientales de las grandes presas .....	29
2. Disponibilidad de agua en México.....	32
3. Situación de las presas en México .....	33
Referencias .....	39
CAPÍTULO II	
Las presas en el río Santiago.....	43
1. Los acueductos y presas para abastecimiento de agua para Guadalajara .....	46
2. La presa de Arcediano .....	48
3. La presa Santa Rosa .....	49
4. La presa La Yesca.....	51
5. La presa El Cajón .....	53
6. La presa de Aguamilpa .....	55
7. La presa San Rafael .....	58
Referencias .....	59
CAPÍTULO III	
Características fisiográficas de la cuenca del río Santiago .....	63
1. Localización de la cuenca .....	66
2. Hidrología superficial.....	69
3. Aguas subterráneas .....	73
4. Acuíferos .....	73
5. Topografía.....	75
6. Geología .....	76
7. Fisiografía.....	83
8. Clima .....	85
9. Uso del suelo y vegetación.....	86
10. Ciclones.....	88
Referencias .....	90

## CAPÍTULO IV

Descripción de la cuenca de la presa de Aguamilpa.....	93
1. Localización geográfica .....	95
2. Hidrología superficial.....	96
3. Topografía.....	98
4. Geología .....	100
5. Fisiografía.....	105
6. Uso de suelo y vegetación.....	107
7. Edafología.....	110
8. Clima .....	111
9. Central Hidroeléctrica Aguamilpa Solidaridad.....	114
10. Características constructivas.....	115
11. Hidrometría .....	122
12. Aspectos ambientales .....	126
Referencias .....	132

## CAPÍTULO V

Balance hidrológico de la presa de Aguamilpa.....	135
1. Introducción .....	137
2. Metodología.....	138
Precipitación directa.....	141
Escurremientos de la cuenca.....	142
Evaporación.....	143
Volumen aforado y descargado.....	144
Tiempo de retención hidráulico.....	145
3. Resultados .....	148
Precipitación directa.....	148
Escurremientos de la cuenca.....	148
Evaporación.....	150
Volumen aforado y descargado.....	151
Modelo de balance hídrico .....	152
4. Conclusiones.....	155
Referencias .....	157

## CAPÍTULO VI

Modelo de escurrimientos para la cuenca Santiago-Aguamilpa.....	161
1. Introducción .....	163
2. Metodología.....	164
3. Resultados .....	169
4. Conclusiones.....	175
Referencias .....	177

## CAPÍTULO VII

Análisis de datos de calidad del agua .....	179
1. Introducción .....	181
2. Metodología .....	182
Monitoreo .....	182
Análisis estadístico .....	182
3. Resultados .....	184
Análisis estadístico de los datos.....	184
Descripción de los resultados .....	190
4. Conclusiones.....	194
Referencias .....	196

## CAPÍTULO VIII

Monitoreo de la calidad del agua .....	199
1. Introducción .....	201
2. Metodología.....	205
3. Resultados .....	209
4. Conclusiones.....	219
Referencias .....	225

## CAPÍTULO IX

Distribución de fitoplancton .....	231
1. Introducción .....	233
2. Metodología.....	234
3. Resultados .....	235
4. Conclusiones.....	246
Referencias .....	248

## CAPÍTULO X

Cianobacterias y contaminación en la presa de Aguamilpa: el caso de <i>Microcystis</i> sp. ....	251
1. Introducción .....	253
2. Distribución potencial de <i>Microcystis</i> sp. en la presa de Aguamilpa, Nayarit. ....	254
3. Metodología.....	256
4. Resultados .....	258
5. Discusión.....	261
6. Presencia de <i>Microcystis</i> sp. en la presa de Aguamilpa, Nayarit .....	266
7. Uso de suelo.....	266
8. Conclusiones.....	268
Referencias .....	269

## CAPÍTULO XI

Metales pesados en los sedimentos .....	275
1. Introducción .....	277
2. Materiales y métodos.....	278
Área de estudio .....	278
Muestreo y análisis .....	280
Resultados y discusión .....	283
3. Conclusiones.....	292
Referencias .....	293

## CAPÍTULO XII

Modelación de la calidad del agua.....	297
1. Introducción .....	299
2. Metodología .....	300
Selección del modelo .....	300
Desarrollo del modelo batimétrico.....	302
Desarrollo del modelo de balance hídrico.....	303
Desarrollo del modelo de calidad de agua.....	304
3. Resultados .....	306
Modelo batimétrico de la presa de Aguamilpa.....	306
Calibración del modelo de balance hídrico .....	307
Hidrodinámica de la presa.....	308
Oxígeno disuelto .....	312
4. Conclusiones.....	314
Referencias .....	315

## CAPÍTULO XIII

Resumen y Conclusiones .....	319
1. Cantidad de agua.....	322
2. Calidad del agua .....	322
3. Modelación de la calidad del agua.....	324

# LISTA DE EDITORES, AUTORES Y REVISORES

(en orden alfabético)

## *Editores*

- José de Anda Sánchez  
Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C.  
Normalistas 800, Colinas de la Normal, Guadalajara, Jalisco, México., Tel: (+5233) 3345-5200  
E-mail: janda@ciatej.net.mx
- Fernando A. González Farías  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.  
Tel: (+5255) 5622-5802,  
E-mail: gfarías@unam.mx

## *Autores*

- José de Anda Sánchez
- Dana Elizabeth Erickson  
Peace Corps Volunteer
- Fernando Antonio González Farías
- José Luis Ibarra Montoya  
Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología México.  
E-mail: jibarra@ecologia.unam.mx
- Yazmín Jarquín Javier  
Unidad de Tecnología Ambiental, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C., Normalistas 800, Colinas de la Normal, Guadalajara, Jalisco, México.  
Tel: (+5233) 3345-5200,  
E-mail: yjarquin@ciatej.net.mx
- E. James Nelson  
Environmental Modeling Research Laboratory, Brigham Young University, 242K Clyde Building, Provo, Utah, U.S.A. Tel: (+001 801) 422-7632,  
E-mail: jimn@byu.edu
- Michael Rode  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH. Brückstrasse 3a, Magdeburg, Germany 39114

# LISTA DE EDITORES, AUTORES Y REVISORES

(en orden alfabético)

Oliver Obregón Bracho	Graduate studies in Civil and Environmental Engineering Young University, Provo. Utah, U.S.A., E-mail: jimn@byu.edu
Mario Alberto Ortíz Jiménez	Universidad Autónoma de Nayarit.
Jesús Gabriel Rangel Peraza	Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México. E-mail: jgrp2000@hotmail.com
Eduardo Santillán Gutierrez	Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, E-mail: eddy_sancol@yahoo.com.mx
Harvey Shear	Department of Geography and Planning, University of Toronto, Mississauga, Canada., Tel: (+001 905) 569-4382, E-mail: harvey.shear@utoronto.ca
María Eugenia Zamudio Resendiz	Departamento de Hidrobiología, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México, E-mail: mem@xanum.uam.mx

## *Revisores*

Harvey Shear	Department of Geography and Planning, University of Toronto, Mississauga, Canada, Tel: (+001 905) 569-4382, E-mail: harvey.shear@utoronto.ca 
--------------	--

The background of the page is a repeating pattern of green mandala designs. These designs are circular and feature concentric rings of geometric shapes, including triangles, squares, and circles, creating a complex, symmetrical pattern. The colors are various shades of green, from light to dark. The word "AGRADECIMIENTOS" is centered in the middle of the page in a black, serif font.

# AGRADECIMIENTOS



## Agradecimientos

Este libro se llevó a cabo gracias al apoyo recibido de los fondos de Ciencia Básica de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. El proyecto que dio origen a esta obra se titula “Desarrollo de un modelo de calidad del agua para la presa de Aguamilpa, Nayarit” con la clave de registro CB-CONACYT 2006-58119.

Gracias al esfuerzo de estudiantes, técnicos, científicos de diversas disciplinas y habitantes de la comunidad aledaña a la presa de Aguamilpa, se logró realizar esta obra, que en su desarrollo buscó no solamente poner en relevancia los hallazgos científicos, sino igualmente dejar una muestra fotográfica del entorno natural en el cual se desarrollaron los trabajos de investigación.

La importancia de esta obra radica en que es un primer esfuerzo en generar un modelo de calidad del agua en uno de los embalses tropicales más grandes de México y de los más destacados en su magnitud a nivel mundial: la Presa Hidroeléctrica de Aguamilpa.

Gracias al apoyo técnico del M.C. Juan Gallardo Valdez, a los conocimientos y dedicación de la M.C. Dana Elizabeth Erickson voluntaria de Peace Corps y a la gran disponibilidad y capacidad para aprender y profundizar en los diversos temas de los estudiantes de posgrado Jesús Gabriel Rangel Peraza, Eduardo Santillán Gutierrez y José Luis Ibarra Montoya, se logró obtener una gran cantidad de datos de campo y de laboratorio.

El invaluable apoyo en la gestión de información oficial de la M.C. Yazmín Jarquín con las dependencias de gobierno y gracias a su experiencia en el manejo de los Sistemas de Información Geográfica, fue posible digitalizar y procesar la innumerable cantidad de datos obtenidos en campo y las proporcionadas por las dependencias oficiales. Igualmente, se generaron valiosos mapas geográficos digitales que facilitaron la interpretación de los datos de campo y la generación de los modelos de simulación del comportamiento hidrológico y de calidad del agua de este complejo sistema.



Por otra parte la orientación en los métodos aplicados para el análisis estadístico de los datos de campo y los obtenidos de las dependencias oficiales se debió al Dr. Mario Alberto Ortiz Jiménez de la Universidad Autónoma de Nayarit.

El gran apoyo obtenido por el Prof. Jim Nelson del Laboratorio de Investigación en Modelación Ambiental de la Universidad de Brigham Young localizada en Provo, Utah, Estados Unidos de Norteamérica, y de su equipo de trabajo entre los que destacan el estudiante de posgrado Oliver Obregón Bracho, hizo posible la construcción del modelo de calidad del agua y de esta forma simular e interpretar el comportamiento de las distintas variables observadas y medidas en el sistema de Aguamilpa. Al Prof. Harvey Shear del Departamento de Geografía de la Universidad de Toronto en Mississauga, Canadá, por haber dedicado una parte importante de su tiempo en la revisión de este documento y haber contribuido en el prefacio y los dos primeros capítulos de esta obra que dieron la pauta sobre el rumbo que tomaría el contenido de la misma.

Asimismo, agradecemos profundamente el apoyo del Prof. Dr. Michael Rode del Centro Helmholtz para la Investigación del Medio Ambiente con sedes en Leipzig y en Magdeburg, Alemania, por la asesoría brindada a Jesús Gabriel Rangel Peraza en el proceso de calibración y simulación del modelo de calidad del agua.

Cabe señalar igualmente la contribución en las imágenes fotográficas del Ing. Francisco Javier Pérez Martínez, del Dr. Fernando Antonio González Farias y de la Ing. María Cristina Ireta Moreno que gracias a sus cualidades como fotógrafos se han logrado las imágenes que nuestros lectores podrán disfrutar a lo largo de esta obra.

Finalmente, agradecemos la confianza y apoyo recibidos de las distintas dependencias oficiales como la Comisión Federal de Electricidad, la Comisión Nacional del Agua, Instituto Nacional de Geografía y Estadística, la Secretaría de Marina, Comisión Nacional Forestal, el Instituto de Geografía de la UNAM y de la cooperativa de pescadores de Aguamilpa, quienes con sus experiencia en el conocimiento del embalse facilitaron las labores de trabajo de campo que contribuyeron para que hoy en día podamos hacer llegar a sus manos este documento, que seguramente servirá de apoyo para futuros trabajos relacionados con el estudio del comportamiento limnológico de embalses y lagos profundos en latitudes tropicales.☀





# PREFACIO

Harvey Shear



## PREFACIO

*Harvey Shear*

“Agua, agua por doquier, y todos los cascos de los barcos se encogieron;  
Agua, agua por doquier, y ninguna gota para beber.”  
Rima del antiguo marino – S. T. Coleridge, 1798

La mayor parte de nuestro planeta (también llamado Planeta Azul) es agua. Alrededor del 70% de la superficie de la tierra está cubierta por agua, sin embargo, como lo ilustra el famoso poema inglés, la mayor parte de esta agua no es apta para el consumo humano. Aproximadamente el 97.5% del agua del mundo es salada y solamente el 2.5% es agua dulce. De esta pequeña cantidad, apenas el 0.4% es accesible a los seres humanos (lagos y ríos).

El agua es esencial para la vida. La vida sobre la Tierra se originó en el agua. Alrededor del 70% del cuerpo humano está compuesto por agua. Más de la mitad de las especies de plantas y animales del planeta viven en el agua. El cuerpo humano requiere de al menos 2 litros de agua por día en climas fríos y aún más en climas cálidos. Los seres humanos pueden vivir sin alimento por varios días o incluso semanas, pero apenas pueden sobrevivir algunos días sin agua. La mayoría de nuestros alimentos se componen de agua.

Los humanos han represado agua desde que estos se hicieron sedentarios debido al dominio de la agricultura. Esto fue esencial en las regiones áridas a fin de asegurar un suministro constante de agua para los cultivos y para el uso doméstico. Desde principios del siglo XX, los embalses y presas han proporcionado agua para la agricultura, pero igualmente para la generación de electricidad. En los últimos 110 años, la construcción de presas (y embalses) se ha incrementado de manera dramática.

Esto lo podemos observar si medimos la cantidad de agua que se pierde por evaporación en los embalses. A nivel global la evaporación se incrementó de 10 km<sup>3</sup> por año en 1900 a 270 km<sup>3</sup> por año en el 2010. Para el año 2010 el uso de agua para la agricultura por mucho sobrepasaba las cantidades utilizadas para consumo

doméstico o industrial, la cual alcanzó los 2,600 km<sup>3</sup>/año en comparación a los 175 km<sup>3</sup>/año para el año 2000. Además el uso que hacemos del agua es ineficiente toda vez que 800 km<sup>3</sup>/año del agua que se usa en la agricultura, se pierde debido a la evaporación o por la ineficiente aplicación del riego. Adicional al problema de uso ineficiente del agua se añade el problema de la contaminación, los usuarios contaminamos el agua con bacterias, metales pesados, nutrientes, y compuestos orgánicos industriales. Esta contaminación puede conducir directamente a problemas de salud humana (infecciones gastrointestinales, ceguera, entre otros) e indirectamente a través de la contaminación de los peces y la vida silvestre. Desde una perspectiva ecológica, el agua almacenada puede conducir a la fragmentación del hábitat tanto para especies acuáticas como terrestres, así como cambios en la temperatura del agua lo cual conduce a cambios en la composición de las especies y la conversión de mercurio inorgánico en metilmercurio (una forma que es biológicamente acumulable en los organismos).

Se estima que en México se utilizan diariamente 234.9 km<sup>3</sup> de agua dulce de los cuales 158.9 km<sup>3</sup> se usan para la generación de electricidad (67.6%) y 76.5 km<sup>3</sup> (32.4%) para usos consuntivos tales como la agricultura, suministro doméstico e industrial. Desafortunadamente alrededor del 56% del agua que se utiliza en la agricultura, se pierde debido a malas prácticas de riego y a la baja aplicación de tecnología agrícola; y el 44% del agua que se suministra a la población para usos domésticos, se pierde debido a la falta de mantenimiento de la infraestructura hidráulica. Adicionalmente, la población de México continúa creciendo y la disponibilidad media de agua se ha reducido dramáticamente del año 1950 al 2010 (de 17,700 a 3,990 m<sup>3</sup>/persona/año). Esta situación ha generado una condición de presión hídrica sobre el recurso disponible, particularmente sobre las fuentes de agua subterránea en la parte occidental, central y en el norte de México. Una solución que mitigaría parte de la presión hídrica es reduciendo la demanda mejorando las medidas de conservación y reduciendo el desperdicio de agua.

Desde el siglo XIX el gobierno mexicano ha ido solventando estas carencias de agua construyendo presas a fin de proveer agua y energía renovable a los ciudadanos. Debido a que la topografía de México es muy conveniente para la construcción de presas; hoy en día existen 4,000 presas de las cuales 667 están clasificadas como grandes presas de acuerdo con la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD por sus siglas en inglés). Como se había mencionado

estas presas utilizan 158.9 km<sup>3</sup> de agua para la generación de energía eléctrica (más del 12% de la energía producida en México) y almacenan el agua para la irrigación de 6.3 millones de hectáreas de tierra agrícola.

Debido a que las fuentes accesibles de combustibles fósiles se han ido haciendo cada vez más escasas y se han incrementado los costos de las mismas, México tendrá que confiar en fuentes alternas de energía para la generación de electricidad tales como la construcción de centrales hidroeléctricas, dado que la generación de electricidad a través de la energía solar o eólica, las tecnologías de celdas de hidrógeno y biocombustibles, aún no se han desarrollado lo suficiente o no se han comercializado para proveer de electricidad de acuerdo con las necesidades de la población de México.

A la fecha la mayoría de los trabajos relacionados con los aspectos de cantidad y calidad del agua en México se han enfocado al lago de Chapala y a otros lagos naturales. Este libro sobre la presa de Aguamilpa y su embalse es el resultado de varios años de estudio de científicos especialistas en balance hídrico en embalses, hidrología superficial, calidad del agua y desarrollo de modelos. Este trabajo es sumamente valioso en el sentido de que éste representa uno de los primeros esfuerzos en la determinación de los aspectos relacionados con la cantidad y calidad del agua en un embalse artificial localizado en latitudes tropicales. Al entender cómo funciona esta presa y su embalse podrá ayudar a ampliar otros usos tales como el suministro de agua para la población o el fomento de las actividades recreativas.

Una de las características más importantes de este libro es que incluye la modelación de sistemas complejos. El libro podrá servir como guía para futuras investigaciones en otras presas y embalses tropicales en México y alrededor del mundo. Con la introducción de las herramientas de modelado, se puede desarrollar un sistema de soporte para la toma de decisiones lo cual ayudaría a los administradores del recurso a tomar las mejores decisiones relacionadas con la administración de los recursos hídricos. ☀



## PREFACE

*H. Shear*

*“Water, water, everywhere, and all the boards did shrink;  
Water, water, everywhere, nor any drop to drink.”  
The Rime of the Ancient Mariner - S.T. Coleridge, 1798*

*Most of our planet (often called the Blue Planet) is water. About 70% of the surface of the Earth is covered in water, yet, as the lines from this famous English poem illustrate, most of the water is unsuitable for human use. Roughly 97.5% of the World’s water is saline, and only 2.5% is freshwater. Of that small quantity, only 0.4% is accessible (lakes, rivers) to humans.*

*Water is essential for life. Life on Earth originated in water. About 70% of the human body is water. More than half of the world’s animal and plant species live in water. The human body needs at least 2 litres of water a day in cooler climates and much more in hotter climates.*

*Humans can live for days or weeks without food, but can last only a few days without water. Most of our food consists of water. Humans have been impounding water since the dawn of human settlement and agriculture. This was essential in drier areas to ensure a constant supply of water for crops and for domestic use. Since the beginning of the 20th century, dams and reservoirs have provided water for agriculture, but also for the generation of electricity. In the past 110 years, construction of dams (and reservoirs) has increased dramatically.*

*We can see this if we look at the amount of water lost to evaporation from reservoirs. Global evaporation rose from 10 km<sup>3</sup>/year in 1900 to 270 km<sup>3</sup>/year in 2010. Agricultural use of water far outweighs domestic/industrial use - 2600 km<sup>3</sup>/year compared to 175 km<sup>3</sup>/year in 2000. Furthermore, human use of water is inefficient- 800 km<sup>3</sup>/year in 2000 were wasted in the agricultural sector, largely through inefficient application of water and evaporation from fields.*

*In addition to inefficient use of water, humans pollute water with bacteria, heavy metals, nutrients, and industrial organic chemicals. This pollution can lead directly to human health problems (gastrointestinal infections; blindness, among others) and indirectly through contamination of fish and wildlife.*



*From an ecological perspective, impounding water can lead to habitat fragmentation for both aquatic and terrestrial species, changes in water temperature leading to changes in species composition and conversion of inorganic mercury to methyl mercury (a form easily biologically accumulated).*

*In Mexico, there are estimated to be 234.9 km<sup>3</sup> of freshwater used per year of which 158.9 km<sup>3</sup> are used for electricity generation (67.6%) and 76.5 km<sup>3</sup> (32.4%) for consumptive uses such as agriculture, domestic supply and for industry. Unfortunately about 56% of the water used in agriculture is wasted through poor irrigation practices and low technology in the agricultural sector and 44% of water supplied for domestic use is lost through poorly maintained infrastructure.*

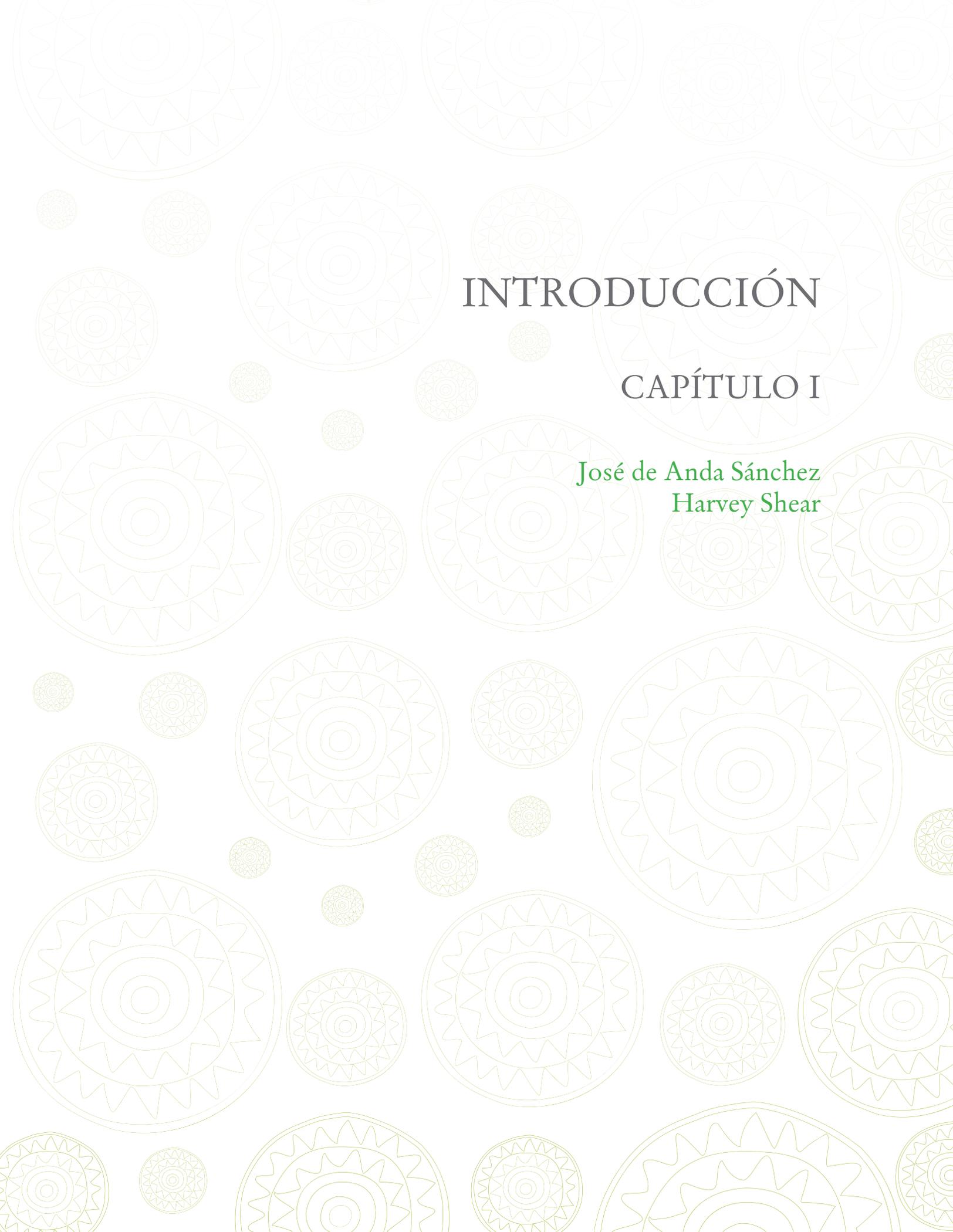
*In addition, the population of Mexico is growing and the average water availability per capita has declined dramatically from 1950 to 2010 (17,700 to 3,990 m<sup>3</sup>/person/year). This has put significant stress on the available water resources, particularly groundwater, in the western, central and northern areas of Mexico. One solution to relieving some of this stress is to reduce the demand by improving water conservation and reducing waste.*

*The Mexican government, since the 1800s, has responded to this lack of water by constructing dams to provide water and renewable energy to its citizens. The topography of Mexico is well suited to the construction of dams; there are some 4,000 dams of which 667 are classified as large dams according to the International Commission on Large Dams (ICOLD). As noted, these dams provide 158.9 km<sup>3</sup> of water for power generation (>12% of the total power generated in Mexico) and irrigation of 6.3 million hectares of agricultural land. As readily accessible sources of fossil fuels become more scarce and expensive, Mexico will have to rely on alternative sources of power generation such as hydropower, since solar and wind power, hydrogen cells and biofuels technology have not been well enough developed or commercialized to provide sufficient electricity for Mexico's population needs.*

*Most work on water quality/quantity issues in Mexico to date have focussed on Lake Chapala and some of the other natural lakes. This book on the Aguamilpa Dam and Reservoir is the result of several years' study by many scientists on the hydrologic balance in the reservoir, runoff hydrology, water quality and development of models.*

*This work is extremely valuable in that it represents one of the first efforts at determining water quality and quantity issues in an artificial reservoir located in tropical latitudes. Understanding how this dam and its reservoir function will aid in developing other uses for the water including domestic supplies and recreation. One of the most important features of this book is the modelling of a very complex system. The book should serve as a guide for further research in other tropical dams and reservoirs in Mexico and around the World. With the introduction of modelling tools, one can develop a decision support system that should aid resource managers in taking the best decisions relating to management of water resources. ☀*





# INTRODUCCIÓN

## CAPÍTULO I

José de Anda Sánchez  
Harvey Shear



**E**n la última década del siglo XX se extraían anualmente alrededor de 3,800 km<sup>3</sup> de agua dulce de los lagos, ríos y acuíferos del mundo. Esto representa el doble del volumen extraído hace apenas cincuenta años (WCD, 2000).



El incremento de la población, el creciente desarrollo económico, el cambio en las tecnologías, la distribución del ingreso y la modificación en los estilos de vida han afectado el nivel de la demanda de agua a escala mundial (WCD, 2000).

Durante el siglo XX se invirtieron alrededor de 2 trillones de dólares en la construcción de 45,000 grandes presas a nivel global (Khagram, 2003). La construcción de las grandes presas – definidas como aquellas que tienen una altura de cortina mayor a 15 m – se ha incrementado de manera significativa en los últimos cincuenta años (WCD, 2000). La altura de las presas construidas entre 1940 y 1990 alcanzó un promedio de 30 a 34 m y durante los años 1990s rebasaron los 45 m debido a las tendencias de construcción de presas, principalmente en Asia.

El área promedio de las presas creció de manera constante hasta alcanzar los 50 km<sup>2</sup> en el periodo comprendido entre 1945 y 1970, declinando a 17 km<sup>2</sup> en los años 1980s para posteriormente incrementarse a 23 km<sup>2</sup> durante los años 1990s (WCD, 2000).

## *1. Los impactos ambientales de las grandes presas*

La primera consecuencia de la construcción de las presas es la fragmentación de los ríos. La fragmentación en este contexto se define como la interrupción del curso natural de un río por una presa, trasvase entre cuencas o extracción de agua. La fragmentación es un indicador del grado en el cual los ríos han sido modificados de su curso natural debido a las actividades humanas (WRI, 2000). Muchas áreas del mundo hoy en día se encuentran de manera moderada o fuertemente alteradas debido a los efectos de la fragmentación de los ríos (Revenge *et al.*, 2000).



Obra de construcción de la presa La Yesca.

La construcción de una presa y la subsecuente inundación del área del embalse efectivamente destruye la vegetación, modificando drásticamente el hábitat de las especies de animales e induce su desplazamiento o muerte. Debido a que para varias especies su hábitat natural se encuentra en la parte baja de los valles; los grandes embalses pueden llegar a destruir el hábitat de especies endémicas amenazadas incrementando con ello su peligro de extinción (Tabla I.1). Los esfuerzos que hasta hoy en día se han realizado para mitigar los impactos de las grandes presas han tenido poco éxito (Dynesius y Nilson, 1994; WCD, 2000; Anderson *et al.*, 2000; Van Looy 2003; Jager, 2006).

Por otra parte las grandes presas, especialmente aquellas localizadas en climas cálidos, pueden contribuir de manera significativa a la emisión de gases efecto invernadero como resultado de la descomposición anaerobia de la materia orgánica que queda en el fondo del embalse una vez que éste se ha inundado (Khagram, 2003).

Tanto las pequeñas como las grandes presas causan diversos impactos en el ecosistema de los ríos, tales como los cambios en el flujo ecológico, cambios en el régimen térmico, captura de sedimentos, incremento de la evaporación, producción de gases efecto invernadero y degradación de la calidad del agua (McCartney *et al.*, 2000). Con la construcción de las grandes presas, los principales cambios a los sistemas fluviales se manifiestan en la alteración de la forma del curso de los ríos y en la inundación permanente del hábitat de flora y fauna.

Adicionalmente, se incrementa el tiempo de retención hidráulica cambiando de un flujo rápido y continuo de los ríos a uno lento de un embalse, esto causa normalmente una disminución súbita en el número total de especies una vez que se ha construido la presa y se ha formado el embalse. Asimismo, muchas especies pierden su hábitat, el río cambia su régimen de forma permanente, se alteran los corredores naturales de biodiversidad por caminos y tuberías, los ecosistemas terrestres se remplazan por zonas litorales lacustres y se sustituyen por hábitats sublitorales (McCartney *et al.*, 2000). La construcción de presas igualmente descompone las estructuras socioeconómicas de las comunidades humanas debido a la pérdida de los usos de suelo de las áreas inundadas o bien a las modificaciones en el régimen fluvial aguas abajo (Robinson, 2002; PIDHDD, 2006).

TABLA I.1. NÚMERO ESTIMADO DE ESPECIES EN MÉXICO Y EL MUNDO (CONABIO, 1998).						
GRUPO TAXONÓMICO	ESTADO DE JALISCO	ESTADO DE NAYARIT	MÉXICO	MUNDO	ESPECIES ENDÉMICAS EN MÉXICO	ESPECIES AMENAZADAS EN MÉXICO
<b>FAUNA</b>						
Especies marinas			1,738	13,312	>260	
Peces de agua dulce			506	8,411	163	10
Aves	481	407	1,054	9,040	111	30
Anfibios	82	107	290	4,019	174	1
Reptiles	31	79	704	6,492	368	13
Mamíferos	197	97	491	4,154	142	30
Invertebrados	1,093	764				10
<b>PLANTAS</b>						
Fanerógamas	4,878	3,701	9,719	250,000	4,971	56
Pteridofitas			1,100		>190	
Algas y briófitas			4,462		>180	
Hongos			6,000		nd	10



Cortina de la presa de Aguamilpa.

## *2. Disponibilidad de agua en México*

En el año 2005 en México se consumía un total de 234.9 km<sup>3</sup> de agua/año, de los cuales 158.9 km<sup>3</sup> se usaron para la generación de energía eléctrica (67.6%) y 76.5 km<sup>3</sup> para usos consuntivos. De éstos el 76.7% se usaron para la agricultura, el 14.0% para el abastecimiento de agua para las poblaciones y el 9.3% para el aprovisionamiento de agua a la industria autoabastecida (con pozos de agua propios)(CONAGUA, 2007). En el país cerca del 56% del abasto de agua para la agricultura se pierde por malas prácticas de riego agrícola y bajo nivel de tecnificación en los sistemas de riego, y el 44% se pierde a través de las fugas en el sistema de tuberías para el abastecimiento de agua para la población que vive en zonas urbanas (CONAGUA, 2007). Adicionalmente, del 13.9% de agua que se destina para la población, únicamente el 0.35% realmente se destina para el uso doméstico (CONAGUA, 2007), lo cual significa que la mayor parte del agua que llega a las ciudades se utiliza en la industria, comercio y otros servicios públicos.

En general en México se ha experimentado una progresiva reducción en la disponibilidad del agua, particularmente en el centro y norte de país. Las

condiciones climáticas en dos terceras partes del territorio nacional son desde climas cálidos y semiáridos hasta desérticos, con la coyuntura de que la mayor tasa de crecimiento de la población del país se concentra en estas regiones. Ésto ha dado como resultado un uso intensivo de los acuíferos y aguas superficiales lo cual contribuye notablemente a la reducción progresiva de las reservas de agua para cubrir las necesidades de la población (CONAGUA, 2007).

### *3. Situación de las presas en México*

México es un país con tan solo algunos lagos naturales de pequeñas dimensiones. La capacidad de almacenamiento de los principales lagos de México apenas llega a  $10.35 \text{ km}^3$  (CONAGUA, 2007). Es por ello que la construcción de presas se ha convertido en una necesidad para lograr el aprovisionamiento de agua y electricidad para una población en constante crecimiento. La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD por sus siglas en inglés) define como “grandes presas” aquellas con una altura de cortina mayor a los 15 m. Por pequeñas presas se entiende aquellas cuyas cortinas alcanzan una altura entre los 10 y los 15 m y en donde se deben cumplir otros requerimientos tales como un ancho mínimo de 500 m, o más de 1 millón de  $\text{m}^3$  de capacidad de almacenamiento, o más de  $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$  de capacidad de desalojo de agua.

En México existen hoy en día alrededor de 4,000 presas de las cuales 667 se pueden considerar como grandes presas de acuerdo con el criterio de la ICOLD (CONAGUA, 2007). Con esta infraestructura, en el 2005 la capacidad de almacenamiento de agua en el país alcanzó los  $150 \text{ km}^3$ . Es importante resaltar que el 70% de esta capacidad se encuentra en 51 de las grandes presas localizadas principalmente en el sur del país (CONAGUA, 2007).

En México sólo algunas cuencas tienen las condiciones geomorfológicas, geológicas e hidrológicas necesarias para la construcción de grandes presas para la producción de energía eléctrica. La principal razón por la cual se construyen presas en México es para contar con la infraestructura hidráulica necesaria para la producción de energía eléctrica. Asimismo, a lo largo de la red hidrológica nacional se han construido una cantidad importante de pequeñas presas, diques, bordos,

acueductos y canales para el desarrollo de sistema de riego para la agricultura y para el aprovisionamiento de agua para poblaciones rurales y zonas de mayor concentración urbana (CONAGUA, 2005; Cotler y Gutiérrez, 2005).

En el año 2005 México ocupó el lugar número 16 como generador de energía eléctrica a nivel global, produciendo el 1.3% del total de la generación y consumo mundial. El consumo de energía eléctrica en México se ha incrementado notablemente en los últimos años hasta alcanzar arriba del 60% de crecimiento en la pasada década; asimismo el consumo en plantas termoeléctricas de combustibles fósiles se ha incrementado en un 60% a fin de satisfacer la creciente demanda de consumo (Tabla I.2).

<b>TABLA I.2 GENERACIÓN Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO EN BILLONES DE KILOWATTS-HORA, 1990-2005.</b>																
<b>Electricidad</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>
<b>Generación neta</b>	116.57	120.48	123.83	129.36	139.65	144.91	154.48	166.12	172.28	182.53	193.91	198.62	204.15	205.98	212.07	222.40
<b>Hidroeléctrica</b>	23.24	21.64	25.91	25.97	19.85	27.25	31.13	26.17	24.38	32.45	32.80	28.22	24.70	19.68	24.95	27.46
<b>Nuclear</b>	2.79	4.03	3.72	4.68	4.03	8.02	7.48	9.94	8.80	9.50	7.81	8.29	9.26	9.98	8.73	10.27
<b>Geotérmica/ solar/viento/ biomasa</b>	4.87	5.16	5.51	5.58	5.32	5.39	5.45	5.20	5.69	5.86	6.07	5.81	5.62	8.34	8.68	9.45
<b>Térmica convencional</b>	85.67	89.65	88.69	93.12	110.45	104.25	110.42	124.82	133.41	134.71	147.24	156.30	164.57	167.98	169.70	175.23
<b>Consumo neto</b>	100.22	102.85	105.76	109.74	118.23	122.04	130.89	142.81	146.80	155.95	167.27	168.53	173.14	171.79	175.78	183.31
<b>Importaciones</b>	0.59	0.62	0.99	0.85	1.07	1.15	1.32	1.50	1.05	1.05	2.15	0.37	0.56	0.39	0.42	0.47
<b>Exportaciones</b>	1.95	2.12	2.02	1.99	2.01	2.26	1.26	0.02	0.01	0.01	0.08	0.10	0.24	1.07	1.20	1.60

En la última década en México ha habido solamente un moderado incremento en la capacidad de generación de energía eléctrica, sin embargo hoy en día están en planeación o en construcción una cantidad importante de obras de infraestructura para satisfacer la demanda futura del país. En el año 2003, el 75% de la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica procedía de plantas termoeléctricas basadas en el uso de combustibles fósiles, pero muchas de éstas ahora se encuentran en etapa de reconversión a fin de usar gas natural y con ello reducir las emisiones de bióxido de carbono (SENER, 2003). Seguido en capacidad de generación de energía eléctrica están las centrales hidroeléctricas, las cuales producían el 20% del consumo nacional en el año 2003.



Transformadores eléctricos de la central hidroeléctrica de Aguamilpa.





Un resumen histórico en la capacidad de generación de energía eléctrica se muestra en la Tabla I.3 (EIA, 2007). El futuro, sin embargo, parece que puede modificar drásticamente las tendencias tecnológicas para la generación de energía eléctrica, ya que la presión en el precio global de los hidrocarburos se ha incrementado de manera considerable, debido fundamentalmente a la disminución de las reservas de petróleo crudo a nivel global y a los conflictos políticos en los países productores de hidrocarburos.

TABLA I.3 CAPACIDAD INSTALADA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO EN MILLONES DE KILOWATTS, 1990-2005																
FUENTE DE GENERACIÓN	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Hidroeléctrica	7.760	7.880	7.993	8.068	8.171	9.121	9.329	10.034	10.034	9.703	9.633	9.634	9.636	9.628	9.643	10.565
Nuclear	0.675	0.675	0.675	0.675	0.675	1.308	1.309	1.309	1.309	1.309	1.368	1.365	1.365	1.365	1.365	1.365
Geotérmica/solar/viento/biomasa	0.700	0.700	0.720	0.730	0.740	0.764	0.764	0.756	0.763	0.765	0.766	0.871	0.856	0.862	0.979	0.979
Térmica convencional	18.872	19.012	20.682	20.975	22.427	23.909	24.457	25.516	26.019	26.677	27.230	28.648	31.680	33.956	37.559	38.954
Capacidad total	28.007	28.267	30.070	30.448	32.013	35.102	35.859	37.615	38.125	38.454	38.997	40.518	43.537	45.811	49.546	51.863

Esta situación afecta igualmente a México como uno de los países productores de petróleo crudo (ASPO, 2006). Por otra parte las reservas en otros combustibles en México como el uranio, no garantizan que pueda ser viable su aplicación para satisfacer demandas futuras dada su costosa inversión para su explotación y purificación (Medina-Ross *et al.*, 2005; OECD, 2006) y a los importantes riesgos ambientales y de seguridad que conlleva el uso de esta tecnología (Zhang, 2010); debido a ello la expectativa más inmediata es la construcción de plantas hidroeléctricas a fin de lograr los objetivos de producción para los próximos años en el país. ☀

## Referencias

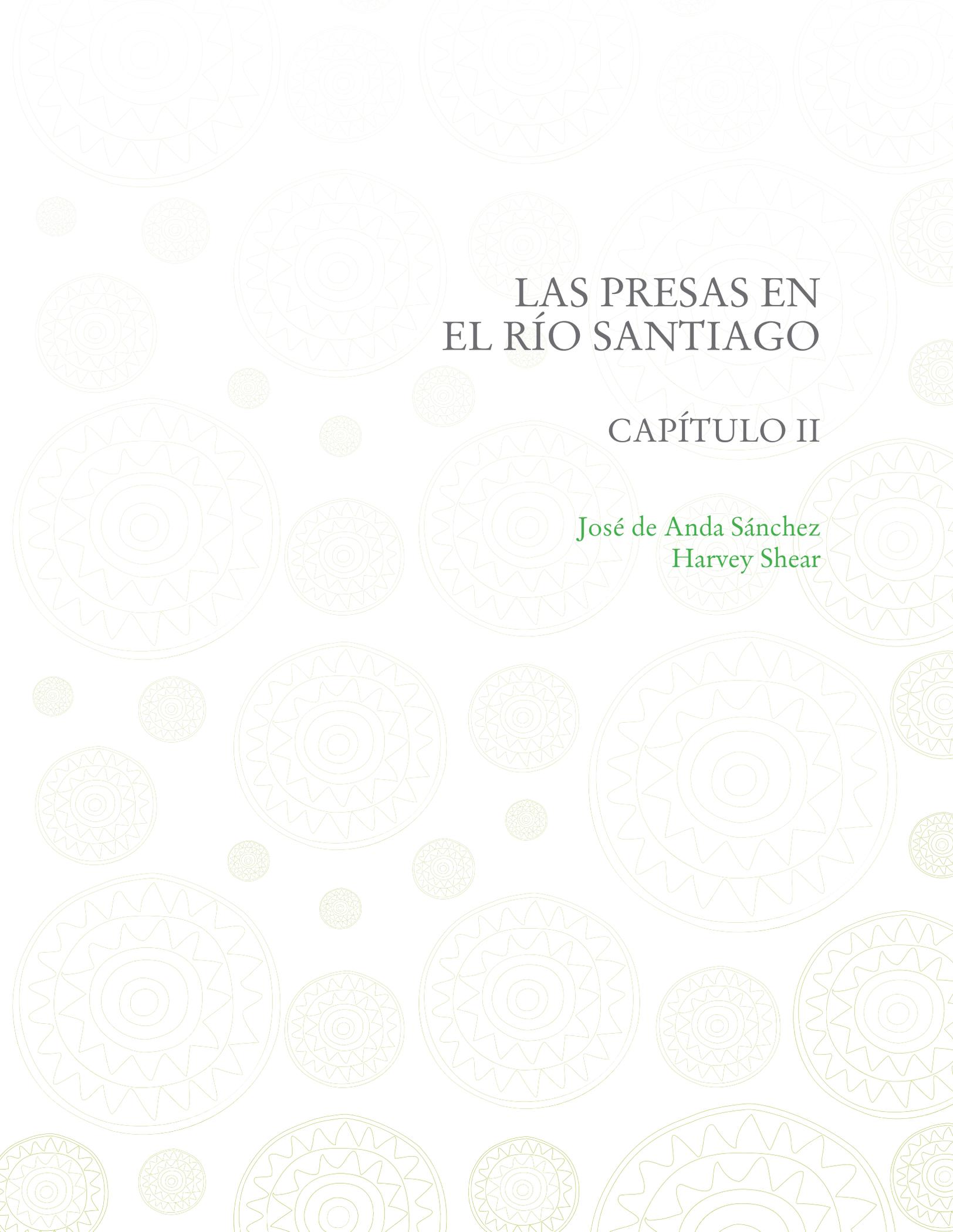
- Andersson E, Nilsson, C, Johansson, ME (2000). Effects of river fragmentation on plant dispersal and riparian flora. *Regulated Rivers: Research and Management*. 16:83-89.
- ASPO (2006). Trend lines peak oil depletion scenarios. Association for the Study of Peak Oil and Gas. Consultado Mayo 30, 2008, en: <http://www.peakoil.ie/newsletters>
- CICCP (1997). Central Hidroeléctrica de Aguamilpa (México), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (España). *Aprovechamientos Hidroeléctricos No 24. Revista de Obras Públicas*. 144(3363): 116-117. Consultado Mayo 30, 2008, en: <http://ropdigital.ciccp.es/>
- CONABIO (1998). *La diversidad biológica de México: Estudio de país*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 341 pp.
- CONAGUA (2007). *Estadísticas del Agua en México. Síntesis*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional del Agua. Sistema Nacional de Información del Agua. Mexico. 158 pp., [Mayo 30, 2008] <http://www.cna.gob.mx/conagua/Default.aspx>
- Cotler, H, Gutierrez, S (2005). *Inventario y evaluación de presas de la Cuenca Lerma-Chapala*, Instituto Nacional de Ecología. Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. México, D. F. México. 16 pp.
- Dynesius, M, Nilsson, C (1994). Fragmentation and Flow Regulation of River Systems in the Northern Third of the World. *Science*. 266:753-762.
- EIA (2007). *International data*. Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the U. S. Government. [Mayo 30, 2008]: <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/contents.html>
- Gómez-Tuena A, Orozco-Esquivel, MT, Ferrari, L (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Temas Selectos de la Geología Mexicana. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 57:227-283.
- INE (2000). *Áreas naturales protegidas de México con decretos federales*. Primera edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México D. F., México. 800 pp. Consultado Mayo 30, 2008, en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/>
- Jager, HI (2006). Chutes and ladders and other games we play with rivers: I. upstream passage. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 63:165-

175.

- Khagram, S. (2003). Neither temples nor tombs: A Global analysis of large dams. *Environment*. 45:28-37.
- McCartney, MP, Sullivan, C, Acreman, MC (2000). Ecosystem impacts of large dams. Center for Ecology and Hydrology, UK. The World Conservation Union. Paper prepared for thematic review. In: Dams, ecosystem functions and environmental restoration, World Commission on Dams, <http://www.wca-infonet.org>
- Medina-Ross, JA, Mata-Sandoval, JC, López-Pérez, R (2005). Indicators for sustainable energy development in Mexico. *Natural Resources Forum*. 29:308-321.
- OECD (2006). Nuclear power in NEA member countries. Mexico. Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Agency. 571-588 pp.
- PIDHDD (2006). Report of civil society organizations on the situation of economic, social, cultural and environmental rights in Mexico (1997-2006). 183 p. Consultado Mayo 30, 2008, en [http://www2.ohchr.org/english/bodies/cescr/docs/info-ngos/mexico-coalition\\_En.pdf](http://www2.ohchr.org/english/bodies/cescr/docs/info-ngos/mexico-coalition_En.pdf)
- Revenga, C, Brunner, J, Henninger, N, Kassem, K, Payne, R (2000). Pilot analysis of global ecosystems: freshwater systems. Washington DC. World Resources Institute. Based on Nilsson, C, M Svedmark, P Hansson, S Xiong, and K Berggren 2000. "River fragmentation and flow regulation analysis" Unpublished data. Umeå, Sweden: Landscape Ecology, Umeå University. Basin boundaries are from Fekete, B, C J Vörösmarty, and W Grabs 1999. Global, Composite Runoff Fields Based on Observed River Discharge and Simulated Water Balance. World Meteorological Organization Global Runoff Data Center Report No. 22. Koblenz, Germany: WMO-GRDC.
- Robinson, S (2002). The experience with dams and resettlement in Mexico. Prepared for Thematic Review I.3: Displacement, resettlement, rehabilitation, reparation and development. Department of Anthropology, University Metropolitana, Mexico. 14 p. [Mayo 30, 2008]: <http://www.dams.org/docs/kbase/contrib/soc2002.pdf>
- SENER (2003). Prospectiva del mercado de gas natural 2003-2012. Secretaría de Energía. Dirección General de Formulación de Política Energética. México. 131 p. [Mayo 30, 2008 ]:[http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE\\_y\\_DT/pub/prospecgas\\_natural2003.pdf](http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/prospecgas_natural2003.pdf)

- Van Looy, K, Honnay, O, Bossuyt, B, Hermy, M (2003). The effects of river embankment and forest fragmentation on the plant species richness and composition of floodplain forest in the Meuse Valley, Belgium. *Belgian Journal of Botany*. 136:97-108.
- WCD (2000). *Dams and development: A new framework for decision-making. The report of the world commission on dams*. Earthscan Publications Ltd, London and Sterling, VA. USA. 356 p.
- Zhang, Xiao-Ping (2010). *Restructured electric power systems: analysis of electricity markets with equilibrium models*. Published by John Willey & Sons, Inc., IEEE Press. 307 pp.





# LAS PRESAS EN EL RÍO SANTIAGO

## CAPÍTULO II

José de Anda Sánchez  
Harvey Shear



La construcción de presas en la cuenca del río Grande de Santiago, o simplemente río Santiago, se inicia desde mediados del siglo XIX con la construcción de la presa derivadora Corona (Figura II.2).



Hoy en día existen 15 presas en operación a lo largo de este río, de las cuales cuatro de ellas están clasificadas como grandes presas: Santa Rosa, La Yesca, El Cajón y Aguamilpa (Figura II.1), La presa de Arcediano, que igualmente será una gran presa se encuentra aún en planes de construcción a fin de aumentar la capacidad de abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana de Guadalajara.

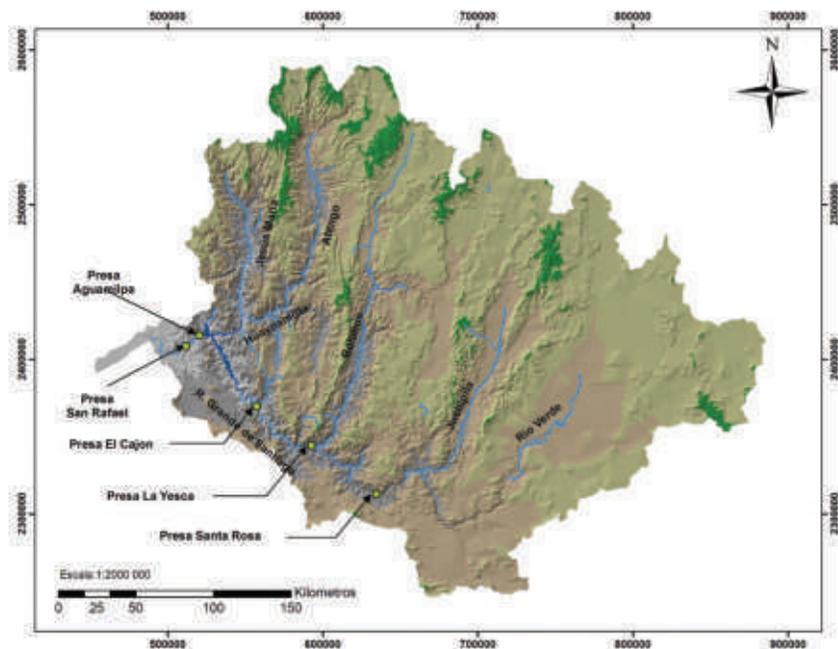


Figura II.1 Mapa de localización de las presas en la cuenca del río Grande de Santiago y los ríos que las alimentan.

Con la actual distribución de presas existe una distancia promedio entre cada una de estas presas de 26 km desde el lago de Chapala hasta la presa reguladora San Rafael y la presa derivadora Amado Nervo localizadas cerca de la desembocadura del río Santiago hacia el Océano Pacífico (Figura II.1).

## 1. Los acueductos y presas para abastecimiento de agua para Guadalajara

La ciudad de Guadalajara está localizada en la parte superior de la Cuenca del río Santiago. Actualmente la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) es el resultado de una conurbación de siete municipios: Guadalajara, Zapopan, Tonalá, Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, el Salto y Juanacatlán. En el año 2010 la población estimada en la ZMG alcanzó los 4,393,818 habitantes, lo cual representa el 59.8% de la población total del estado de Jalisco (INEGI, 2005) (Tabla II.1).

La tendencia de crecimiento anual de la ZMG es de aproximadamente 1.6% y se encuentra asentada actualmente en una superficie de 488.2 km<sup>2</sup> lo que representa una ocupación del 3.3% del total de la Cuenca del río Santiago y 3.2% del territorio del estado de Jalisco (INEGI, 2010).

Por mucho Guadalajara es el principal consumidor de agua y la principal fuente de contaminación para el río Santiago. Hasta antes del año 2012 por diversas razones políticas y económicas la ciudad no contaba con un sistema integral de tratamiento de aguas residuales, lo que generaba una descarga promedio de 10.3 m<sup>3</sup>/s hacia el río Santiago la cual era conducida a todo su sistema de presas aguas abajo (Figura II.1).

TABLA II.1 SUPERFICIE DE LOS MUNICIPIOS COLINDANTES AL DE LA CIUDAD DE GUADALAJARA Y NÚMERO RESPECTIVO DE HABITANTES (INEGI, 2010).					
Municipio	Área km <sup>2</sup>	%	Habitantes	%	
Guadalajara	149.182	5.97	1,495,189	34.03	
Zapopan	1,152.856	46.12	1,243,756	28.31	
Tonalá	163.095	6.52	478,689	10.89	
Tlaquepaque	111.556	4.46	608,114	13.84	
Tlajomulco	698.305	27.93	416,626	9.48	
El Salto	87.590	3.50	138,226	3.15	
Juanacatlán	137.269	5.49	13,218	0.30	
	<b>2,499.853</b>	<b>100.00</b>	<b>4,393,818</b>	<b>100.00</b>	

La extensión de la Zona Metropolitana de Guadalajara es de aproximadamente 488.2 km<sup>2</sup> (INEGI, 2000a).

El origen de la cuenca del río Santiago es el lago de Chapala (Figura II.2). El lago de Chapala es el lago natural más grande de México, se localiza a 50 km al sur de la ciudad de Guadalajara y a una elevación de 1,524 m sobre el nivel del mar, el volumen y calidad del agua de este lago dependen de las contribuciones del río Lerma (de Anda *et al.*, 2005; Cotler, 2006).

Históricamente la descarga natural del lago de Chapala era el río Santiago, pero debido a la drástica reducción de los flujos de entrada del río Lerma, hoy en día el nivel del lago se encuentra por debajo del nivel natural de vertido de sus aguas sobre el río y fue necesario generar una obra de bombeo en la ciudad de Ocotlán, la cual provee de agua a los distritos de riego localizados en esta zona y facilita el escurrimiento aguas abajo (Figura II.2) (SIAPA, 1988; GEJ, 1991).

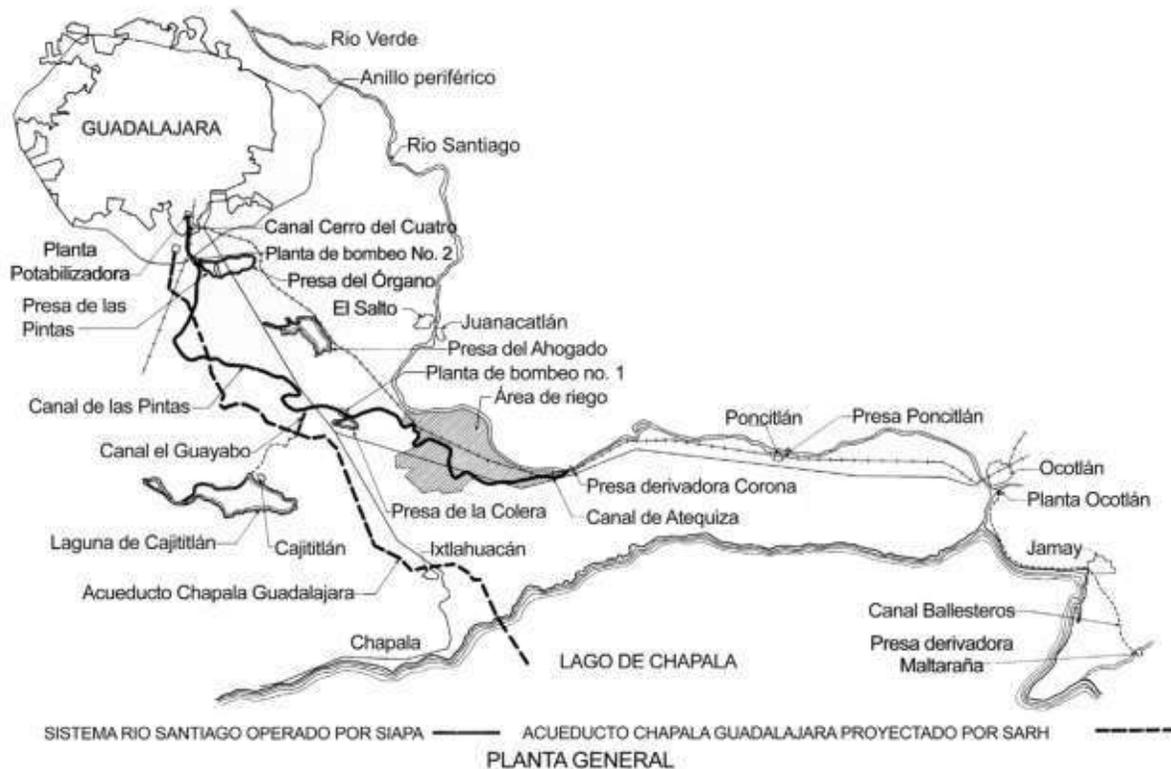


Figura II.2 Fuentes de abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana de Guadalajara (SIAPA, 1988).

La primera presa que controla el flujo sobre el río Santiago, así como de las aguas tributarias del río Zula, es la presa de Poncitlán. Construida en el año de 1897, esta presa se localiza 24 km aguas abajo del río Santiago (Figura II.2); de esta presa el río continúa su curso por 20 km hasta llegar a la presa Corona, la cual se utiliza desde el año de 1853 para derivar parte del caudal del río Santiago a través del Canal de Atequiza. Este canal de 28 km de longitud tiene una capacidad de conducción de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  y se utiliza principalmente para el abasto de agua para riego agrícola. La presa de El Salto, localizada a 20 km aguas abajo de la presa Corona, fue construida en el año de 1895 y para entonces fue la primera planta hidroeléctrica construida en México (Figura II.2) (SIAPA, 1988; GEJ, 1991).

## 2. La presa de Arcediano

La presa de Arcediano se encuentra en proceso de planeación y tiene por objetivo incrementar la capacidad de abastecimiento de agua para la ciudad de Guadalajara dado la severa disminución de los mantos freáticos en los últimos años (von Bertrab, 2003; Gutierrez-Nájera *et al.*, 2005; Palerm, 2005).

La posible ubicación de esta presa es en la cercanía de la conjunción del río Santiago con el río Verde (Figura II.1). La presa de Arcediano reducirá las extracciones del lago de Chapala de  $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , esta reducción permitirá a su vez mantener el volumen de almacenamiento del lago conservando de esta forma su belleza escénica. Asimismo se reducirán las extracciones de aguas subterráneas lo que favorecerá la recarga natural de los acuíferos de la zona (Gutiérrez-Nájera *et al.*, 2005).

A pesar de los beneficios, esta presa aún sigue en controversia debido, principalmente, a la preocupación de la población de que esta presa reciba aguas contaminadas de la zona industrial de El Salto y de la propia ciudad de Guadalajara, por lo que se tiene que realizar una obra de saneamiento integral en toda la cuenca alta del río Santiago a fin de asegurar la calidad de agua en la misma (Palerm, 2005; OPS, 2006a, 2006b).



Cortina y embalse de la presa Santa Rosa, Jalisco, México.

### *3. La presa Santa Rosa*

La presa Santa Rosa define los límites entre la cuenca alta del río Santiago con una superficie de escurrimiento de 36,077 km<sup>2</sup> y la cuenca baja de la misma con una superficie de escurrimiento de 42,342 km<sup>2</sup>. Debido a sus características naturales y la riqueza de su flora y fauna, en el año de 1949 el gobierno declaró 21,000 ha de la cuenca del río Santiago como Área Natural Protegida (ANP) de jurisdicción federal (INE, 2000).

La presa Santa Rosa fue construida por la Comisión Federal de Electricidad entre los años de 1957 a 1964 justamente al centro de dicha (ANP) modificando por completo el entorno natural. La altura de la cortina es de 114 m y la longitud de corona es de 150 m. Capta un escurrimiento medio anual de 3,260 millones de m<sup>3</sup> y su capacidad de almacenamiento es de 400 millones de m<sup>3</sup>.



Cortina y vertedero de la presa Santa Rosa, Jalisco, México.

Unos de los escurrimientos más importantes lo constituyen precisamente las descargas de aguas residuales sin tratamiento de la ciudad de Guadalajara que representan aproximadamente 315.4 millones de m<sup>3</sup>/año, 9.7% del total de agua que entra al embalse de la presa.

La presa tiene como principal función la generación de 61 MW de energía eléctrica. Actualmente más del 60% de la capacidad de almacenamiento de esta presa está azolvada dada la gran cantidad de sólidos que llegan a la presa, que fundamentalmente son producto del arrastre de las aguas urbanas (CFE comunicación personal) procedentes de la Zona Metropolitana de Guadalajara.



Construcción y montaje de las turbinas de la Central Hidroeléctrica La Yesca.

#### *4. La presa La Yesca*

La presa La Yesca se encuentra en un grado avanzado de construcción. Se localiza en Jalisco en la frontera con el estado de Nayarit. El control del flujo del río Santiago a través de esta presa conlleva varios beneficios para la producción de energía eléctrica, ya que esta actuará en combinación con las presas de El Cajón y Aguamilpa para satisfacer los picos de demanda de la Comisión Federal de Electricidad.

La cortina de esta presa alcanzará los 208.5 m de altura lo que la convertirá en una de las más altas del mundo, con una capacidad de almacenamiento de 2,392.9 millones de m<sup>3</sup> y una capacidad de producción de energía eléctrica de 1,181 GWh por año (CFE comunicación personal). Será la tercera con mayor capacidad de generación de energía eléctrica en el país. El objetivo es generar, simultáneamente con las presas El Cajón y Aguamilpa, alrededor de 4,500 GWh por año de energía eléctrica.



Construcción del vertedero de la presa La Yesca.



Construcción de la cortina de la presa La Yesca.

## *5. La presa El Cajón*

La presa El Cajón inició su operación a finales del año 2007. La presa está localizada en el estado de Nayarit entre los municipios de La Yesca, del estado de Jalisco, y Santa María del Oro, del estado de Nayarit. La presa tiene una capacidad de almacenamiento de 2,400 millones de m<sup>3</sup> y una capacidad de producción de energía eléctrica de 1,242 GWh por año. La ventaja adicional de la operación de esta presa es que los flujos del río Santiago se controlan adecuadamente a fin de garantizar la operación de la Central Hidroeléctrica de Aguamilpa (Méndez, 2006; CFE, 2006).



Embalse de la presa El Cajón.



Cortina y embalse de la presa El Cajón.



Cortina de la presa El Cajón.



Vista aérea de la presa El Cajón.



Vertedero hidráulico de la presa de Aguamilpa.

## *6. La presa de Aguamilpa*

La presa de Aguamilpa se localiza en la cercanía de la ciudad de Tepic, capital del estado de Nayarit. Entró en operación en el año de 1994 y hoy en día es una de las presas más importantes en México para la generación de energía eléctrica.

La cortina de esta presa tiene una altura de 187 m y genera 2,137 GWh por año de energía eléctrica (Méndez, 1993, 1994). Adicionalmente a los 6,950 Mm<sup>3</sup> de capacidad de almacenamiento, esta presa permite controlar el flujo del río Santiago para abastecer uno de los distritos de riego más importantes del occidente del país con una extensión de 120,000 ha de área cultivada. El control del flujo del río a través de esta presa, igualmente logró estabilizar 60,000 ha de aguas estuarinas localizadas en la desembocadura del río Santiago en su confluencia con el Océano



Pesca recreativa en el río Santiago aguas abajo de la presa de Aguamilpa.

Pacífico (CICCP, 1997). Desde el año de 1997 se han realizado estudios de calidad de agua en esta presa dada la importancia que han adquirido las actividades de pesca en el embalse (CONAGUA, 1997).

A diferencia de la presa de Santa Rosa, cuya calidad de agua la hace inapropiada para cualquier uso que no sea el de generación de energía eléctrica, el agua de la presa de Aguamilpa, localizada 217 km aguas abajo de la presa de Santa Rosa (Tabla II.2), es adecuada para su uso en la agricultura, la producción piscícola, la pesca deportiva, así como para la generación de energía eléctrica.

El tratamiento de esta agua mediante métodos convencionales, permitiría igualmente hacer uso de este embalse para el abastecimiento de agua potable para la población. En años recientes, se ha reportado que la capacidad de producción piscícola del embalse alcanzó 4,363.6 toneladas anuales, siendo la tilapia la especie más importante contribuyendo con un 99.6% de la producción total (Ulloa-Ramírez *et al.*, 2006).



Captura de tilapia (mojarra roja) por la comunidad de pescadores de Aguamilpa.

**TABLA II.2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE PRESAS CONSTRUIDAS A LO LARGO DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE SANTIAGO.**

Nr	Presa	Año de construcción	Estado	Localización geográfica		Altitud aproximada m	Distancia aproximada del embalse anterior Km	Capacidad de almacenamiento Mm <sup>3</sup>	Superficie inundada ha	Altura del vertedero m	Usos del agua				Capacidad de generación MW	Generación media anual GWh
				Latitud Norte	Longitud Oeste						HP	Agr	Pes	Urb		
	Lago de Chapala		Jalisco	20° 18' 37"	102° 48' 26"	1,521										
1	Ponciltán	1897	Jalisco	20° 23' 11"	102° 55' 56"	1,527	24.33									
2	Corona	1853	Jalisco	20° 24' 02"	103° 05' 42"	1,522	19.91									
3	El Salto	1895	Jalisco	20° 30' 09"	103° 10' 55"	1,510	21.19	80.0	11	20						
4	Puente Grande		Jalisco	20° 34' 12"	103° 08' 52"	1,451	9.13		26							
5	Colimilla I		Jalisco	20° 41' 46"	103° 13' 32"	1,302	23.71									
6	Colimilla II		Jalisco	20° 42' 04"	103° 14' 38"	1,161	2.10									
7	Intermedia		Jalisco	20° 42' 18"	103° 15' 52"	1,097	2.23									
8	Las Juntas		Jalisco	20° 43' 23"	103° 16' 47"	1,032	2.69						21.5	188		
9	Arcediano	En planeación	Jalisco	20° 44' 13"	104° 17' 10"	1,002	1.59	404.0	803	140						
10	San Cristobal	En planeación	Jalisco	20° 01' 08"	103° 24' 44"	835	40.78									
12	Santa Rosa	1961	Jalisco	20° 54' 33"	103° 42' 22"	752	47.04	3,260	840				49.0	74		
13	La Yesca	En construcción	Nayarit	21° 11' 25"	104° 04' 25"	419	69.14	2,393.0	3,492	208				750.0	1,181	
14	El Cajón	2007	Nayarit	21° 25' 41"	104° 27' 14"	239	67.68	2,400.0	4,000	188				750.0	1,242	
15	Aguamilpa	1994	Nayarit	21° 50' 22"	104° 48' 12"	84	80.37	6,950	10,900	187				960.0	2,137	
16	San Rafael	2001	Nayarit	21° 46' 52"	104° 53' 14"	61	14.13	35.6					24.0	145		
17	Amado Nervo			21° 43' 40"	105° 01' 58"	32	23.18									
	Océano Pacífico					-	88.57									

## 7. La presa San Rafael

La presa de San Rafael está localizada en el municipio de Mexicacán en el estado de Nayarit, el embalse alcanza una capacidad de almacenamiento de 35.6 millones de m<sup>3</sup> y genera igualmente electricidad a razón de 145 GWh por año, mucho menor que las presas antes mencionadas.

El principal propósito de esta presa es la de regular las descargas de la presa de Aguamilpa a fin de generar electricidad para las comunidades aledañas y asimismo abastecer de agua para riego de las áreas de cultivo de la zona (SE, 2000).

Después de la presa de San Rafael existe una pequeña presa derivadora denominada Amado Nervo, la cual permite igualmente controlar el flujo para el distrito de riego de la zona. ⚙️

## Referencias

- CFE (2006). El Cajón. Hydroelectric Project. Comisión Federal de Electricidad. México. Consultado Mayo 30, 2008, de <http://www.cfe.gob.mx/CAJON/en>
- CONAGUA (1997). Estudio de calidad del agua en el embalse de la presa de Aguamilpa, Nayarit. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. Contrato No. GSCA 007/97. Diciembre de 1997. México, D. F. México. 428 pp.
- Cotler H, Mazari-Hiriart, M, de Anda-Sánchez, J (Editores) (2006). Atlas de la cuenca Lerma-Chapala: construyendo una visión conjunta. Instituto Nacional de Ecología-UNAM, México, D. F. México. 198 pp. ISBN 968-817-783-0
- de Anda J, Shear H, Zavala, JL (2005). Simplified hydrologic correlations to forecast the natural regime of Lake Chapala. *Journal of Environmental Hydrology*,13:1-12.
- GEJ (1991). Sistema Regional La Zurda – Calderón. Primera Etapa, Gobierno Federal. Gobierno del Estado de Jalisco. México. 81 pp.
- Gutierrez-Nájera R, León-Corrales, P (2005). El acceso a la justicia en materia ambiental en el contexto de los derechos económicos, sociales y culturales. In Programa de Cooperación sobre Derechos Humanos. México – Comisión Europea. Secretaría de Relaciones Exteriores. México. pp. 414-440., Consultado Mayo 30, 2008, en: [http://www.pdhumanos.org/libreria/libro6/22\\_p.leon.pdf](http://www.pdhumanos.org/libreria/libro6/22_p.leon.pdf)
- Mendez, F (1993). Underground Blasting at Aguamilpa. *International water power and dam construction*. 45:23-26.
- Mendez, F (1994). Aguamilpa underground penstocks-Excavation phase. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21: 585-595.
- Mendez, F (2006). Progress at the Mexico's El Cajon hydro project. *The International Journal on Hydropower Dams*, 30: 57-62.
- OPS (2006a). Actualización y caracterización de fuentes de contaminación de la Cuenca del Río Verde en el Estado de Jalisco. Organización Panamericana de la Salud. Comisión Estatal del Agua en Jalisco. Guadalajara, Jalisco. México. Consultado Mayo 30, 2008, en: [http://www.ceajalisco.gob.mx/nota\\_ops.html](http://www.ceajalisco.gob.mx/nota_ops.html)
- OPS (2006b). Identificación y caracterización de fuentes de contaminación de las cuenca directa del río Santiago, entre los municipios de Ocotlán y Tonalá, y directa del río Zula. Organización Panamericana de la Salud. Comisión Estatal del Agua en Jalisco. Guadalajara, Jalisco. México. Consultado Mayo 30, 2008, en: [http://www.ceajalisco.gob.mx/nota\\_ops.html](http://www.ceajalisco.gob.mx/nota_ops.html)

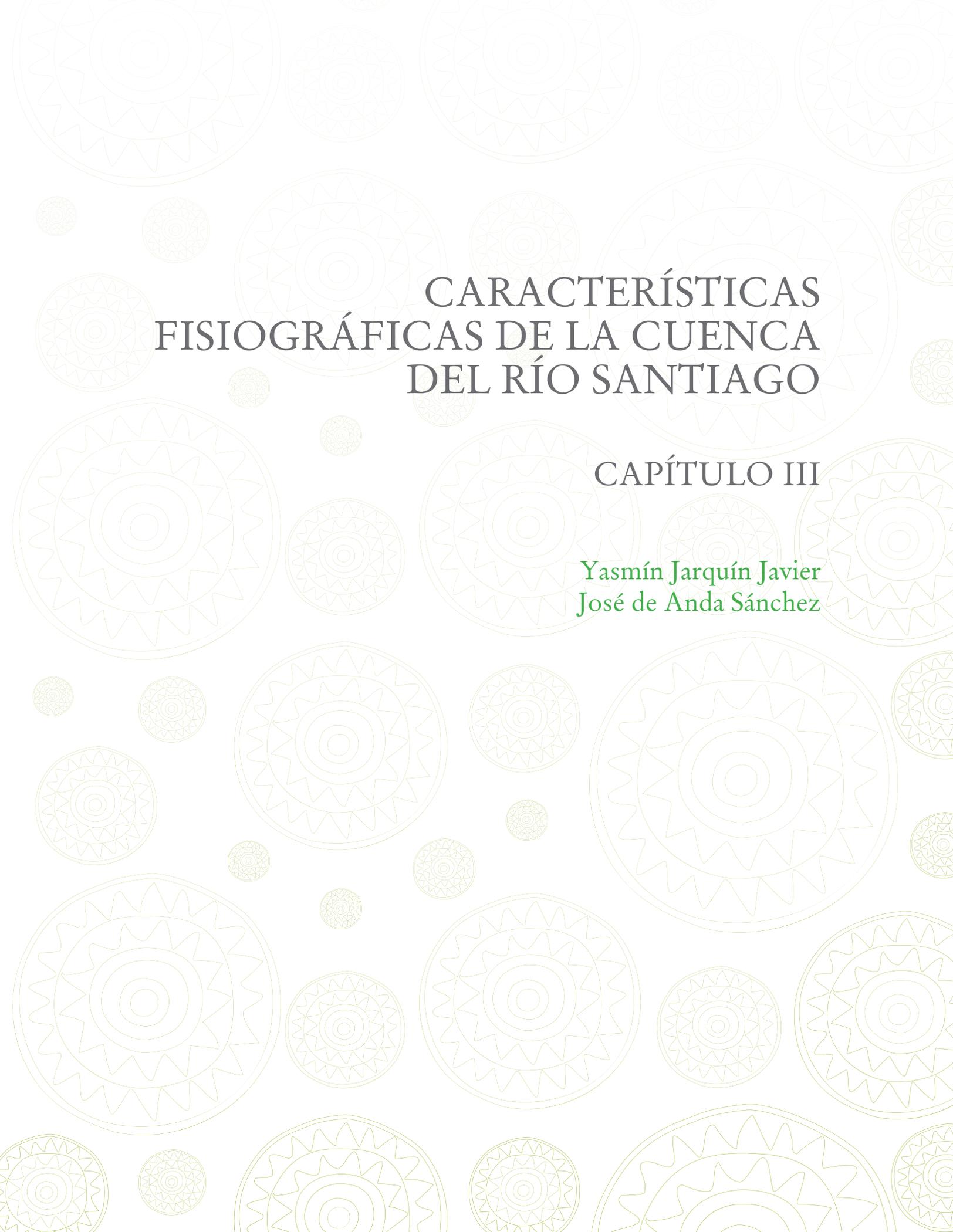
- Palerm, J (2005). Needs and opportunities for SEA in Mexico: a view through the Arcediano dam case study. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 23: 125–134.
- SE (2000). *Prospectiva del sector eléctrico 2000-2009*. Secretaría de Energía. México. México. 248 pp.
- SIAPA (1988). *Agua para la Zona Metropolitana de Guadalajara 1983-1988*. Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado. Guadalajara, Jalisco. México. 98 p.
- Ulloa-Ramírez, P, Patiño-Valencia, JL, Sánchez-Regalado, R (2006). Dictamen de la implementación de la veda 2006. Aguamilpa, Nayarit, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de la Pesca. Centro Regional de Investigación Pesquera Bahía de Banderas, Nayarit. Febrero 2006. México. 10 pp.
- Von Bertrab, E. (2003). Guadalajara's water crisis and the fate of Lake Chapala: a reflection of poor water management in Mexico. *Environment and Urbanization*. 15: 127-140

### *Referencias cartográficas*

- SPP (1981). *Carta hidrológica Aguas superficiales Guadalajara*. Escala 1:1 000 000. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de Servicios de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes. México.
- SPP (1988). *Carta topográfica Nayarit y Jalisco Hoja F13-8*. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes. México.
- INEGI (1995). *Espacio mapa Tepic Hoja F13-8*. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes. México.
- INEGI (1996a). *Carta topográfica. Ocotlán F13D77*. Escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes. México.
- INEGI (1996b). *Carta topográfica. Chapala F13D76*. Escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes. México.

- INEGI (2000a). Información referenciada geoespacialmente integrada en un sistema. Software IRIS versión 3.0. Edición 2005. Información del censo nacional del año 2000. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Aguascalientes, Aguascalientes. México.
- INEGI (2000b). Sombreados de los modelos digitales de elevación. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. Aguascalientes, Aguascalientes. México.
- INEGI (2002). Carta topográfica. Guadalajara Este. F13D66. Escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes. Aguascalientes. México.
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Aguascalientes, México.





# CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS DE LA CUENCA DEL RÍO SANTIAGO

## CAPÍTULO III

Yasmín Jarquín Javier  
José de Anda Sánchez

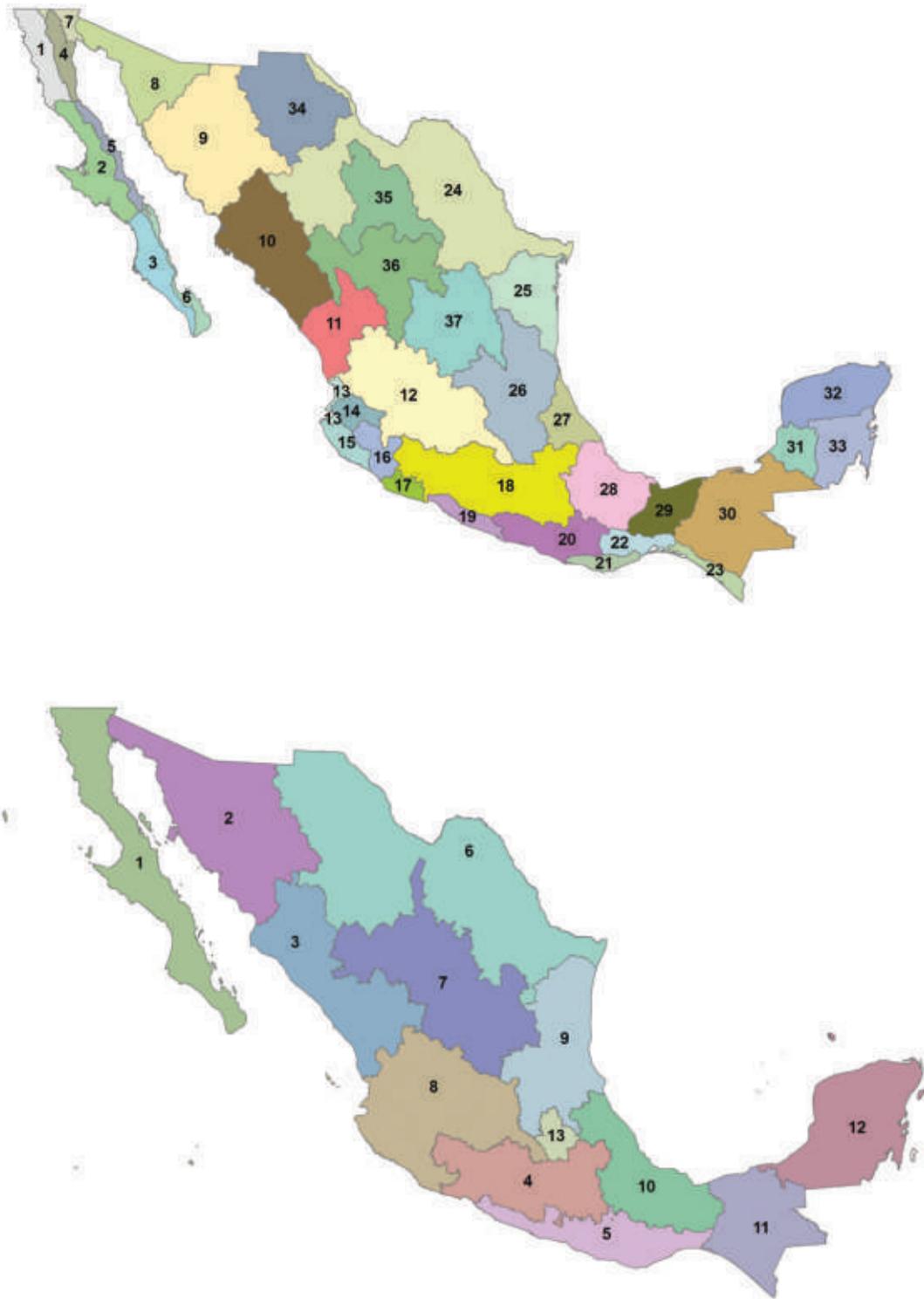


Figura III.1 Regiones hidrológicas y regiones hidrológico-administrativas de México.

De acuerdo con los trabajos que se han realizado por parte de diversas dependencias gubernamentales tales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Instituto Nacional de Ecología (INE), se han delimitado 1,471 cuencas naturales en México con base a la red hidrográfica nacional.

Para fines de manejo del recurso hídrico nacional estas cuencas se han agrupado en 37 regiones hidrológicas y para su administración han definido 13 regiones hidrológico-administrativas (ver Figura III.1)(CONAGUA, 2010).

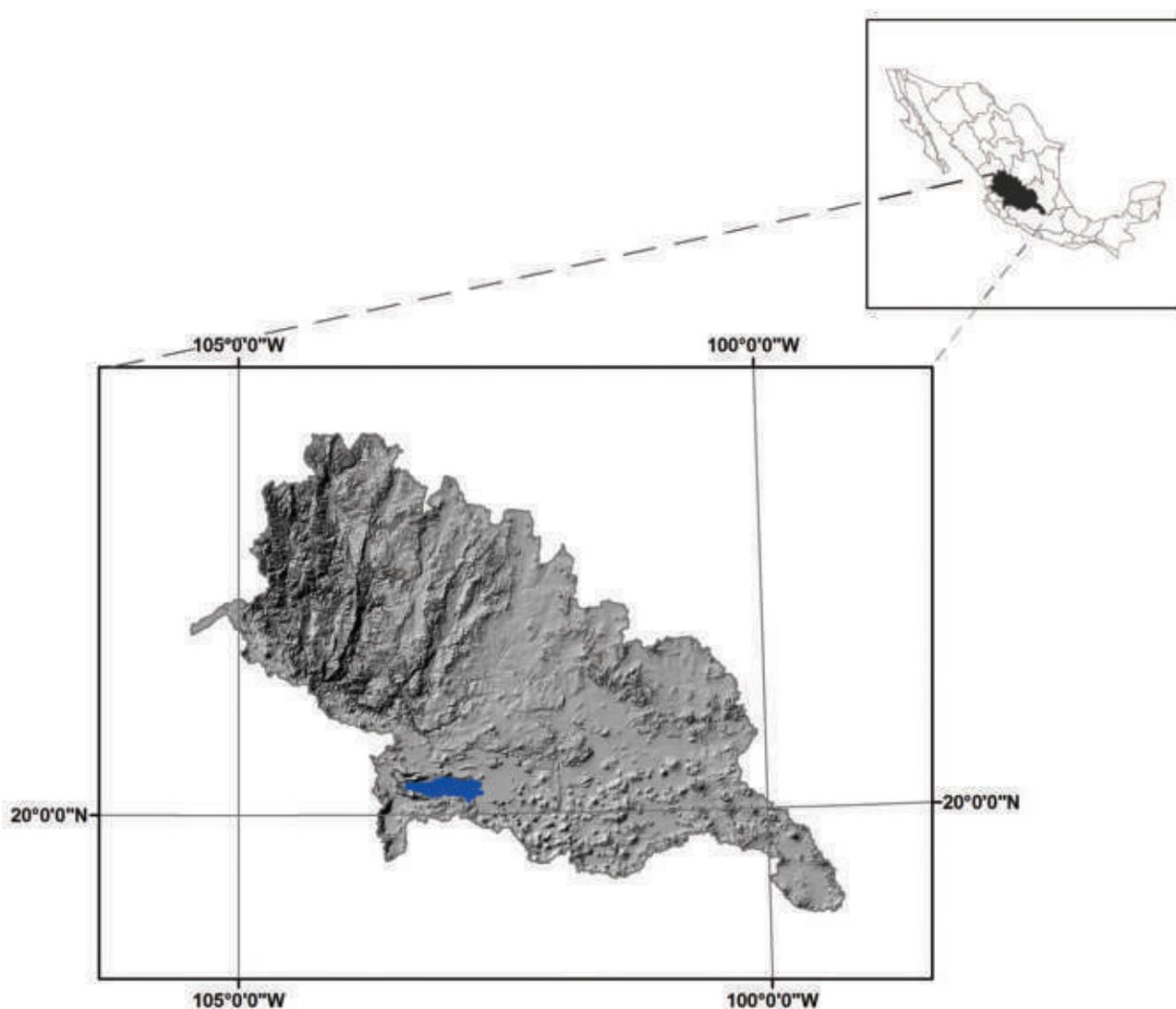


Figura III.2 Localización geográfica de la Región Hidrológica No. 12 Lerma-Santiago.

## 1. Localización de la Cuenca

La Región Hidrológica No. 12 denominada Lerma-Santiago ocupa una extensión de 133,848.17 km<sup>2</sup>, se localiza en la parte central del territorio nacional aproximadamente entre los paralelos 99° 21' 8.158" W, 19° 8' 11.74" N y 105° 26' 57.90" W, 21° 39' 45.36" N (Figura III.2). Está conformada por aproximadamente nueve cuencas hidrográficas y 58 subcuencas para estudios de disponibilidad hídrica (Figura III.3).

Esta región es considerada una de las más importantes de México por ser en ésta donde se asienta una gran parte de su población e históricamente ha sido un impulsor de su desarrollo económico. Por razones de manejo de recurso hídrico, esta región se ha dividido en dos sistemas que incluyen a dos de las principales cuencas de ésta (CONAGUA, 2007): la cuenca Lerma-Chapala y la cuenca del río Grande de Santiago. La cuenca Lerma-Chapala tiene una extensión aproximada de 48,131.6076 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2007; Cotler, 2010) y ocupa la parte central-este de la cuenca, mientras que la cuenca del río Grande de Santiago, o simplemente río Santiago, tiene una extensión de 76,276.59 km<sup>2</sup> (Figura III.4)

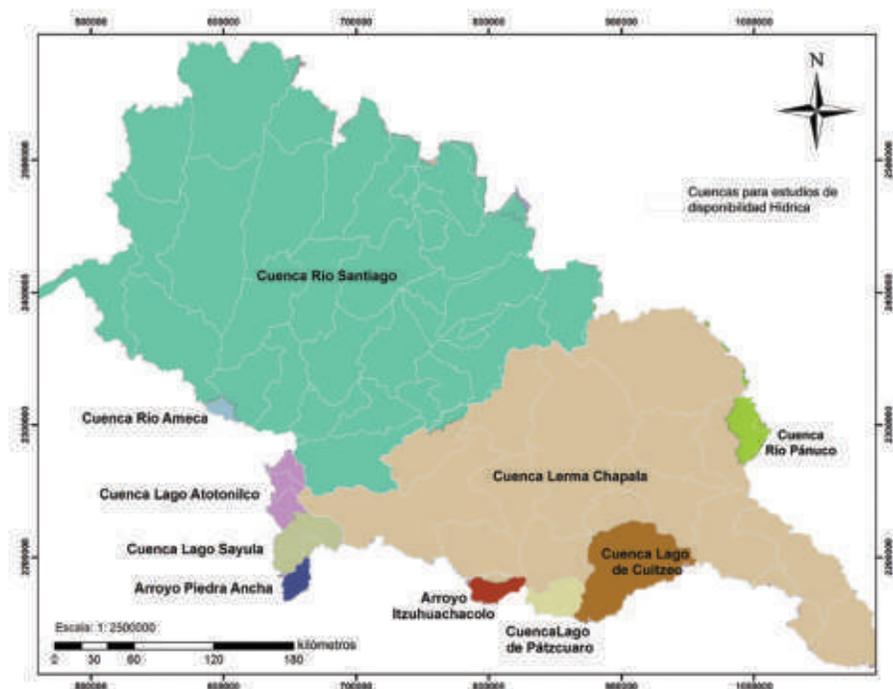


Figura III.3 Cuencas hidrográficas dentro de la Región Hidrológica No.12.

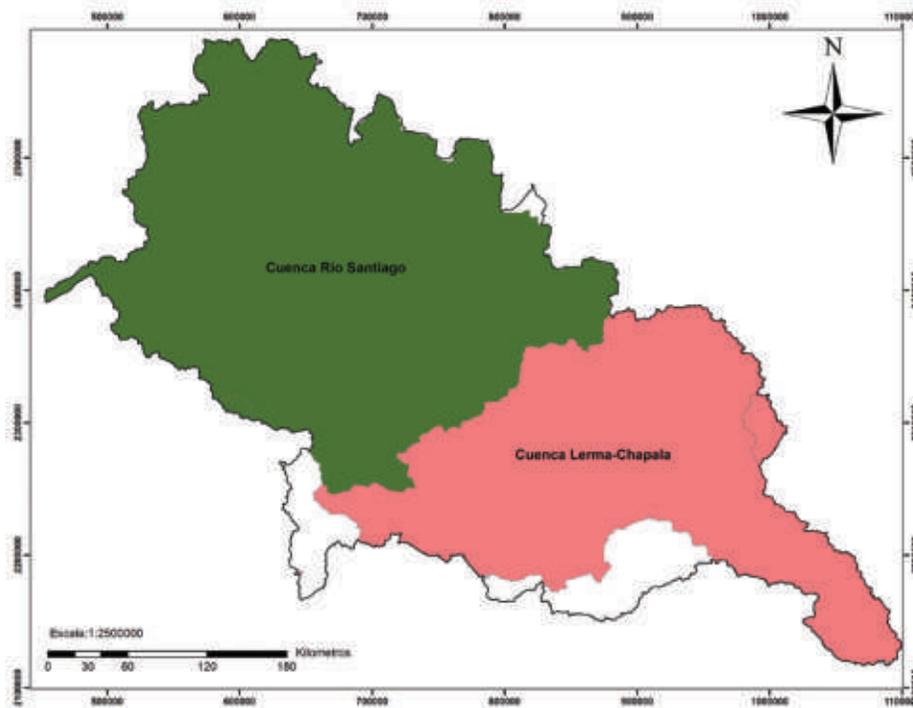


Figura III.4 Cuencas principales dentro de la Región Hidrológica No.12.

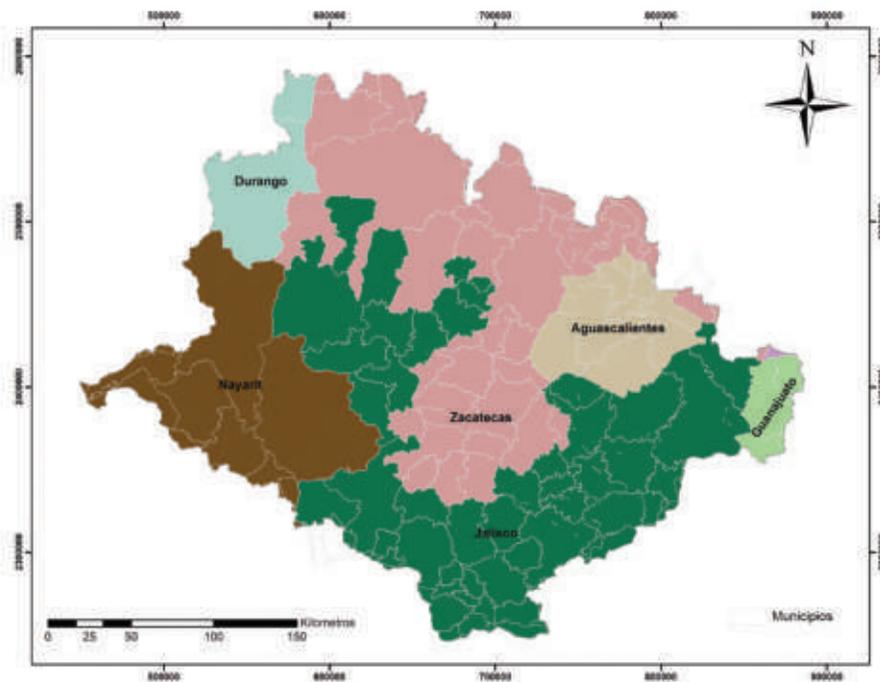


Figura III.5 Entidades federativas y municipios dentro de los límites de la cuenca del Río Santiago.

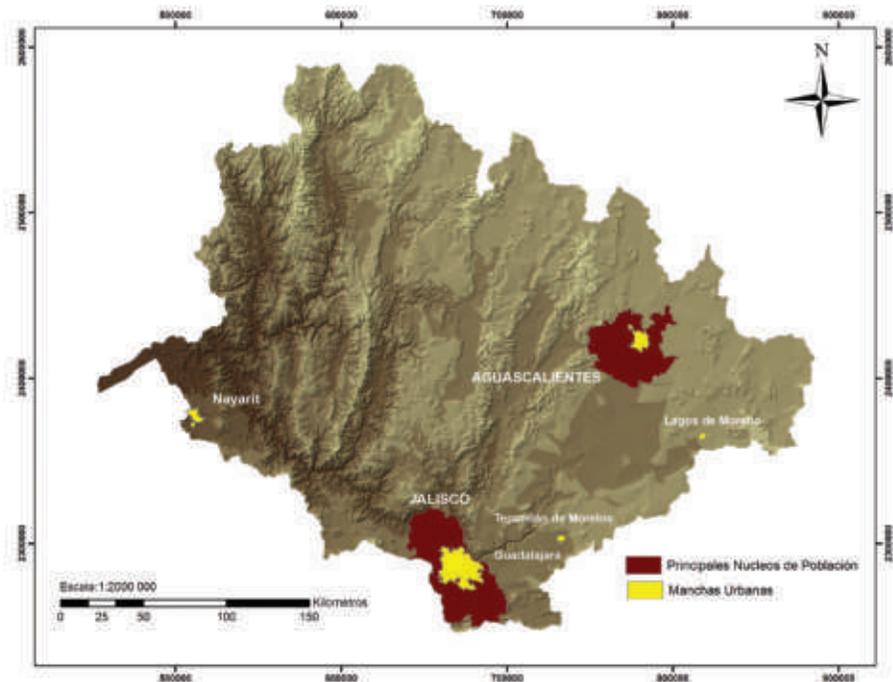


Figura III.6 Principales núcleos de población y manchas urbanas en la cuenca del río Santiago.

La cuenca del río Santiago se localiza en la parte oeste entre los  $101^{\circ}12'25''$  y  $105^{\circ}28'8''$  de longitud oeste y los  $20^{\circ}19'17''$  y  $23^{\circ}25'43''$  de latitud norte (CONAGUA, 2007; Cotler *et al.*, 2006).

Físicamente el área de influencia de la cuenca está conformada por seis entidades federativas y 126 municipios (CONAGUA, 2007) (Figura III.5.), dentro de los cuales se han identificado dos principales núcleos de población, el primero dentro del estado de Jalisco y el segundo en Aguascalientes, así mismo se tienen definidas cinco principales manchas urbanas: Tepic, Guadalajara, Tepatitlán de Morelos, Lagos de Moreno y la ciudad de Aguascalientes (CONAGUA, 2007) (Figura III.6).



Conformaciones basálticas en la cuenca del río Santiago.



Vista del río Santiago aguas abajo de la presa de Aguamilpa.

## *2. Hidrología superficial*

El área de la cuenca río Santiago está definida por la CONAGUA (2006) dentro de la Región Hidrológica No. 12 y comprende parte de los estados de Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas y Nayarit, en menor proporción, igualmente, se encuentran dentro de la cuenca municipios de los estados de Guanajuato, San Luis Potosí y Durango. El cauce total del río Santiago es de aproximadamente 547 km.

El sistema hidrológico está constituido principalmente por el río Santiago que es la corriente principal; sus principales afluentes tributarios son los ríos: Verde Grande cuya cuenca tiene un área de 20,806 km<sup>2</sup>, Juchipila con una área de 8,449 km<sup>2</sup>, Bolaños con 14,941 km<sup>2</sup> de superficie y Huaynamota con una superficie de 17,605 km<sup>2</sup> (Figura III.7).

TABLA III.1 SUBREGIONES HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE SANTIAGO.				
Subregión hidrológica	No. de sub-cuencas	Longitud del río principal (m)	Área superficial, (km <sup>2</sup> )	Escorrentamiento medio anual, (Mm <sup>3</sup> )
Verde Grande	13 (1-13)	237,601.84	20,626	941.71
Juchipila	5 (14-18)	191,853.58	8,449	423.72
Santiago-Guadalajara	4 (19-22)	193,005.23	8,749	1,894.50
Bolaños	5 (23-27)	331,045.26 <sup>b</sup>	14,941	981.70
Huaynamota	4 (28-31)	255,513.52 <sup>c</sup>	17,605	1,655.00
Santiago-Aguamilpa	2 (32-33)	154,728.61	6,350	1,952.20
<b>Total</b>	<b>33</b>	<b>1,363,748.04</b>	<b>76,720</b>	<b>7,848.83</b>

<sup>a</sup> Número de subcuencas de acuerdo con la Figura III.7

<sup>b</sup> Río Jerez-Bolaños

<sup>c</sup> Río San Andrés-Atengo-Huaynamota

Sin embargo para su estudio, la cuenca del río Huaynamota se ha subdividido en cuatro cuencas hidrológicas (INEGI, 2000) de acuerdo a los principales afluentes que se encuentran dentro de sus límites (Figura III.8) (Tabla III.1).

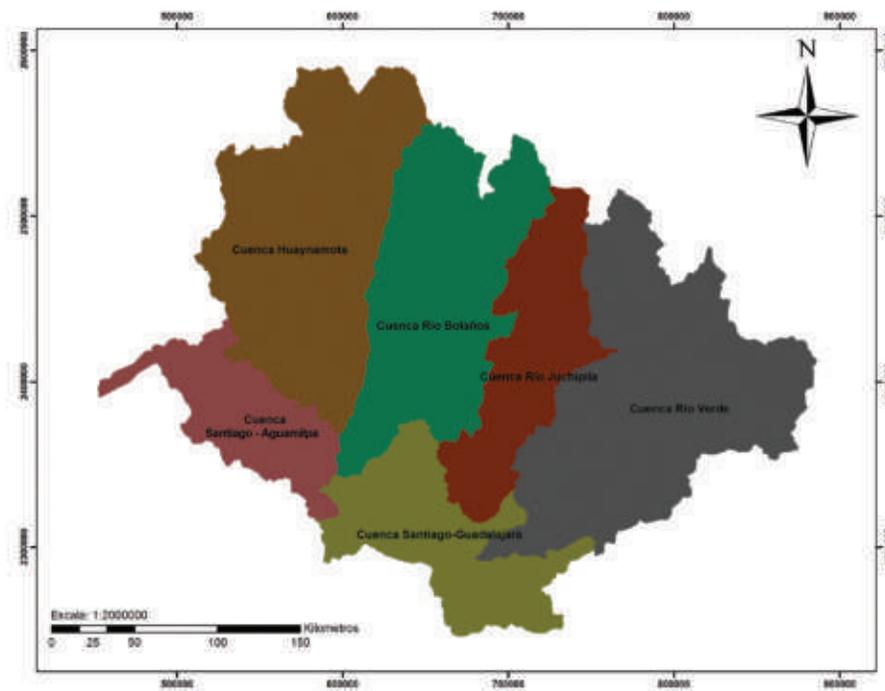


Figura III.7 Subdivisión de la cuenca del Río Santiago en cuencas hidrológicas para (INEGI, 2009)





Cabe destacar que en el curso final del río Santiago antes de su desembocadura con el Océano Pacífico existen esteros meándricos y en la época de lluvias se generan áreas de inundación.

### *3. Aguas subterráneas*

El agua subterránea es parte de la precipitación que se infiltra a través del suelo hacia los estratos porosos y en ocasiones los satura de agua. Se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados por efecto gravitatorio los cuales eventualmente llegan a los manantiales, los arroyos, lagos y océanos.

Existen dos factores importantes que dan origen a la formación de agua subterránea: la gravedad y el tipo de roca, el primero contribuye al desplazamiento del agua hacia el interior de la tierra y el segundo contribuye a la cantidad de almacenamiento de la misma, donde la cantidad almacenada estará en función de la porosidad de las rocas (IMTA, 2010).

### *4. Acuíferos*

Gran parte del agua que se infiltra hacia el subsuelo y es almacenada en los espacios porosos de las rocas, dependiendo de la porosidad y características permeables de cada roca, el agua tendrá un movimiento de flujo diferente, cuando la roca almacenadora de agua permite que la misma fluya hacia un espacio rocoso permeable bajo la superficie, es entonces cuando se le da el nombre de “acuífero”.

Un acuífero puede definirse como una unidad geológica saturada que contiene y transmite agua de buena calidad, permitiendo ser extraída en cantidades económicamente aprovechables. De acuerdo con las condiciones de presión a que se encuentra sometida el agua en el subsuelo, los acuíferos se clasifican en: libre, confinado, semiconfinado, colgado, acuitardo, acuícludo y acuífugo (IMTA, 2010).

| Página anterior: Río Santiago después del periodo de lluvias aguas abajo de la presa de Aguamilpa.

Las aguas subterráneas que se depositan en los acuíferos del país son vitales para garantizar los abastecimientos de agua de la población urbana, pues gran parte de las ciudades y localidades dependen de ellas, igualmente importantes son para la agricultura, industria, comercio y servicios. Desafortunadamente existen evidencias de que un número significativo de los acuíferos que cubren el territorio nacional están siendo sobreexplotados o se encuentran muy cercanos a sus niveles máximos de extracción (CONAGUA, 2010).

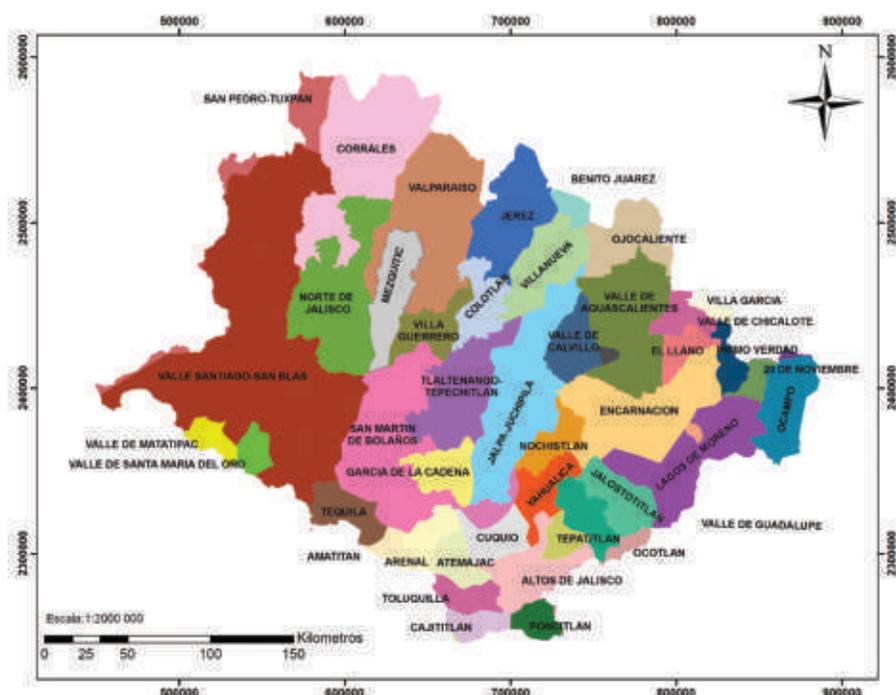


Figura III.9 Acuíferos localizados en la cuenca del río Santiago.

En cuanto al área correspondiente a la cuenca Santiago, de acuerdo a la información vectorial generada en la Subgerencia de Información Geográfica del Agua de la Gerencia de Aguas Subterráneas de la CONAGUA, se tienen registrados, hasta el año 2007, 43 acuíferos distribuidos de acuerdo a como se muestra en el mapa (Figura III.9).



Embalse de la presa de Aguamilpa.

## 5. Topografía

La cuenca del río Santiago presenta una topografía compleja, dado que convergen dos provincias fisiográficas importantes: la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico, este último se extiende desde el estado de Veracruz hasta el estado de Nayarit, en éste nacen dos de los ríos más importantes de México: el Lerma-Santiago y el Balsas, mientras que la Sierra Madre Occidental se extiende desde la frontera con Estados Unidos y llega a la desembocadura del río Lerma, alcanzando su punto más alto justamente dentro de los límites de esta cuenca, en la parte sur del estado de Durango, con una altitud de 3,340 msnm.

Dentro de estas formaciones se ubica una cadena de sierras importantes destacando la Sierra de los Huicholes (2,400 msnm), Sierra Pajaritos (2,036 msnm), Sierra Sombrerete (3,100 msnm) y Sierra Morones (2,660 msnm) (INEGI, 2009) (Figuras III.10 y 11)



Figura III.10 Imagen correspondiente a la topografía en 3D de la cuenca del río Santiago.

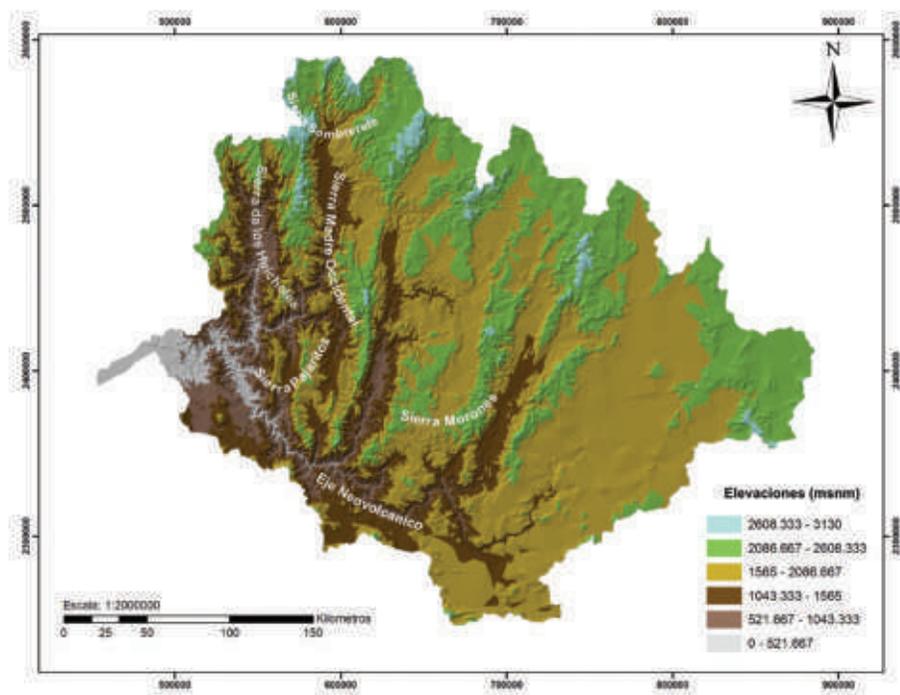


Figura III.11 Topografía de la cuenca del río Santiago.

## 6. Geología

La cuenca del río Santiago forma parte del Eje Neovolcánico Trans-Mexicano caracterizado por una gran diversidad de estructuras volcánicas que han dado como resultado una importante variedad de formaciones geológicas y de afloramientos geotermales.

Debido a la intensa actividad volcánica del pasado, destacan diversas estructuras geológicas y morfológicas en la cuenca del río Santiago, la cual se encuentra dominada por cadenas de montañas, grandes cañones, riscos formados por fallas geológicas y numerosos valles. Estas estructuras geológicas es lo que hoy en día definen el curso de los ríos tributarios que desembocan en el río Santiago (Ferrari *et al.*, 2003; Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

La cuenca del río Santiago en su mayoría está constituida por rocas ígneas extrusivas como resultado de su origen volcánico, estas rocas ígneas extrusivas son en su mayoría del tipo riolita-toba ácida y tienen su origen en la cristalización del material fundido denominado magma. Este proceso tiene lugar bajo determinadas condiciones de presión y en presencia de una cantidad variable de gases disueltos (Cruz, 2008) (Figura III.12).

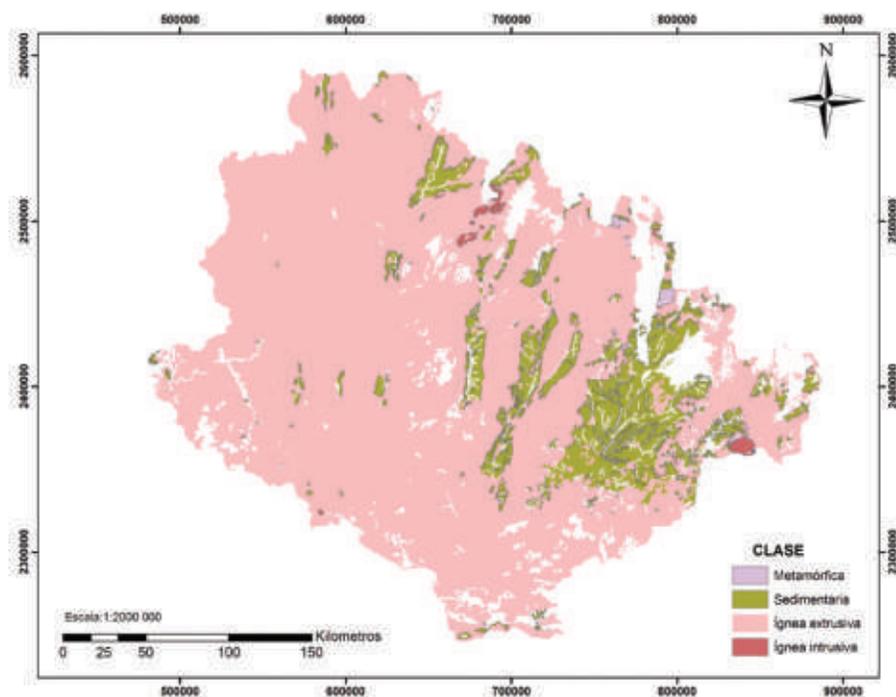


Figura III.12 Distribución de clases geológicas dentro de la cuenca del Río Santiago.

Esta cuenca corresponde al último sistema de formación que es la Era Cenozoica y solo una pequeña parte corresponde a la Era Mesozoica. En geología, la era se refiere a un periodo de tiempo extremadamente largo, millones de años, que abarca importantes procesos geológicos y biológicos (Figura III.13).





En cuanto a las características geológicas de la cuenca, otra de ellas no menos importante, es el sistema o periodo geológico, el cual hace referencia a una subdivisión de tiempo geológico, para este caso el área de la cuenca del río Santiago pertenece en su gran mayoría al Terciario, seguido del Neógeno y el Cuaternario en menor porcentaje (Figura III.14).

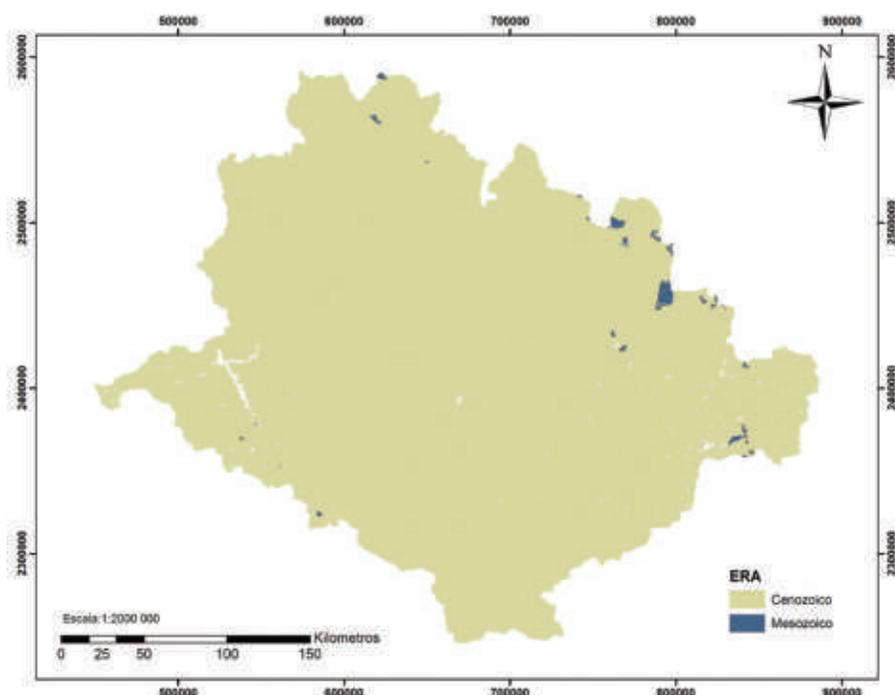


Figura III.13 Eras geológicas en la cuenca del Río Santiago.

La importancia del periodo terciario radica en que la mayoría de la litología de esta zona fue constituida en esta etapa por afloramientos de rocas de origen ígneo y sedimentario siendo, como se comentó en párrafos anteriores, las rocas ígneas extrusivas las que ocupan una mayor extensión. Otro dato importante es que grandes montañas que integran el eje neovolcánico han sido formadas en este periodo desde la desembocadura del río Santiago hasta el golfo de México, por lo que esta provincia está caracterizada geológicamente por el predominio de rocas volcánicas que datan del Terciario y del Cuaternario.

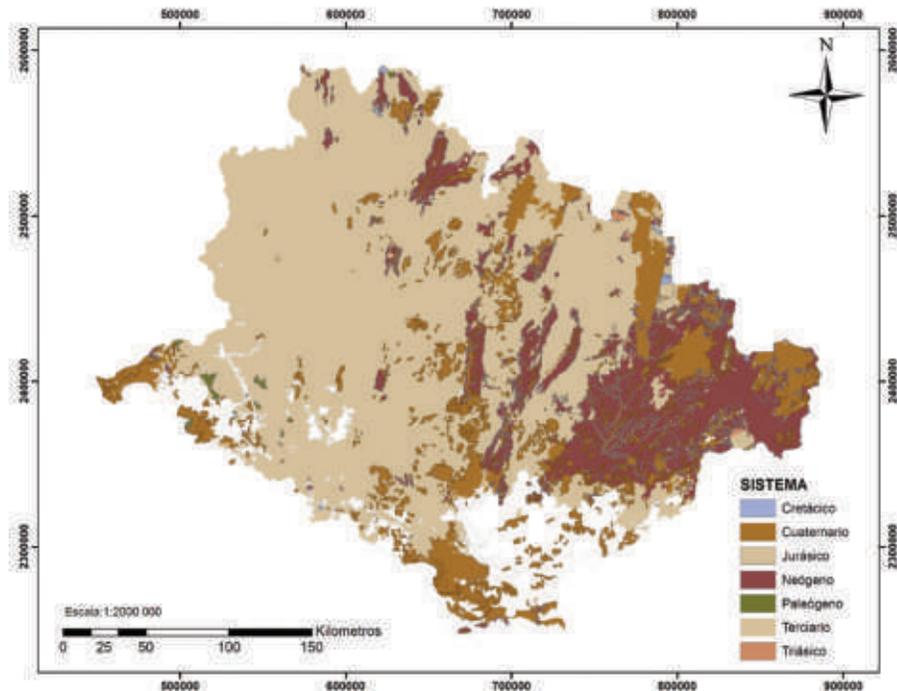


Figura III.14 Sistema geológico de la cuenca del río Santiago.

Finalmente, se puede mencionar que otro importante evento geológico corresponde a la provincia Sierra Madre Occidental donde se desarrollan dos secuencias volcánicas durante el Terciario, con amplia representación dentro de esta área; la primera formada por rocas de composición intermedia del Terciario Inferior, que muestra fracturas y fallas normales, así como deformación y alteración hidrotermal, producto de intrusiones diabásicas y en algunos sitios ácidas, lo que provocó la formación de yacimientos minerales.

En la segunda secuencia, de edad Terciario Oligoceno-Mioceno, el vulcanismo se manifiesta con una composición ácida de carácter ignimbrítico; la posición que guardan estos materiales rocosos es de horizontal a ligeramente inclinada, producto de pseudoestratificación, basculamiento, sistemas de fallas y fracturas, que originaron mesetas escalonadas. El contacto con la secuencia del Terciario Inferior es de tipo discordante, lo que indica un lapso de calma volcánica (INEGI, 2000).



Rocas ígneas extrusivas características del cañón del embalse de Aguamilpa.



Formación de roca caliza en la cuenca del río Santiago.

## 7. Fisiografía

De acuerdo con Ortega Gutiérrez (1991) y a la descripción de las provincias fisiográficas de la Dirección General de Geografía del INEGI, la cuenca de estudio está comprendida en cuatro provincias fisiográficas: la Faja Ignimbrítica Mexicana (la Sierra Madre Occidental), el Eje Neovolcánico Trans-Mexicano, la Sierra Madre del Sur y la Llanura Costera del Pacífico (INEGI, 2000) (Figura III.15).

El área de la cuenca en su mayoría pertenece a la provincia correspondiente a la Sierra Madre Occidental, como se sabe esta zona es de origen volcánico y la importancia de las rocas volcánicas que constituyen la Sierra Madre Occidental radica no solo en que cubren una gran parte del área de estudio, sino también al hecho de que la secuencia volcánica inferior está asociada a yacimientos minerales.

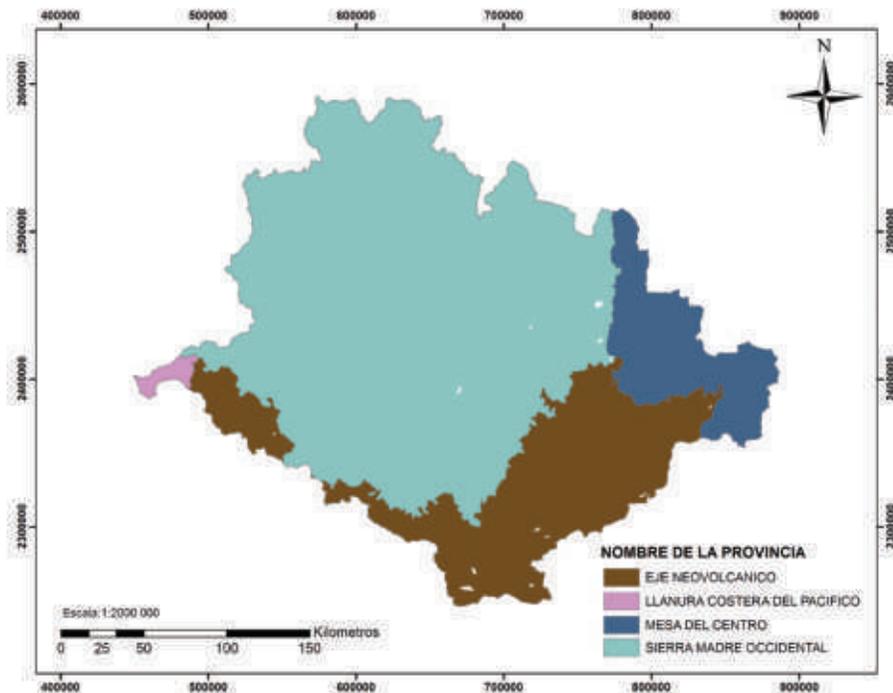


Figura III.15 Provincias fisiográficas de la cuenca del río Santiago.

Por otra parte, el Eje Neovolcánico es la provincia de mayor relevancia, debido a que se trata de una región de alto riesgo volcánico y tectónicamente activo; así como la circunstancia de que en ella se asientan numerosas poblaciones importantes como la ciudad de Tepic. En esta provincia también se desarrolló vulcanismo

calcoalcalino a finales del Plioceno y durante el Cuaternario; dicho vulcanismo desarrolló rocas de composición basáltica y andesítica, así como piroclastos.

Diversos estudios indican que el eje se encuentra fragmentado en tres sistemas de fosas tectónicas, las cuales convergen en el estado de Jalisco y cuyas direcciones son: norte-sur y noroeste-sureste; la última dirección corresponde a la fosa Tepic denominada también “rift” de Tepic, localizada parcialmente dentro de Nayarit, en el que se sitúan tres centros eruptivos principales (estratovolcanes): San Juan, Sangangüey y Ceboruco, con numerosas asociaciones de conos cineríticos.

Las rocas calcoalcalinas, además de los abundantes aparatos volcánicos monogenéticos que muestran, forman diques básicos, los cuales cortan a las rocas volcánicas ácidas del Oligoceno-Mioceno (INEGI, 2000). Debido a la intensa actividad volcánica del pasado, destacan una gran cantidad de estructuras geológicas y morfológicas, las cuales se encuentran dominadas por cadenas de montañas, grandes cañones, riscos formados por fallas geológicas y numerosos valles. Estas estructuras geológicas es lo que hoy en día definen el curso de los ríos tributarios que desembocan en el río Santiago (Ferrari *et al.*, 2003; Gómez-Tuena *et al.*, 2005) y en particular en las vertientes que alimentan al embalse de Aguamilpa.

En cuanto a la provincia Llanura Costera del Pacífico, ésta constituye una zona de interés económico para el estado, ya que en los suelos que la caracterizan se realiza la mayoría de las actividades agrícolas y acuícolas (INEGI, 2000).

Finalmente, la Mesa Central o Mesa del Centro es la provincia con menor área dentro de la cuenca y su importancia radica en que abarca sectores de varias cuencas hidrológicas dentro de las cuales destacan las cuencas cerradas áridas del norte, la del río Aguanaval, la parte media de la del Nazas, siendo de mayor importancia para el presente estudio la cuenca del Grande de Santiago incluyendo las de los ríos Juchipila y Verde, así como de los lagos y afluentes del Lerma, como el Lajas que desciende de la Sierra de Guanajuato (INEGI, 2011).



Vegetación modificada por el hombre en las márgenes del río Santiago en el embalse de Aguamilpa.

## 8. *Clima*

La climatología de un lugar representa una parte importante dentro del entorno geográfico de éste ya que mantiene una estrecha relación con la distribución de los asentamientos humanos y sus actividades agroeconómicas, las características topográficas del lugar y con el tipo y distribución de flora y fauna existentes (Cotler *et al.*, 2006).

La precipitación media en la cuenca del río Santiago es de 723 mm, 87% de ésta ocurre en el periodo de junio a octubre. La temperatura media anual es de 18.3°C (INEGI, 1991; Pérez-Rivera, 2005).

En la cuenca existen tres climas dominantes: semiseco templado al norte, cálido subhúmedo en el sur y oeste con lluvias en el verano y una temperatura media anual entre los 12°C y 18°C y templado subhúmedo siendo este último el predominante dentro de la cuenca. Al este de la cuenca se presentan lluvias de verano alcanzando una temperatura media anual de 22 °C (INEGI, 1991; Pérez-Rivera, 2005) (Figura III.16).

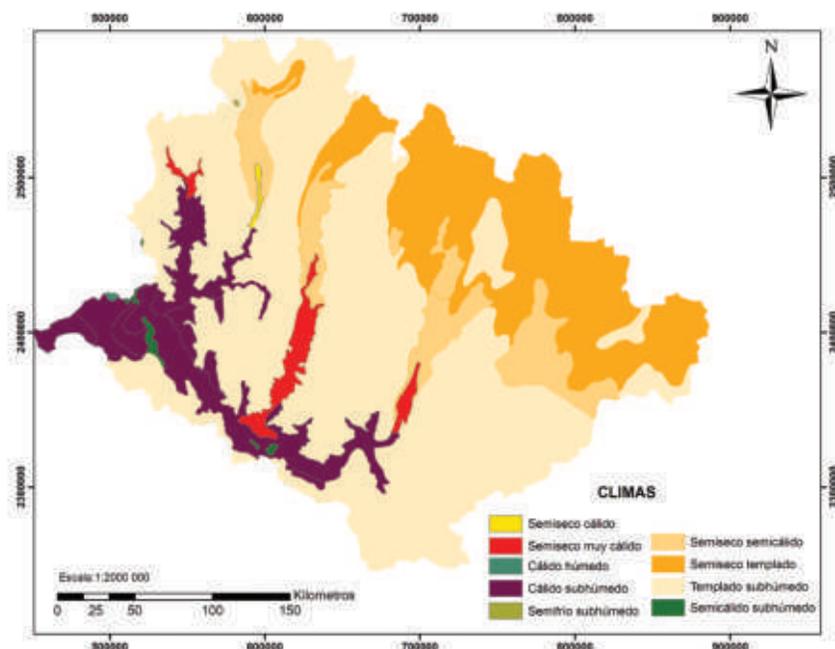


Figura III.16 Unidades climáticas en la cuenca del río Santiago.

## 9. Uso de suelo y vegetación

La vegetación natural se considera determinante para muchos de los procesos, funciones y dinamismo de las cuencas, es por ello que es un factor que merece particular atención, así también la vegetación y cambio de uso de suelo indiscutiblemente constituye un indicador de la respuesta agroeconómica de los asentamiento humanos, el nivel de influencia y la presencia de ecosistemas específicos.

En México, las diez cuencas con mayor superficie de vegetación natural (primaria y secundaria) son las de los ríos Bravo, Nazas, Balsas, Yaqui, Santiago, Pánuco, Grijalva-Usumacinta, Fuerte, Sonora y la de la península de Yucatán.

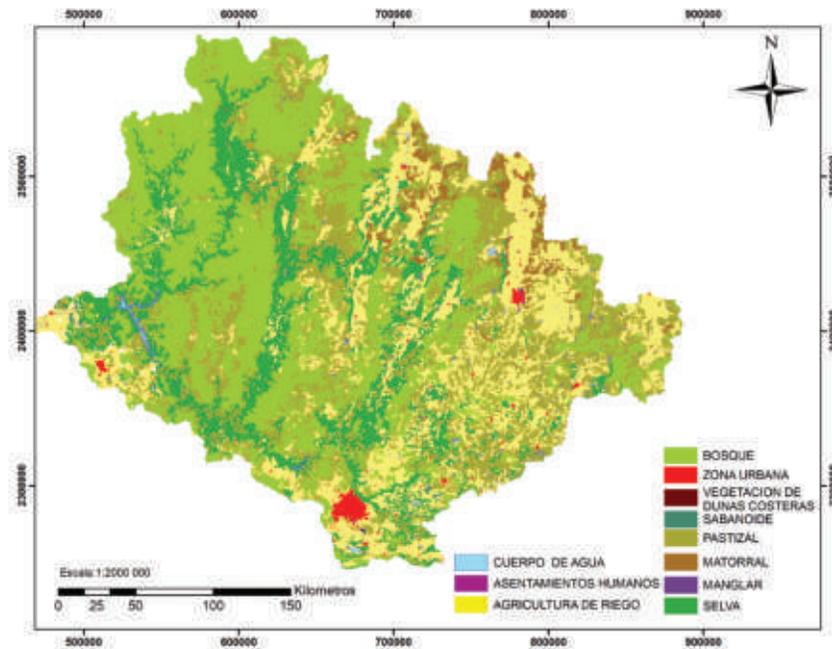


Figura III.17 Uso de suelo y vegetación en la cuenca de la presa Aguamilpa.

Los diferentes tipos de vegetación se relacionan a la altitud del lugar, para el caso de la cuenca del río Santiago los tipos de vegetación dominantes son: bosques de encino, bosques de pino-encino, selva baja caducifolia y selva tropical sub-caducifolia. En cuanto a la cobertura de zonas de cultivo se tiene un mayor predominio de agricultura de temporal en comparación con la de riego, por otra parte en lo que se refiere a zonas urbanas no se tienen áreas realmente significativas, ya que en su mayoría los asentamientos humanos corresponden a poblaciones rurales (INEGI, 2005).

Derivado de la variación climática en la cuenca, existe una variedad de comunidades vegetales. Para el caso de esta cuenca del río Santiago, al igual que la del Pánuco, se ubican dentro de una zona de transición entre la zona neotropical y neártica y por su extensión, juegan un papel importante en el establecimiento de diferentes coberturas vegetales.

En estas cuencas se encuentran bosque templado, bosque mesófilo de montaña, pastizal natural, matorral xerófilo, selva subhúmeda, manglar, vegetación hidrófila y gipsófila, así como grandes áreas de agricultura y pastizal inducido, una clasificación general del tipo de cobertura vegetal y uso de suelo se muestra en la figura III.17, donde se puede apreciar que existe un mayor predominio de zonas de cultivo, pastizal y bosque.

## 10. Ciclones

Los ciclones tropicales se pueden definir como tormentas marinas de gran extensión y particular estructura, cuya característica principal es la formación de vientos fuertes que giran alrededor de un centro de baja presión atmosférica en sentido contrario al de las manecillas del reloj; Australia y México se consideran mundialmente los países con mayor incidencia ya sea marginal o directa de ciclones tropicales, en este último los ciclones generalmente entran por el Océano Pacífico y Golfo de México.

La importancia de considerar la incidencia de ciclones en un país, desde el punto de vista hidrológico, radica en que un ciclón es equivalente a un conjunto de decenas o centenas de tormentas convectivas, las cuales tienen una marcada penetración hacia el interior del continente, esta incidencia de ciclones tropicales influye sobre el comportamiento hidrológico de las cuencas, su red de drenaje y su potencial de erosión, entre otros.

Estas tormentas de alguna forma también pueden determinar la fracción de la lámina de lluvia total anual que se encuentra en un solo año, afectando no solo a las cuencas tropicales donde generalmente se forman, sino también a las cuencas de las zonas áridas y semiáridas del país (Cotler, 2010).

En cuanto a los eventos registrados durante el periodo que abarca de 1970 a 2008 y que han tenido repercusión dentro de los límites de la cuenca en los últimos cinco años son los siguientes:

2003: Ciclón “Olaf”, categoría Tormenta Tropical cuya trayectoria se desarrolló entre el 3 y el 8 de octubre, alcanzando posteriormente la categoría de huracán I de la escala Saffir-Simpson con vientos máximos sostenidos de 120 km/h y rachas de 150 km/h. El día 7 de octubre, alrededor de la 2:00 de la mañana hora local, “Olaf” entró a tierra en los límites entre Colima y Jalisco, a 8 km al Sur-Suroeste de Cihuatlán, Jalisco. Por la noche de este día llegó a territorio del estado de Nayarit. El registro de lluvia máxima puntual en 24 horas originado por “Olaf” fue de 196.8 mm en Derivadora Jala, Colima, el día 6 de octubre.

2002: Ciclón “Kenna” categoría H4 (Huracán) el cual alcanzó la categoría 4 de la



Día nublado en la presa de Aguamilpa

escala Saffir-Simpson durante su trayecto sobre el mar y después impactó sobre tierra en el estado de Nayarit como categoría 4, con vientos máximos sostenidos de 270 km/h y rachas de 325 km/h; impactando a los estados de Nayarit, Jalisco, Durango, Sinaloa y Zacatecas.

2000: Ciclón “Norman” categoría Tormenta Tropical y Depresión Tropical, la cual avanzó sobre los estados de Colima y Jalisco, y después de salir al mar, entró a tierra a 25 km al Este-Noreste de Mazatlán, Sinaloa. Vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 90 km/h (CONAGUA, 2009).

1999: Ciclón “Greg” categoría H1 (Huracán) golpeó la costa, al sur de la península de Baja California y por su trayectoria cercana a la costa central del Pacífico, afectó con fuerte intensidad a los estados costeros de Colima, Guerrero, Michoacán y Jalisco. Vientos máximos sostenidos de 120 km/h, duración de 95 h, y un recorrido de 1,090 km, afectando a los estados Colima, Michoacán, Jalisco, Sinaloa, Baja California Sur y Sonora (CONAGUA, 2009). ☀

## Referencias

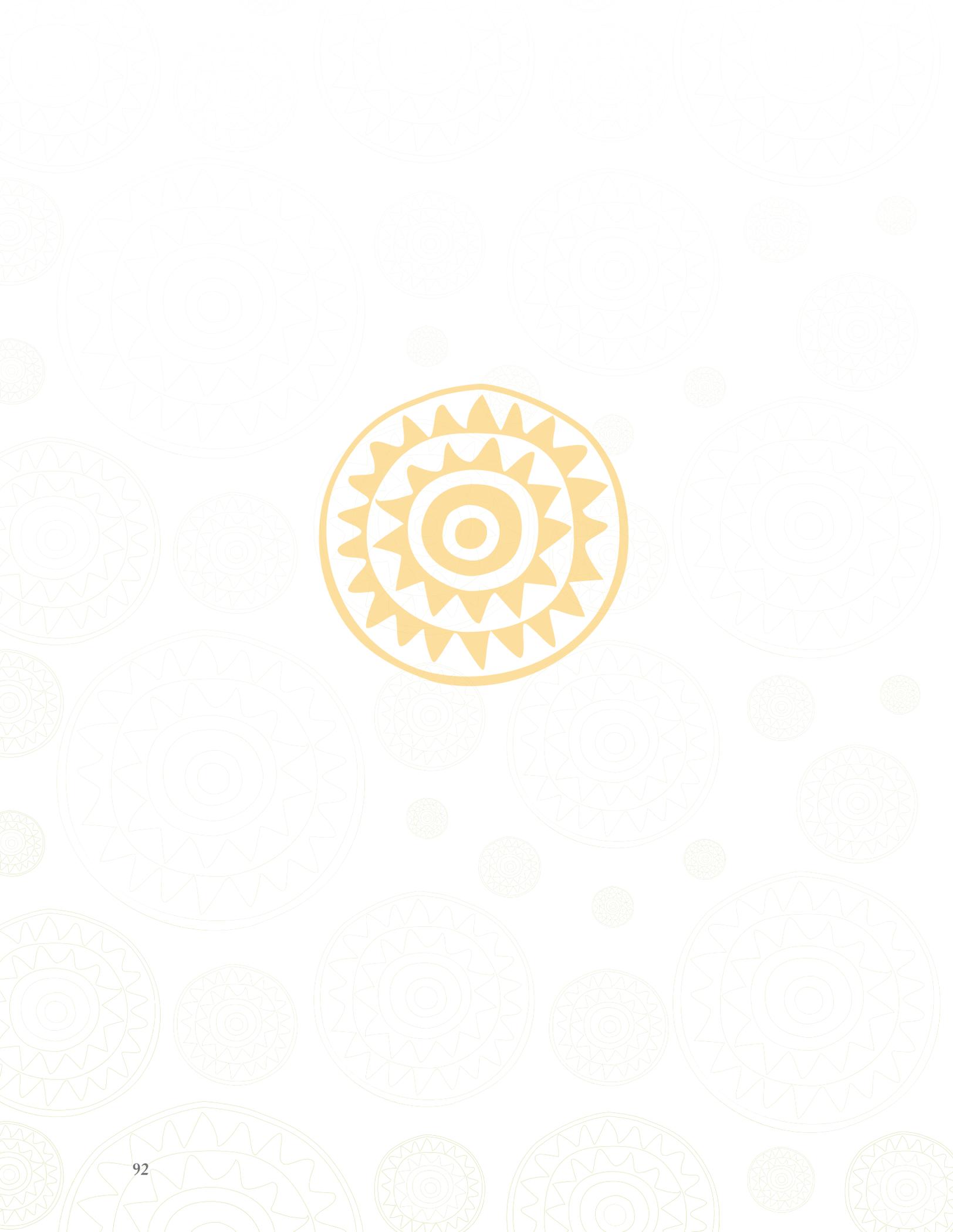
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)(2007) Cartografía digital Base de Datos SIGA-CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)(2010) Estadísticas del Agua en México, CONAGUA.
- Cotler, H (2010). Las cuencas Hidrográficas de México. Instituto Nacional de Ecología.
- Cotler, H, Mazari-Hiriart, M, de Anda-Sánchez, J (Editores) (2006). Atlas de la cuenca Lerma-Chapala: construyendo una visión conjunta. Instituto Nacional de Ecología-UNAM, México, D. F. México. 198 pp. ISBN 968-817-783-0
- Cruz David, B (2008). Introducción a la Geología-Fundamentos de Geología. Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales, Escuela de Geología
- Ferrari, L, Petrone, ChM, Francalanci, L, Tagami, T, Eguchi, M, Conticelli, S, Manetti, P, Venegas-Salgado, S (2003). Geology of the San Pedro – Seboruco
- Gómez-Tuena, A, Orozco-Esquivel, MT, Ferrari, L (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Temas Selectos de la Geología Mexicana. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.* 57: 227-283.
- INEGI (1991). Datos básicos de la geografía de México. Climas de México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2ª Edición. Aguascalientes, Aguascalientes. México. pp 79-95.
- INEGI (2009). Guía para la interpretación de cartografía, uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000 serie 111.
- INEGI (2006e). Continuo Nacional del Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación, 1:1 250 000, serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México. p. s/n.
- McVaugh, R (1994). Exploración botánica en Nueva Galicia y su importancia en la producción de una nueva Flora Novo-Galiciana. *Biol. Inst. Univ. De Guadalajara, Época 1:* 1-38.

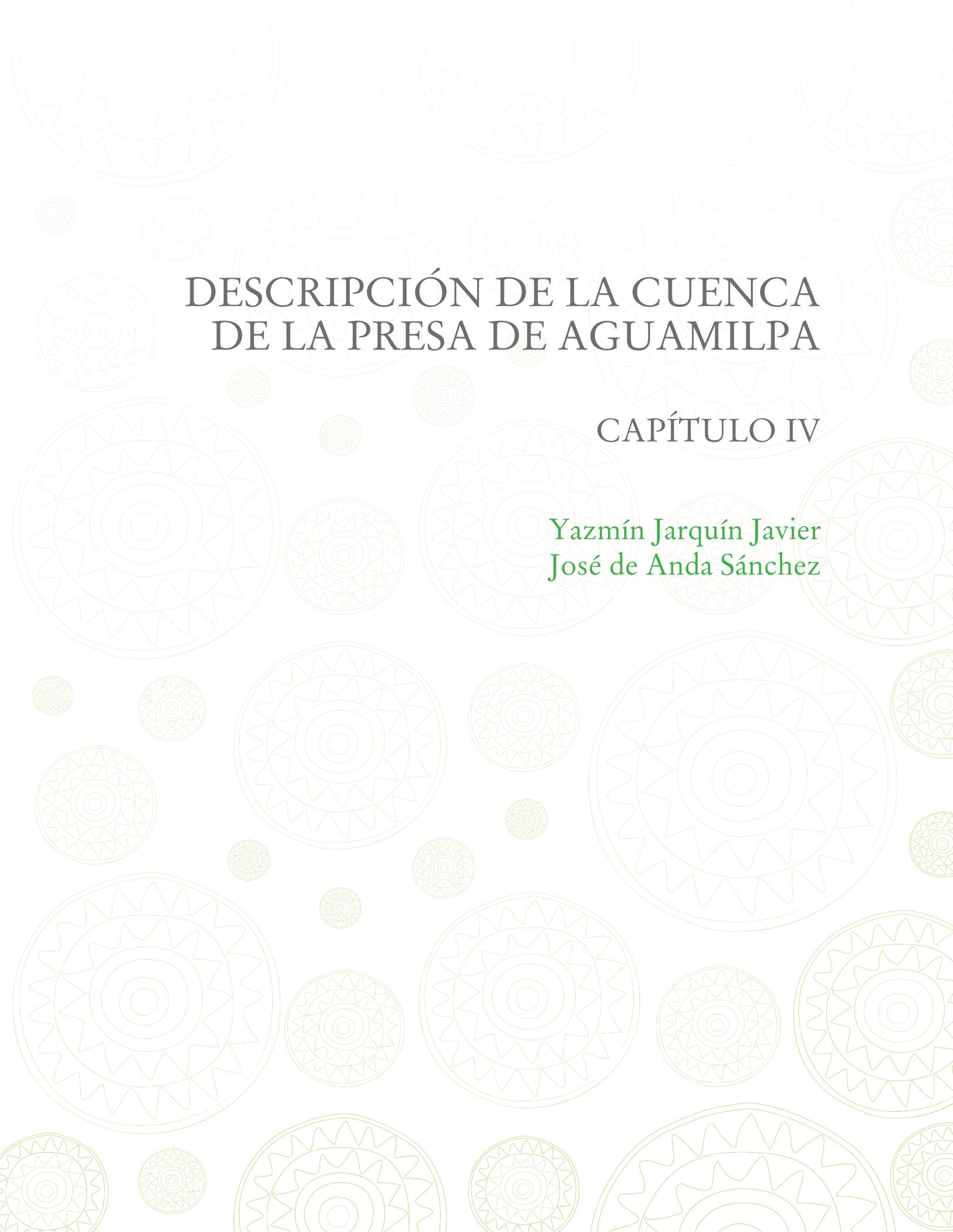
## Referencias de la Red

- INEGI(2011). <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/definiciones/provincia.cfm?c=444&e=04>
- Pérez-Rivera, A (2005). Instrumentación hidrometeorológica. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. Delegación Guanajuato. Memorias. Foro de infraestructura hidráulica y medio ambiente. Guanajuato, Guanajuato. México. <http://www.cmicgto.com.mx/memorias/25%20nov%20el%20cajon.pdf>.
- CONAGUA (2009). Portal de Publicaciones. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- IMTA (2010). Portal aguas subterráneas: <http://www.imta.mx>
- DIARIO OFICIAL (2009) Tomo DCLXXI No. 20. ACUERDO por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuíferos.
- Ortega Gutierrez, F, Mitre, SL, Roldan, QJ, Aranda, GJJ., Moran, ZD, Alaniz, AS, Nieto, SA (1992). Carta Geológica de la República Mexicana escala 1:2 000 000, Washington, Williams & Heinz (Mapa), Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Texto Explicativo. pp 1-78.

## Referencias cartográficas

- CONAGUA (2006). Información vectorial proporcionada en la Subgerencia de Información Geográfica del Agua.
- INEGI (2005). II Censo de población y vivienda 2005. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes. Aguascalientes. México.





# DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE LA PRESA DE AGUAMILPA

## CAPÍTULO IV

Yazmín Jarquín Javier  
José de Anda Sánchez



## 1. Localización geográfica

La cuenca Santiago-Aguamilpa es considerada la cuenca propia de la presa de Aguamilpa dado que ha sido delimitada por el INEGI, precisamente a partir de la formación del embalse de la presa y tomando en cuenta sus principales afluentes.



Esta cuenca forma parte de la cuenca del río Santiago, una de las cuencas principales definidas por CONAGUA dentro de la región hidrológica No.12 denominada Lerma-Santiago. La cuenca Santiago-Aguamilpa se ubica al oeste del estado de Nayarit aproximadamente entre los  $104^{\circ} 4.36' W$  y  $20^{\circ} 58' N$ ,  $105^{\circ} 27' W$  y  $22^{\circ} 04' N$  en la confluencia con el Océano Pacífico (Figura IV.1). Compreendida dentro de la cuenca del río Santiago tiene una superficie aproximada de  $6,311.74 \text{ km}^2$  lo que equivale al 8.19 % de la superficie total de la cuenca.

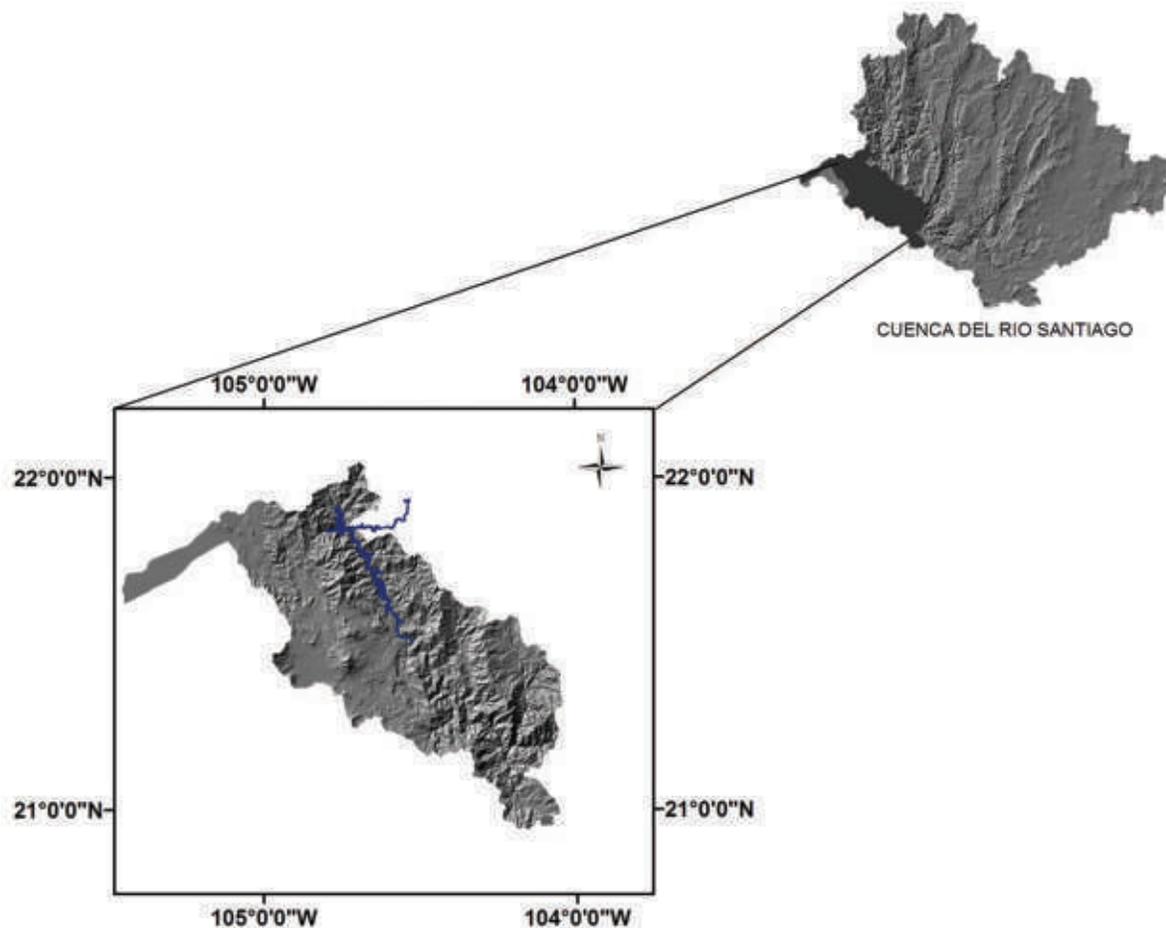


Figura IV.1 Ubicación geográfica de la cuenca Santiago-Aguamilpa.

Colinda al norte con las cuencas del río Huaynamota (RH12L) y con la cuenca del río San Basilio (RH11A); al este con las cuencas del río Bolaños (RH12K) y con la del río Santiago-Guadalajara (RH12E); al sureste con la cuenca de la presa La Vega-Cocula (RH14A), al sur con la cuenca del Arroyo Ameca-Atenguillo (RH14B), al oeste con la cuenca hidrológica RH13B en el estado de Nayarit (SPP, 1981; DOF, 2006).



Esta cuenca cuenta con ocho estaciones hidrométricas y una estación climatológica localizada en la localidad de Antonio Escobedo (Jalisco). Los principales cuerpos de agua son las presas Palo Verde, El Trigo, Labor de Guadalupe, Coatepec y la gran presa de Aguamilpa así como el lago-cráter de Santa María del Oro (SPP, 1981; INEGI, 2004). El agua superficial se destina preferentemente para el uso agrícola en dos distritos de riego: Teitlán (DR43fg) y río Santiago margen izquierda (DR43e); y en menor escala para el uso doméstico y pecuario (SPP, 1981).

En cuanto al entorno geográfico, se debe resaltar que es un factor que se considera de gran importancia, pues sus características y cambios repercuten y son reflejados en el estado ambiental del embalse. Por tal razón se hace una descripción general de los aspectos geográficos más relevantes de la cuenca Santiago-Aguamilpa.

## *2. Hidrología superficial*

En cuanto a la hidrología superficial se puede mencionar que el área de la cuenca es drenada por una serie de corrientes intermitentes, y perennes, sobresaliendo la del río Grande de Santiago, el que a la vez sirve como límite político-administrativo entre Jalisco y Nayarit. Cabe destacar que en el curso final del río Santiago antes de su desembocadura con el Océano Pacífico, existen varios esteros y en la época de lluvias se generan áreas de inundación.

El escurrimiento en el río Santiago a la altura de la presa Aguamilpa se considera bastante variable, de acuerdo a los registros de gasto medio en un mes de estiaje, éste puede oscilar entre 8 y 180 m<sup>3</sup>/s, y entre 95 y 2,000 m<sup>3</sup>/s en un mes lluvioso; el gasto medio anual histórico es de 220 m<sup>3</sup>/s.

Con base en la información de las estaciones hidrométricas y climatológicas localizadas en la cuenca del río Santiago se determinaron las avenidas máximas para diferentes períodos de retorno, y con el criterio de precipitación máxima probable y transposición de ciclones, la avenida de diseño para el vertedor. Para la obra de desvío se consideró la avenida máxima histórica registrada el 17 de agosto de 1973 que equivale a la de Tiempo de Retorno (Tr) de 50 años (CFE, 1991).

El río Grande de Santiago procedente del centro del país, cruza varios Estados de la República y entra a Nayarit por Analco, recorre 265 kilómetros y desemboca en el Océano Pacífico, justamente en las costas de Nayarit (Boca del Azadero). En su curso recibe los aportes de los ríos o arroyos de Bolaños, La Palmilla, Brasiles, Jora Viejo, Huaynamota; y por el izquierdo los de Santa Fe y Palmillas (Figura IV.2).

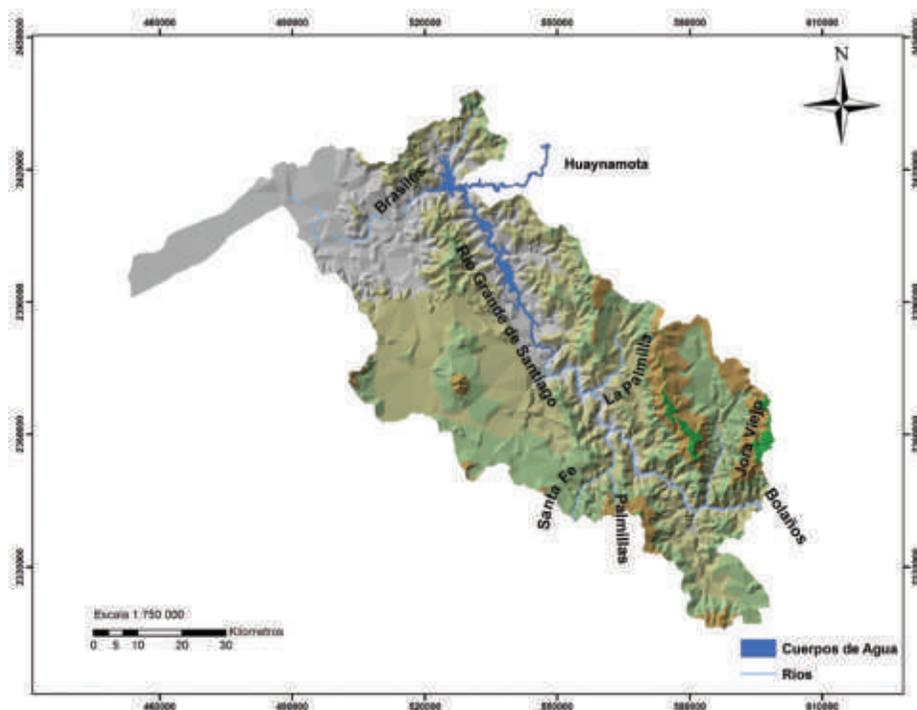


Figura IV.2 Hidrología superficial en la cuenca Santiago-Aguamilpa.



Conformaciones de rocas en la vertiente del río Huaynamota en el embalse de Aguamilpa.

### *3. Topografía*

La topografía de la cuenca está definida principalmente por lomeríos y cerros escarpados, que están expuestos en la zona de transición entre la propia Sierra Madre Occidental y la provincia Llanura Costera del Pacífico, así también se puede apreciar una topografía de cadenas montañosas de formas volcánicas escarpadas, valles intermontanos y cañones con perfiles en “V”, producto de fuertes emisiones piroclásticas provenientes de numerosas calderas; esta secuencia volcánica alcanza en algunos sitios espesores superiores a los 1,000 m.

En lo que corresponde a la zona del Eje Neovolcánico éste se constituye por una cadena de volcanes que forman parte del llamado Cinturón de Fuego del Pacífico, caracterizado por su gran actividad volcánica. Inicia en el estado de Nayarit y corre al oriente aproximadamente sobre la línea del paralelo 19°, formando numerosos valles de tierras altas. Esta cordillera se distingue porque en ella se localizan algunas de las mayores elevaciones del país (Figura IV.3)

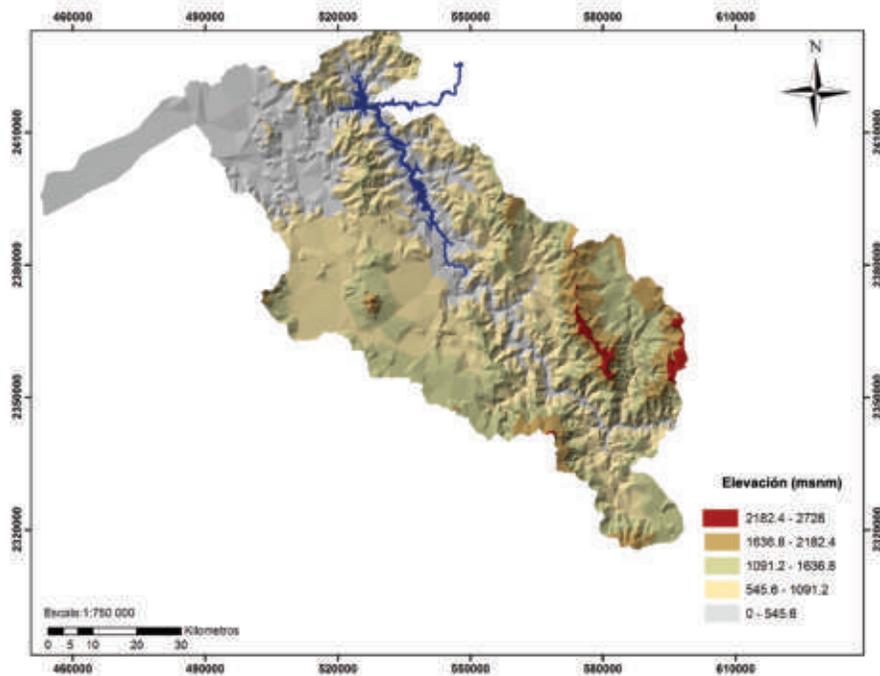


Figura IV.3 Topografía cuenca Santiago-Aguamilpa.

La topografía correspondiente a la zona de la provincia Llanura Costera del Pacífico es angosta y alargada, tiene una orientación noroeste-sureste y sigue de forma burda la dirección de la línea de costa; está cubierta en su mayor parte por depósitos aluviales acarreados por los ríos que bajan al mar desde la Sierra Madre Occidental; por lo que su topografía está definida principalmente por la acción de las mareas que han reabajado los sedimentos deltaicos y han dado lugar a la formación de barras, las cuales originaron lagunas, esteros y marismas. En Nayarit está representada por la subprovincia Delta del río Grande de Santiago.



Conformaciones de rocas en la vertiente del río Huaynamota en el embalse de Aguamilpa.

#### 4. Geología

La cuenca Santiago-Aguamilpa se localiza en la parte suroeste de la Sierra Madre Occidental, la cual se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas con un marcado predominio de rocas ígneas extrusivas (Figura IV.4), cuyo tipo corresponde especialmente a riolita-toba ácida y basalto de la era del Cenozoico, (Figuras IV.5 y IV.6) intrusionadas por diques de origen diverso. Las rocas volcánicas extrusivas han sido clasificadas en tres unidades: la inferior es la unidad Aguamilpa, la intermedia unidad Colorines y la superior unidad Picachos. La primera está formada por ignimbrita masiva en tanto que las otras dos presentan pseudoestratificación. Las principales características estructurales geológicas detectadas en el sitio corresponden a seis fallas con orientación general NE-SW, conocidas como sistema Colorines.

Cuatro de estas fallas se localizan en la margen derecha y afectan las obras de generación; las otras dos se localizan en la margen izquierda y una de ellas involucra la obra de desvío y el vertedor. Se encuentran también cuatro sistemas principales de fracturas que muestran mayor continuidad horizontal que vertical (CFE, 1991).

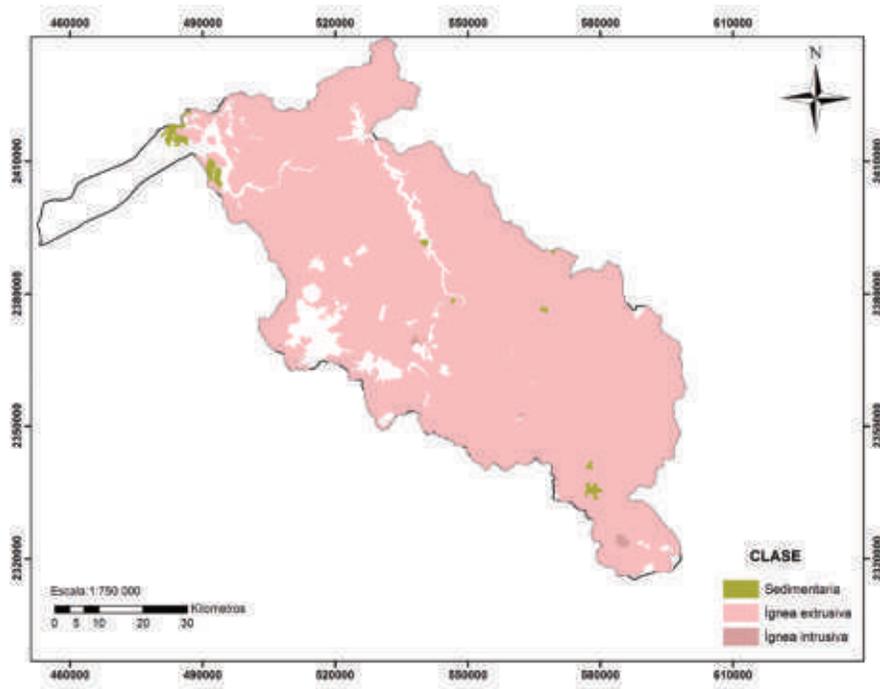


Figura IV.4 Geología (clase) cuenca Santiago-Aguamilpa.

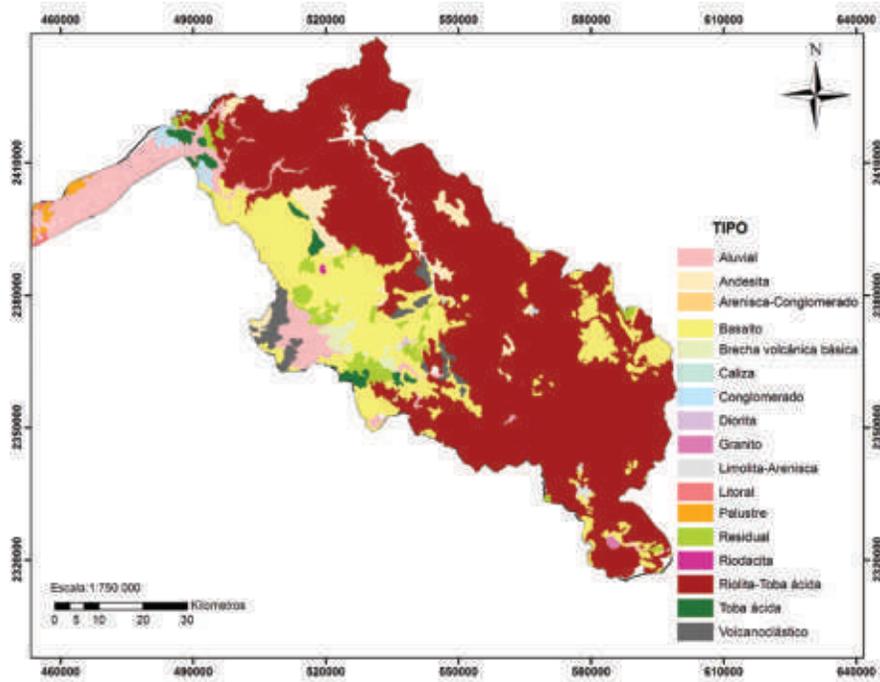


Figura IV.5 Geología (tipo) de la cuenca Santiago-Aguamilpa.







Formación rocosa con aspecto de rostro humano en la vertiente del río Huaynamota.

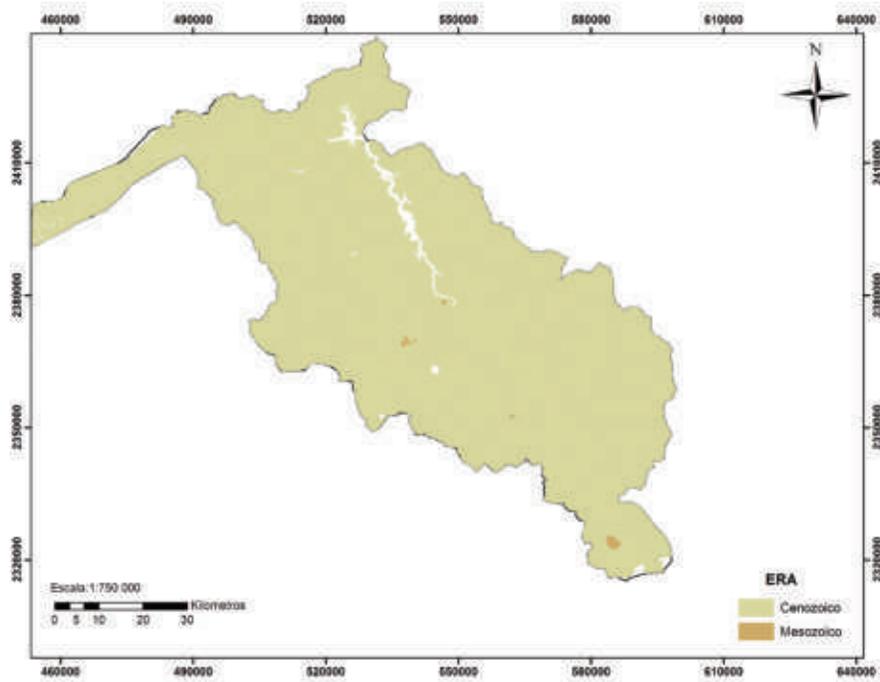


Figura IV.6 Eras geológicas en la cuenca Santiago-Aguamilpa.



Selva baja caducifolia en la cuenca Santiago-Aguamilpa.

## 5. Fisiografía

En cuanto a las características fisiográficas de la cuenca Santiago-Aguamilpa, en general, se puede decir que las unidades morfológicas predominantes son las de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico, con una menor área correspondiente a la Llanura Costera del Pacífico (Figura IV.7).

El área de la cuenca Santiago-Aguamilpa correspondiente al Eje Neovolcánico es un área que colinda al norte con la Llanura Costera del Pacífico y rodeada por la Sierra Madre Occidental, su característica principal es la constitución de su masa por rocas volcánicas de diferentes tipos acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás) hasta el presente, que han dado forma a sierras volcánicas, grandes coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas.

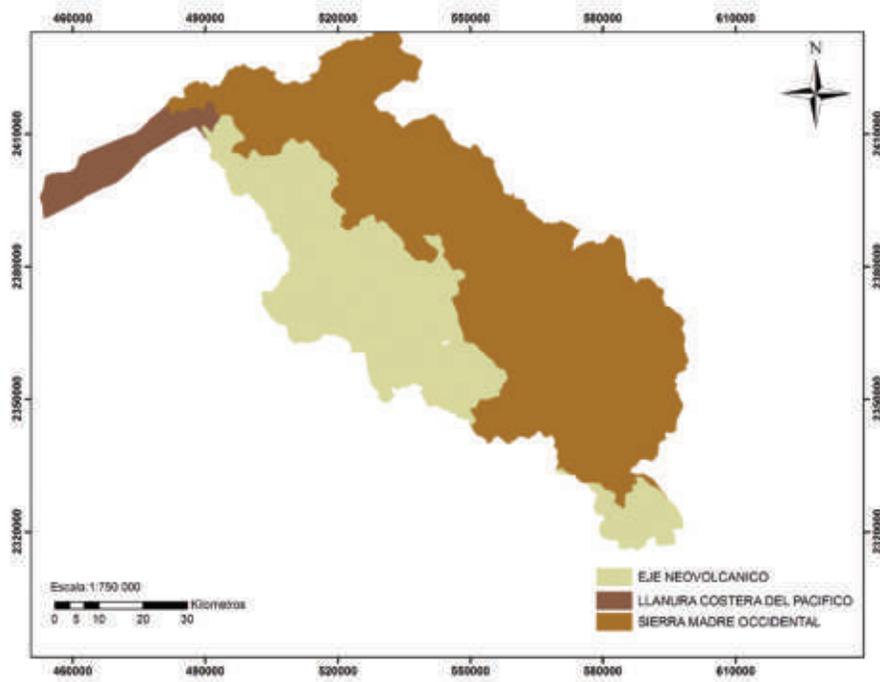


Figura IV.7 Provincias fisiográficas en la cuenca Santiago-Aguamilpa.

Otro rasgo esencial de la provincia es la existencia de las amplias cuencas cerradas, ocupadas por lagos que se han formado por bloqueo del drenaje original, debido a lavas u otros productos volcánicos, o por el fallamiento, que es otro rasgo característico de la provincia. Un área rodeada de fallas se hunde y forma una depresión llamada "graben" que se llena de agua; este es el origen del lago de Chapala.

La provincia de la Sierra Madre Occidental es un gran sistema montañoso que tiene sus orígenes en el Terciario Inferior o Medio, y presenta una topografía abrupta integrada por materiales volcánicos cuyos espesores oscilan entre 1,500 y 1,800 m. Predominan rocas ácidas (ricas en sílice) e intermedias (medias en sílice). Es una sierra, cuyas elevaciones en general se levantan hasta los 2,500, aunque dentro de la cuenca la máxima elevación que se tiene es de aproximadamente 2,700 msnm.

Es un área con una particular conjunción de actividad tectónica, rasgos litológicos, distribución de fracturas y procesos erosivos hídricos, que han propiciado la excavación de profundísimos cañones cuyos ejemplos más espectaculares se encuentran precisamente sobre las vertientes occidentales de la sierra.

Finalmente, en cuanto a las características de la provincia Llanura Costera del Pacífico está constituida por una llanura costera angosta y alargada cubierta en su mayor parte por los aluviones depositados por los ríos que bajan al mar desde la Sierra Madre Occidental. Todos han formado deltas en los litorales, como los del río Grande de Santiago, región en donde se ha integrado, al norte de San Blas, un sistema de barras paralelas.

## 6. *Uso de suelo y vegetación*

La vegetación en la cuenca Santiago-Aguamilpa es dominada principalmente por cuatro rubros que ocupan el mayor porcentaje de cobertura de área: selva, bosque, pastizal y agricultura (Tabla IV.1) (Figura IV.8).

<b>TABLA IV.1 DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN LA CUENCA SANTIAGO-AGUAMILPA.</b>		
<b>Cobertura</b>	<b>Área</b>	<b>%</b>
Agricultura	1,012.06	16.03
Bosque	1,748.07	27.70
Manglar	11.60	0.18
Pastizal	1,343.45	21.29
Sabanoide	27.24	0.43
Selva	1,985.87	31.46
Cuerpos de agua	118.25	1.87
Zona Urbana	65.16	1.03
<b>TOTAL</b>	<b>6,311.7016 km<sup>2</sup></b>	<b>100</b>

En lo que concierne a la cobertura de selva, ésta se subdivide en baja caducifolia y mediana subcaducifolia, la primera tiene como principal característica que presenta en relación a su grado de humedad, una estación de secas y otra de lluvias muy marcadas a lo largo de año, además de que los árboles que integran este grupo tiran la totalidad de sus hojas durante la temporada seca del año y producen nuevas en la época de lluvias.

Los árboles representantes de este tipo de vegetación se distinguen porque presentan troncos cortos, robustos y torcidos con ramificaciones cercanas a la raíz

y su altura no rebasa los diez metros en promedio. Por otra parte la selva mediana subcaducifolia es muy parecida en apariencia a la selva alta perennifolia, de la que se diferencia porque una alta proporción de los árboles (del 25 al 75%) pierden las hojas durante el estiaje.

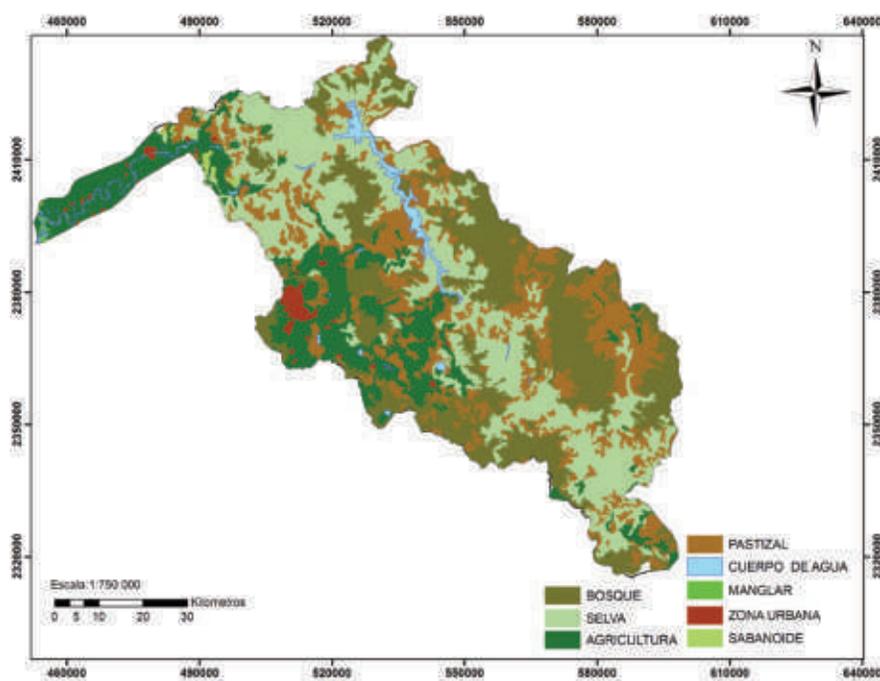


Figura IV.8 Uso de suelo y vegetación en la cuenca Santiago-Aguamilpa.

En lo que concierne a la cobertura de bosque, ésta se integra principalmente por bosques de encino con algunas áreas de pino y en menor porcentaje bosque mesófilo de montaña; cabe mencionar que estos últimos son los ecosistemas terrestres más amenazados a nivel nacional. Son bosques de elevada importancia debido a la extraordinaria biodiversidad que albergan y a los servicios hidrológicos que proveen. Sin embargo, en esta parte de Nayarit este bosque se considera que se encuentra en buen estado de conservación dado que el nivel de fragmentación antropogénico es relativamente bajo (CONABIO, 2007).

Por otra parte, el pastizal ocupa el tercer lugar en porcentaje de cobertura dentro de la cuenca, se encuentra distribuido de manera uniforme conformado por pastizal inducido y cultivado, el primero se considera una característica importante ya que este tipo de pastizal se desarrolla en zonas donde la vegetación



natural ha sido eliminada, su desarrollo comienza en zonas donde previamente existió bosque, selva, matorral o en áreas agrícolas abandonadas; por otra parte el pastizal cultivado se encuentra en menor proporción en la cuenca y es aquel que se ha introducido intencionalmente en una región y para su establecimiento y conservación se realizan algunas labores de cultivo y manejo. Estos pastizales son los que generalmente forman los llamados potreros en zonas tropicales, por lo general con buenos coeficientes de agostadero, lo que puede ser un indicativo de la existencia de ganadería.

Finalmente, en cuanto a la cobertura de agricultura, se tiene detectada la existencia de agricultura de temporal en mayor proporción y de riego, esta última es un tipo de agrosistemas que utilizan agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola, por lo que su definición se basa principalmente en la manera de cómo se realiza la aplicación del agua, y su distribución se ubica mayormente en la planicie costera de la cuenca, mientras que la agricultura de temporal se caracteriza por depender del agua de lluvia por lo que su éxito depende de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua.

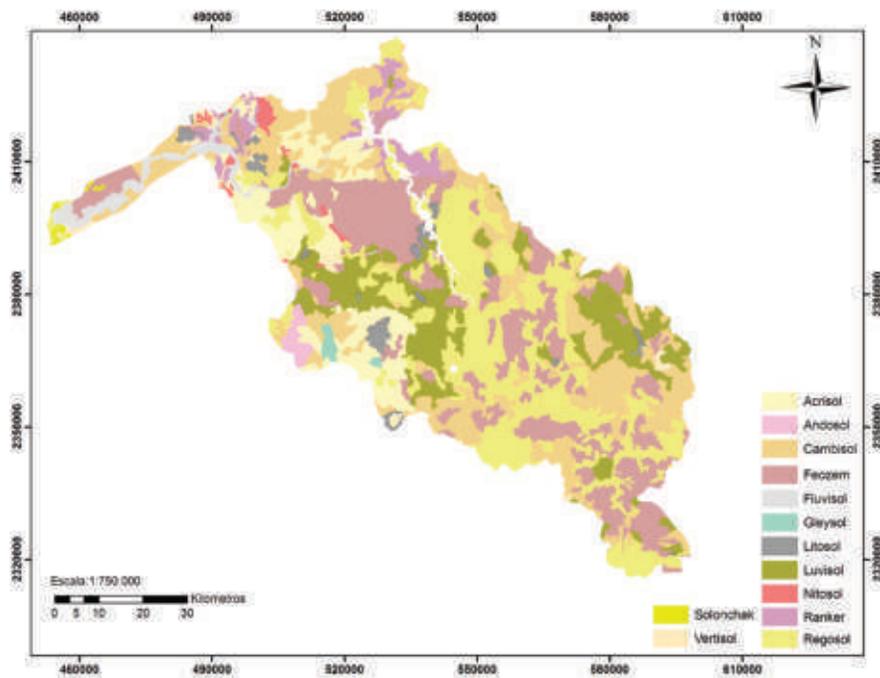


Figura IV.9 Edafología en la cuenca Santiago-Aguamilpa.

## 7. Edafología

La edafología de la cuenca Santiago-Aguamilpa se define principalmente por suelos de tipo acrisol, cambisol, feozem y regosol (Figura IV.9). Los suelos de tipo acrisol son suelos que se encuentran en zonas tropicales o templadas muy lluviosas. Se caracterizan por tener acumulación de arcilla en el subsuelo, por sus colores rojos, amarillos o amarillos claros con manchas rojas, muy ácidos y pobres en nutrientes; el uso más adecuado para la conservación de estos suelos es el forestal. Son considerados moderadamente susceptibles a la erosión.

Los suelos de tipo cambisol son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas. Estos suelos se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. Los suelos feozem son de profundidad muy variable, los más profundos se utilizan para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con rendimientos altos, y los de baja profundidad generalmente se utilizan para ganadería y se erosionan con más facilidad.

## 8. Clima

La suma de los elementos meteorológicos que actúan a lo largo de un periodo de años origina el clima característico para una región, que puede distinguirse con relativa facilidad de otro u otros contiguos, en donde los elementos meteorológicos que intervengan presenten otra composición o intensidad.

En lo que concierne a las características climatológicas de la cuenca Santiago-Aguamilpa se puede destacar que la precipitación media en la cuenca del río Santiago es de 723 mm y 87% de ésta ocurre en el periodo de junio a octubre. La temperatura media anual es de 18.3°C (INEGI, 1991; Pérez-Rivera, 2005). En la cuenca existen dos climas dominantes: el templado sub-húmedo y cálido sub-húmedo (INEGI, 1991; Pérez-Rivera, 2005).

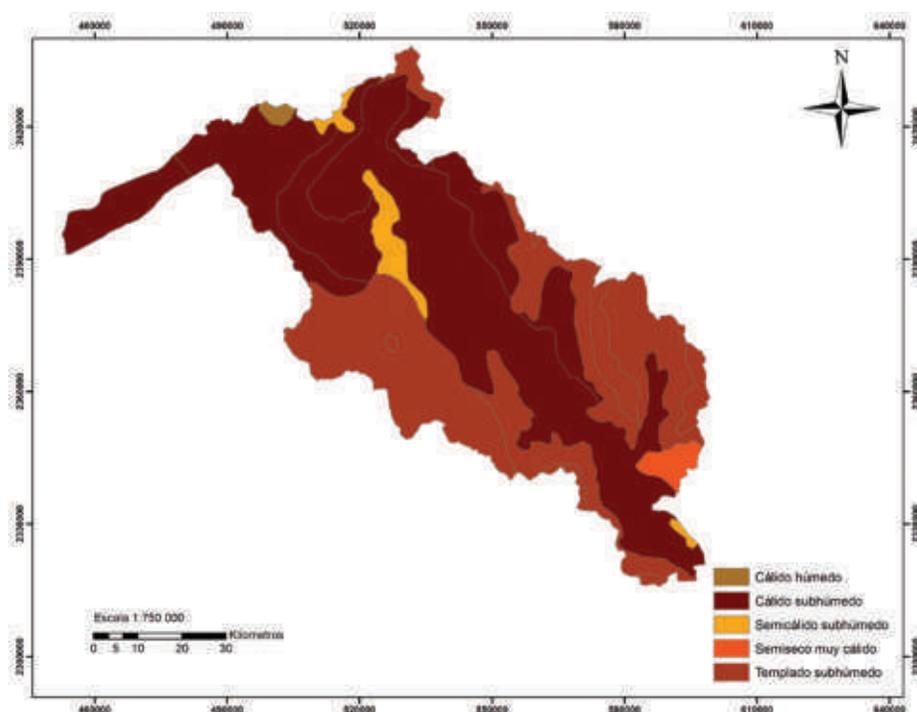


Figura IV.10 Clima en la cuenca Santiago-Aguamilpa.

El primero es un tipo de clima que en general presenta un promedio de temperatura media del mes de 18 °C, mientras que en los cálidos subhúmedos su temperatura media del mes es en promedio de 18°C para el mes más frío (Figura IV.10).







## 9. Central Hidroeléctrica Aguamilpa Solidaridad

La importancia del Proyecto Hidroeléctrico de Aguamilpa es notoria. La potencia instalada de 960 MW, la ubica como la cuarta planta hidroeléctrica del país y la generación de 2,131 KWh/año la coloca en el quinto lugar. Además, Aguamilpa provee de riego a 120,000 ha que, con dos cosechas al año, elevan considerablemente el potencial agrícola de esta zona de Nayarit (Revista Obras Públicas, 1997).

Desde su concepción fue mencionada la posibilidad de estabilizar 60,000 ha de ciénegas y un mejor aprovechamiento de las lagunas litorales. Por la magnitud de las obras y su programa de construcción Aguamilpa demandó durante su construcción hasta 5,500 trabajadores (CICCP, 1997). Las inundaciones que afectaban regularmente a 19 poblados y que inundaban hasta 70,000 ha de la planicie del río Santiago, fueron controladas por la presa incluso durante su proceso constructivo. Fue necesario cavar túneles para desviar el cauce del río en tanto se construía la cortina de contención.



Vista de la cortina de enrocamiento de la presa de Aguamilpa.

Así en agosto de 1990 se presentó una avenida de  $5,100 \text{ m}^3/\text{s}$  y en enero del año 1992 el fenómeno meteorológico “El Niño” provocó una avenida inusitada de  $10,800 \text{ m}^3/\text{s}$  de caudal punta (avenida extraordinaria), que afortunadamente fue de corta duración, lo que permitió su regulación por la obra sin daños a la misma (CICCP, 1997). Por su magnitud, el proyecto necesitó muchos esfuerzos y hasta recursos adicionales del Banco Mundial y de varias compañías extranjeras.

En relación con las otras centrales hidroeléctricas del Sistema Nacional, Aguamilpa ocupa el cuarto lugar después de Chicoasén, Malpaso e Infiernillo, y produce al año más del 10% de lo que generan todas las hidroeléctricas existentes.

## *10. Características constructivas*

En cuanto a las características generales de la presa Aguamilpa se puede decir que el área del embalse es de  $110 \text{ km}^2$ , con una capacidad de  $5,540 \text{ Mm}^3$ , una capacidad útil de  $2,629 \text{ Mm}^3$  y un gasto medio anual de  $220 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Vista del vertedero de la presa de Aguamilpa.

Respecto a las características principales de la cortina se puede mencionar que es del tipo aluvión, enrocamiento con cara de concreto y escollera con pantalla de hormigón, con una altura máxima de 187 m, la elevación de la corona se localiza a 235 msnm, la longitud de la corona es de 655 m, y tiene un ancho de 6.05 m, los taludes agua abajo son de 1.4:1, y los taludes aguas arriba son de 1.5:1.

El vertedor es tipo canal a cielo abierto con muro separador y longitud de cresta de 72 m, elevación de la cresta 210 msnm, gasto máximo 14,900 m<sup>3</sup>/s, seis compuertas de 12 x 19.5 m (CFE, 2010); volumen del NAMO<sup>1</sup> 5,540 Hm<sup>3</sup>, volumen del NAME<sup>2</sup> 6,950 Hm<sup>3</sup>, elevación del NAMO de 220 msnm, y elevación del NAME de 232 msnm (SIGA-CONAGUA, 2009).

El elemento principal de impermeabilización de la presa es precisamente la pantalla de hormigón, el diseño estructural de la presa se caracterizó en su tiempo por (Merengo, 2010):

- Losa construída en tres etapas;
- Utilización del concepto de sección prioritaria;
- Utilización de fusible para protección de la presa y ataguía;
- Gravas aguas arriba y enrocado aguas abajo;
- Colocación de gravas con bandas transportadoras y el enrocamiento con camiones;
- Muro parapeto en cajón.

La central hidroeléctrica es subterránea, de 134 m de largo por 23 m de ancho y 50 m de altura, aloja tres turbinas Francis en posición vertical de 320 m de longitud. Se alimenta a través de la toma de agua, de la que nacen los tres conductos a presión que conduce el agua a las turbinas. Una galería de oscilación y el túnel de desagüe restituyen el flujo de agua del río.

La energía producida es conducida por barras hasta la plataforma exterior de transformadores, donde también se localiza la subestación. Todas las estructuras de generación se localizan en la margen derecha. En las tablas IV.2 y IV.3 se proporciona mayor información sobre las características de diseño del sistema de la presa, así como datos generales del proyecto.



Compuerta del vertedero de la Presa de Aguamilpa.

<b>TABLA IV.2 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL SISTEMA PRESA HIDROELÉCTRICA AGUAMILPA (CICCP, 1997).</b>	
<b>HIDROLOGÍA:</b>	
Área de la cuenca	73,834 km <sup>2</sup>
Aportación anual	6,775 Mm <sup>3</sup>
<b>EMBALSE:</b>	
Volumen	5,540 Mm <sup>3</sup>
Superficie	109 km <sup>2</sup>
<b>PRESA:</b>	
Altura	187 m
Longitud	642 m
Volumen	14 Mm <sup>3</sup>
Aliviadero	Controlado a cielo abierto
Caudal de diseño	17,500 m <sup>3</sup> /s para T=10,000 años
<b>CAPACIDAD MÁXIMA DE DESCARGA</b>	
Turbinas	14,900 m <sup>3</sup> /s Tipo Francis de 368 MW de potencia máxima
Salto neto máximo	157.3 m
Velocidad	150 rpm
Caudal	240 m <sup>3</sup> /s

<b>TABLA IV.3 DATOS GENERALES DEL PROYECTO PRESA HIDROELÉCTRICA AGUAMILPA (CICCP, 1997)</b>	
<b>FICHA TÉCNICA</b>	
Promotor	Comisión Federal de Electricidad
Proyectista	Jefatura del Proyecto Hidroeléctrico de Aguamilpa
Empresa constructora	Ingenieros Civiles y Asociados, S. A. de C. V. (ICA)
Presupuesto	941.3 millones de dólares USA
Plazo de ejecución	Octubre 1989 a Agosto 1994



Compuerta de alivio de la Presa de Aguamilpa.



Turbina hidroeléctrica de la Presa de Aguamilpa.



Diferentes vistas del cuarto de máquinas.





Diferentes vistas del cuarto de máquinas.





Vista del río Santiago desde el camino de ascenso por la pared de enrocamiento de la presa de Aguamilpa.

## *11. Hidrometría*

La presa de Aguamilpa tiene registrado un nivel máximo histórico de llenado de 226.42 msnm (el 22 de septiembre de 2003) y un mínimo de 192.87 msnm (el 8 de junio de 2001), un cierre de desvío el 25 de junio de 1993 y un gasto de cierre de 360 m<sup>3</sup>/s.

La Central Hidroeléctrica de Aguamilpa cuenta con una red de estaciones hidroclimáticas localizadas en los estados de Jalisco, Zacatecas, Durango y Nayarit que reportan en tiempo real la información hidrométrica y climatológica, con la finalidad de predecir avenidas extraordinarias hacia la presa con una anticipación mínima de 12 horas.

El monitoreo de los niveles del embalse se realiza cada seis horas en épocas de estiaje y cada hora durante el periodo de lluvias, lo que garantiza un manejo confiable y seguro de su operación. Esta información es transmitida a la Comisión Nacional del Agua durante los 365 días del año (Pérez, 2008).



Líneas de alta tensión en la central hidroeléctrica de Aguamilpa.







Acumulación de sedimentos en la entrada del río Huaynamota al embalse.

## 12. Aspectos ambientales

Contrario a lo manifestado en el proyecto de Aguamilpa (CICCP, 1997), la WCD (2000) menciona que las presas afectan severamente a las lagunas costeras dado que éstas evitan la llegada de sedimentos y agua dulce, por lo que se aumenta la salinidad del sistema y en función de las condiciones marinas, pueden presentarse fenómenos erosivos al no haber aporte de sedimentos nuevos.

Basándose en el análisis de imágenes satelitales Ortiz-Pérez y Romo-Aguilar (1994) se plantearon como posible consecuencia de la construcción de la presa de Aguamilpa, la desaparición de las estructuras meándricas del río Santiago en su desembocadura al Océano Pacífico, debido a la modificación del escurrimiento al quedar controlado el régimen de flujo del río por la propia presa y dos represas más construidas en el curso aguas abajo del río. De esta forma el régimen natural de flujo quedaría supeditado a la demanda de agua derivada de la necesidad de generación de energía eléctrica y para cubrir los requerimientos del riego agrícola, satisfactorios que son totalmente distintos a los del funcionamiento de los ecosistemas del delta del río Santiago.

Por otro lado, la situación anteriormente explicada implica un cambio irreversible, ya que al quedar anulado el patrón de sedimentación se modifica éste a un arreglo exclusivamente de erosión, con el consecuente retroceso de la línea de costa y la pérdida de tierras.

La erosión se hará sentir sobre las dos márgenes del río al ir desapareciendo el equilibrio existente del patrón meándrico caracterizado por la acumulación y la socavación alternante de las riberas. El papel del corte erosivo de la disección trae como consecuencia la profundización del lecho fluvial, permitiendo condiciones muy propias a la penetración de la intrusión salina migrando río arriba, encadenándose con ello nuevos fenómenos derivados de la influencia salina, como el de la aridez fisiológica de las comunidades costeras al ser reemplazadas por la expansión de nuevos espacios para las marismas a costa de terrenos de uso agrícola y selvas; modificándose rápidamente los hábitat naturales, heredados de una historia de miles de años, cuyos efectos son todavía imprevisibles en toda su dimensión (Ortíz-Pérez y Romo-Aguilar 1994).



Vegetación local creciendo sobre los acantilados del embalse.



Patos buzos (cormoranes) sobre ramas emergidas.

Igualmente se han hecho evaluaciones sobre las afectaciones a la cobertura de mangle en la desembocadura del río Santiago a raíz de la construcción de la presa de Aguamilpa y de la ampliación de la frontera agrícola derivada de la mayor disponibilidad de agua dulce. Se ha estimado que de 1970 a 1993 había desaparecido el 32% del área de manglares en esta región, lo que significa igualmente una disminución dramática de la biodiversidad asociada a este ecosistema (Ramírez-García *et al.* 1998).

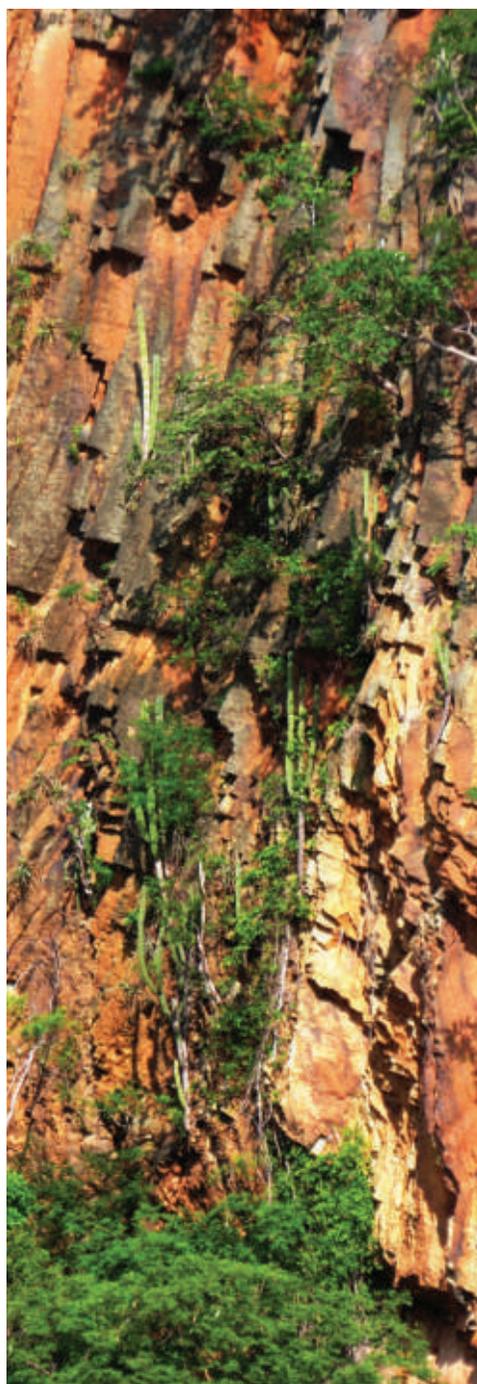
Hoy en día se sabe que la tasa de pérdida de manglar en el estado de Nayarit es de las más altas de México alcanzando un 2.46% superior a la media anual en la costa del Pacífico (INE, 2005). Sin embargo, además de la influencia de la construcción de la presa de Aguamilpa en la superficie de manglar en el estado de Nayarit, también existe una actividad extractiva para el aprovechamiento del manglar como recurso forestal, lo cual ha tenido poco control en su explotación (Valdez-Hernández, 2002).

Desde el punto de vista social, la construcción de la presa de Aguamilpa requirió la relocalización de aproximadamente mil habitantes, la mayoría de ellos indígenas

huicholes, desarrollándose un análisis de impacto sobre poblaciones indígenas de acuerdo con los criterios del Banco Mundial que no eran considerados indispensables para la CFE.

Estas previsiones especiales fueron establecidas y aseguradas para que los indígenas fueran beneficiados por la construcción de la presa. Las pasadas experiencias de otras instituciones que habían trabajado con los indígenas huicholes, sugirieron que la resistencia de los indígenas podría colapsar el proyecto y los planes de la CFE. Los indígenas perdieron aproximadamente 13,000 ha de las cuales 698 estaban destinadas a la agricultura y 2,536 ha para el pastoreo de ganado bovino y caprino. Colateralmente deberían perder 224 viviendas más cuatro escuelas, varios kilómetros de carretera y tres templos tradicionales ("calihuey" y varios "ririquis") (Salomon, 1999). Actualmente la presa de Aguamilpa tiene un alto potencial pesquero en donde la captura se da principalmente en seis especies comerciales: tilapia, lobina, carpa, bagre, chihuil y arroyera.

El incremento en la producción pesquera en la presa ha sido sostenido alcanzando en el año 2005 las 4,363.6 toneladas, siendo la tilapia la especie más capturada con un 99.7% del total (Ulloa-Ramírez *et al.*, 2006). Poco a poco la acuicultura en este reservorio va constituyendo un potencial para el desarrollo económico regional, por lo que la cantidad y calidad del agua se han convertido en elementos indispensables para garantizar la subsistencia de las familias indígenas y mestizas dedicadas a esta actividad. ☀



Plantas xerófitas creciendo sobre una escarpada ladera del embalse.





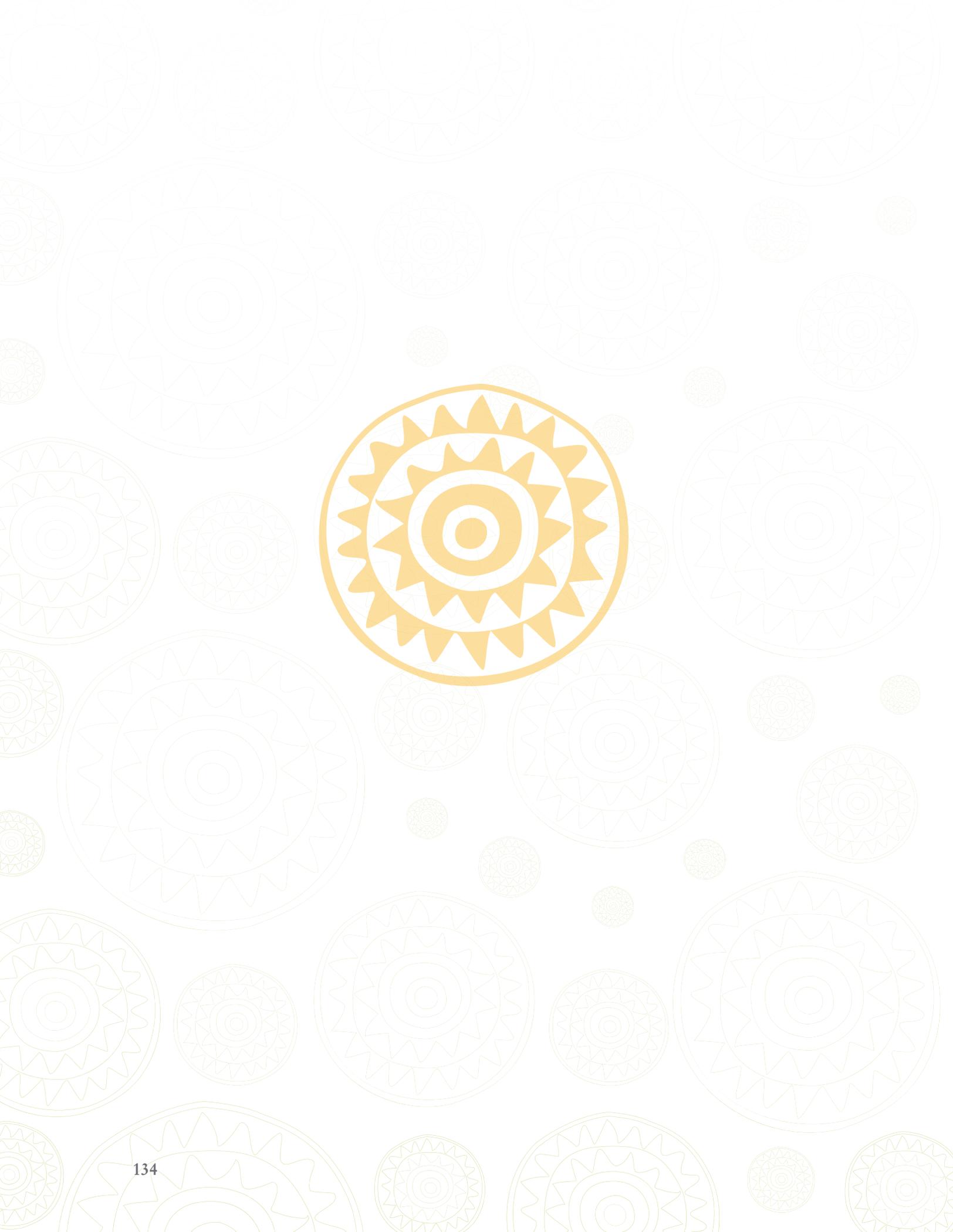
## Referencias

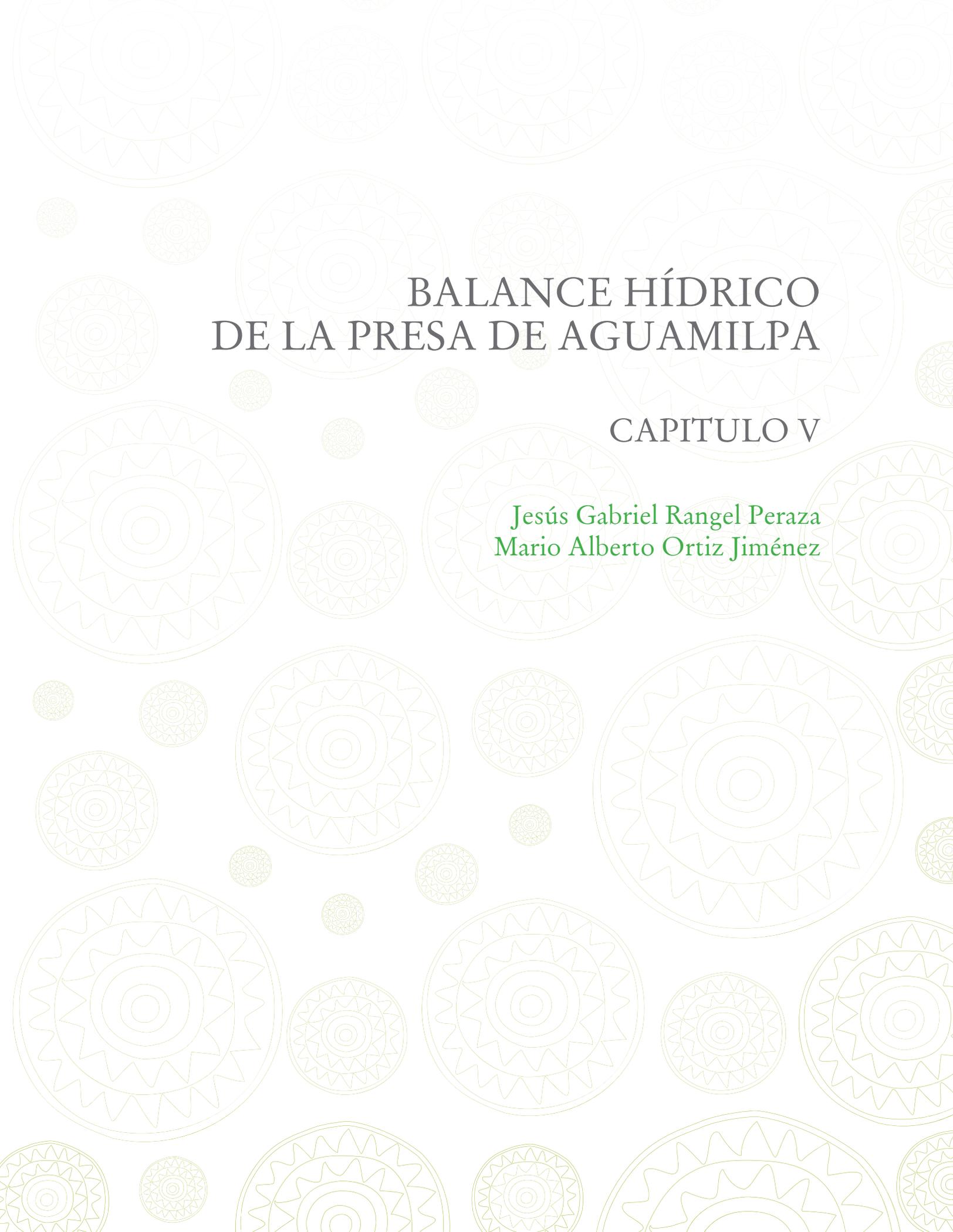
- CICCP (1997). Central Hidroeléctrica de Aguamilpa (México), Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (España). Aprovechamientos Hidroeléctricos No. 24. Revista de Obras Públicas. 144(3363): 116-117. Consultado Mayo 30, 2008, en: [http://ropdigital.ciccp.es/public/detalle\\_articulo.php?registro=17939](http://ropdigital.ciccp.es/public/detalle_articulo.php?registro=17939)
- Centro Universitario de Vinculación Empresarial y Desarrollo Sustentable, (CUVEDESU) Universidad Autónoma de Nayarit; Gobierno del Estado de Nayarit (2009). Ordenamiento Ecológico de la llanura costera del Estado de Nayarit.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) 2010. Placa de Datos técnicos de la CH. Aguamilpa y Comunicación Personal Ing. Álvaro Pérez Carrillo.
- CONABIO (2007). El Bosque Mesófilo de Montaña en México, Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible.
- INE (2005). Evaluación preliminar de las tasas de pérdida de superficie de manglar en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y conservación de los Ecosistemas. Septiembre 2005. México D.F., México.
- INEGI (2009). Guía para la interpretación de Cartografía, uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000 serie III.
- INEGI (2004). Guía para la interpretación de Cartografía, Edafología.
- INEGI (2000). Síntesis de Información Geográfica del Estado de Nayarit.
- Merengo Mogollón, H (2010). Energía Hidráulica. Comisión Federal de Electricidad, publicaciones Unión Mexicana de Asociaciones de Ingenieros A.C.
- Ortiz-Pérez, MA, Romo-Aguilar, ML (1994). Modifications of the meander trajectory in the course of the Grande de Santiago River, Nayarit, Mexico. Boletín. Instituto de Geografía. 29: 9-23.
- Ramírez-García, P, López-Blanco, J, Ocaña, D (1998). Mangrove vegetation assessment in the Santiago River Mouth, Mexico, by means of supervised classification using Landsat TM imagery. Forest Ecology and Management. 105: 217-229.
- Revista Obras Públicas (1997). Central Hidroeléctrica de Aguamilpa (México). Revista Obras Públicas, 144 (3363): 116-117.

- Salomon, N (1999). Impact of Hydroelectric Dams on Indigenous People, Chintecos, Otomies and Huicholes: A Case Study from Mexico. World Commission on Dams. 14 p. [online] URL: <http://www.dams.org/kbase/submissions/sublist.php?rec=soc165>
- Ulloa-Ramírez, P, Patiño-Valencia, JL, Sánchez-Regalado, R (2006). Dictamen de la implementación de la veda 2006. Aguamilpa, Nayarit, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de la Pesca. Centro Regional de Investigación Pesquera Bahía de Banderas, Nayarit. Febrero 2006. México. 10 pp.
- WCD (2000). Dams and development: A new framework for decision-making. The report of the world commission on dams. Earthscan Publications Ltd, London and Sterling, VA. USA. 356 pp.
- Valdéz-Hernández, JI (2002). Aprovechamiento forestal de manglares en el estado de Nayarit, costa pacífica de México. Madera y Bosques, número especial volumen:129-145.

## Referencias cartográficas

- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2006). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios mismos que forman parte de la porción de la región hidrológica denominada Río Santiago. Diario Oficial de la Federación. August 28 2006. México, D. F. México. 132 pp. <http://dof.gob.mx/> [January 12, 2009].
- INEGI (2011). Map Server, Monografía Estado de Nayarit. [inegi.gob.mx/geografía/espanol/estados/nay/fiso.cfm](http://inegi.gob.mx/geografía/espanol/estados/nay/fiso.cfm)
- Pérez-Rivera, A (2005). Instrumentación hidrometeorológica. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción. Delegación Guanajuato. Memorias. Foro de infraestructura hidráulica y medio ambiente. Guanajuato, Guanajuato. México. <http://www.cmicgto.com.mx/memorias/25%20nov%20el%20cajon.pdf> [ May 30, 2008].
- Subgerencia de Información Geográfica del Agua (SIGA) CONAGUA (2009). Bases de datos. <http://siga.cna.gob.mx/>
- SPP (1981). Carta hidrológica Aguas superficiales Guadalajara. Escala 1:1 000 000. Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de Servicios de Estadística, Geografía e Informática. Disponible en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes. Aguascalientes. México.





# BALANCE HÍDRICO DE LA PRESA DE AGUAMILPA

## CAPITULO V

Jesús Gabriel Rangel Peraza  
Mario Alberto Ortiz Jiménez



## 1. Introducción

Las políticas de manejo de un cuerpo de agua se encuentran relacionadas con la capacidad de mantener la disponibilidad de agua en una cierta región a fin de satisfacer sus necesidades y demandas actuales y futuras. El término disponibilidad de agua está asociado frecuentemente a la cantidad de agua, sin embargo, la disponibilidad de ésta realmente depende tanto de la cantidad como de su calidad (Jiménez-Cisneros, 1996; Jiménez *et al.*, 1998; D'Urquiza-Díaz *et al.*, 2009).



Dado que la disponibilidad de recursos hídricos se ve afectada por las condiciones climáticas que, a su vez, dependen de la circulación atmosférica global y sus ciclos anuales, se hace necesaria la construcción y operación de presas como una vía para almacenar grandes cantidades de agua y disponer de ella para diferentes fines (Barker *et al.*, 2000). Sin embargo, la interrupción de los cauces de los ríos modifica los regímenes hidráulicos de estos cuerpos de agua, alterando así la dinámica de cantidad de agua y su calidad (de Victorica, 1984; Smithers, 2004; Fearnside, 2005; Richter y Thomas, 2007).

El nivel de agua almacenado en una presa es el resultado del balance dado por relaciones hidrológicas básicas, en las que los cambios de agua almacenada dependen de la relación entre la tasa de entradas y todas las salidas de masa de agua del sistema (Wetzel, 2001). Algunos de estos flujos (precipitación directa, escurrimiento y evaporación, por ejemplo) están en función de las variables meteorológicas presentes en el área (Schnoor, 1996; Chapra, 1997), las cuales, a su vez, presentan un comportamiento estacional y temporal (Oyebande *et al.*, 1980; Bouwer *et al.*, 2006; Chahinian y Moussa, 2007).

El establecimiento del balance hídrico es complejo, sin embargo, es importante debido a la influencia que ejerce sobre los parámetros que determinan la calidad y cantidad del agua. Por tal motivo, el presente capítulo presenta un balance hídrico en la cuenca de la presa de Aguamilpa durante un ciclo hidrológico completo a fin de discutir las características dinámicas de cantidad de agua de dicho embalse, en aras de realizar una posterior evaluación de la calidad de agua.



Entrada al vertedero de la presa de Aguamilpa.

## 2. Metodología

La ecuación de balance hídrico en su forma general para un cuerpo de agua viene dada por (Fetter, 2001):

$$\text{Acumulación} = \sum_i (\text{entradas})_i - \sum_j (\text{salidas})_j \quad (\text{V.1})$$

Donde la acumulación es el cambio de volumen almacenado en la presa en función del tiempo ( $dV/dt$ ). Asimismo, los flujos volumétricos de entrada posibles a una presa pueden ser: precipitación, escorrentías, corrientes superficiales tales como ríos y arroyos, descargas de aguas residuales y corrientes subterráneas tales como corrientes de infiltración y manantiales sumergidos.

De la misma forma, entre las salidas posibles a una presa se encuentran las corrientes superficiales como ríos, extracciones bombeadas para consumo o control de avenidas de agua, evaporación, evapotranspiración y percolación (Yeung, 2005).



Cortina de la presa de Aguamilpa.

Para llevar a cabo el balance hídrico de la presa de Aguamilpa, se contó con datos proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2009) durante el período de enero a diciembre de 2007. Cabe destacar que en la ecuación de balance de la presa de Aguamilpa no se consideró la recarga o afloramientos de aguas subterráneas. De esta forma, la Ecuación (V.1) se reescribió como:

$$\frac{dV}{dt} = Q_d + Q_p + Q_{esc} - Q_{evap} - Q_g \quad (V.2)$$

Donde  $Q$  denota flujo volumétrico, y sus diversos subíndices tienen los significados descritos a continuación:  $d$  se usó para las “descargas” de aguas por la generación de energía eléctrica y manejo de la presa El Cajón,  $p$  indica la “precipitación” sobre la presa,  $esc$  corresponde a las “escorrentías” de entrada a la presa,  $evap$  denota el fenómeno de “evaporación” en la superficie de la presa y  $g$  se refiere al “agua descargada” debido al manejo de la presa de Aguamilpa (generación de energía eléctrica y control de avenidas de agua).

Dado que en el límite diferencial, el incremento de una variable tiende a su diferencial, es decir,  $\Delta V \rightarrow dV$  y  $\Delta t \rightarrow dt$ , entonces:

$$\Delta V = (Q_d + Q_p + Q_{esc} - Q_{evap} - Q_g) \Delta t \quad (V.3)$$

Donde los intervalos de volumen y tiempo corresponden a las siguientes definiciones:

$$\Delta V \equiv V - V_o \quad (V.4)$$

$$\Delta t \equiv t - t_o \quad (V.5)$$

Donde a su vez,  $V_o$  es el volumen inicial para el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , y  $t_o$  es el tiempo inicial considerado arbitrariamente como igual a cero. La ecuación (V.3) constituye el balance hídrico de la presa de Aguamilpa, cuya expresión está escrita en términos de flujos volumétricos.

Por otro lado, el producto de un flujo volumétrico por el tiempo resulta en un volumen. Así, una aproximación a la Ecuación (V.3) en términos de volúmenes totales sobre una base temporal constante (indicada por un intervalo de tiempo  $\Delta t$  acorde a la Ecuación V.5) se expresa a continuación:

$$\Delta V \approx V_d + V_p + V_{esc} - V_{evap} - V_g \quad (V.6)$$

Así, el balance volumétrico de la presa de Aguamilpa descrito en la Ecuación (V.6) sobre períodos definidos de tiempo puede usarse para aproximar el balance hídrico de la Ecuación (V.2), y explicar así el funcionamiento hidrodinámico de la presa.

Desde luego, la resolución temporal de los datos empleados para calcular dichos volúmenes influye sobre la calidad de la aproximación: entre menor sea el período de tiempo al que correspondan los datos sobre el cual se aplique la Ecuación (V.6), mejor será su aproximación a las condiciones reales del balance.

Asimismo, se consideró la sustitución de la Ecuación (V.4) en (V.6):

$$V = V_o + V_d + V_p + V_{esc} - V_{evap} - V_g \quad (V.7)$$



Vista del embalse de Aguamilpa en época de lluvias.

Resta ahora explicar la metodología empleada para calcular los diferentes elementos del balance volumétrico de la presa de Aguamilpa según la Ecuación (V.7).

### *Precipitación directa*

La información histórica mensual sobre la precipitación directa en el cuerpo de agua se obtuvo de una estación meteorológica ubicada en la presa de Aguamilpa, en las coordenadas  $21^{\circ} 50' 32''$  latitud norte y  $104^{\circ} 46' 29''$  longitud oeste, a cargo de la CFE.

El cálculo del aporte del volumen debido a la precipitación  $V_p$  sobre la presa, se efectuó a partir de la siguiente expresión:

$$V_p = P A_{sup} \quad (V.8)$$

Donde  $P$  es la precipitación mensual expresada en metros y  $A_{sup}$  es el área superficial de la presa expresada en  $m^2$ .

### *Escurremientos de la cuenca*

A partir de la información de precipitación directa en la presa se puede estimar el escurrimiento en toda la cuenca mediante el método de *Soil Conservation Service (SCS)*, que se expresa de la siguiente manera (Slack y Welch, 1980; Shi, 2007):

$$V_{esc} = C_e P A_{imp} \quad (V.9)$$

A partir de los datos de precipitación diaria ( $P$ ) en 2007 en la presa de Aguamilpa multiplicado por el área de la cuenca que impacta directamente a la presa de Aguamilpa ( $A_{imp}$ ), se puede calcular el escurrimiento mediante la corrección de este valor por medio de un coeficiente de escurrimiento  $C_e$ , el cual puede calcularse como (Campos, 1992):

$$\text{Si } K \leq 0.15 \quad C_e = K \left( \frac{P - 250}{2000} \right) \quad (V.10)$$

$$\text{Si } K > 0.15 \quad C_e = K \left( \frac{P - 250}{2000} \right) + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad (V.11)$$

La ponderación de  $K$  se realiza considerando el tipo de permeabilidad del suelo y su cobertura, descritos en el capítulo anterior, tomando como base los valores mostrados en la tabla V.1. Los valores  $C_e$  y  $K$  indican que del total de la precipitación observada, sólo una parte queda en la superficie del suelo y forma escorrentía, fluyendo por gravedad a terrenos más bajos, pudiendo ser interceptada por la vegetación del suelo o por infiltración (McGhee, 1999).

TABLA V.1 FACTOR DE PERMEABILIDAD K EN FUNCIÓN AL USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	
USO O CUBIERTA DEL SUELO	K
Cultivos (en surcos, legumbres, rotación de praderas)	0.24
Pastizal con más del 75% cubierto	0.14
Bosque con más del 75% cubierto	0.07
Cascos y zonas con edificaciones	0.26
Vegetación secundaria (pradera permanentemente)	0.18
Residencial mediana densidad	0.35

## Evaporación

La evaporación anual reportada en la estación meteorológica de la presa debe multiplicarse por un factor de evaporación neta para proporcionar la evaporación real de la presa. El volumen de agua evaporada  $Q_{evap}$  (en  $Mm^3$ ) puede calcularse como (Chapra, 1997):

$$V_{evap} = \eta E A_{sup} \quad (V.12)$$

Donde  $\eta$  es un factor de eficiencia de evaporación de la presa, el cual se determinó de acuerdo a las características morfológicas de la presa y a la bibliografía revisada,  $E$  es el valor promedio de evaporación mensual y  $A_{sup}$  es el área superficial de la presa.



Vertedero de la presa de Aguamilpa.

### *Volumen aforado y descargado*

Por su parte, la información sobre el volumen de agua utilizado para la generación de energía eléctrica y para el control de avenidas de agua tanto en la presa de Aguamilpa como en la presa El Cajón fue proporcionada por la CFE (2009).

## Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Por último, se calculó el tiempo de retención hidráulico  $\tau_e$  según las entradas de la presa de Aguamilpa, definido por:

$$\tau_e = \frac{V}{\sum_j Q_{e,j}} \quad (\text{V.13})$$

Donde  $Q_e$  es el flujo de entrada, y el subíndice  $j$  denota las diferentes entradas identificadas para la presa de Aguamilpa: escurrimiento, precipitación y descargas de la presa El Cajón, por lo que la Ecuación (V.14) se expresó como:

$$\tau_e = \frac{V}{Q_d + Q_p + Q_{esc}} \quad (\text{V.14})$$

Dado que un flujo volumétrico es un cociente de un volumen durante un tiempo de flujo  $t$ , la Ecuación (V.15) se expresó en una forma más conveniente dados los datos disponibles:

$$\tau_e = t \left[ \frac{V}{V_d + V_p + V_{esc}} \right] \quad (\text{V.15})$$

Donde  $t$  es igual al número de días en un mes (posteriormente los días se convierten a años, por lo que  $\tau_e$  se expresa en años), donde  $t$  es el tiempo de flujo y los volúmenes de evaporación y descarga de la presa se consideraron sobre una base de cálculo mensual.

Físicamente,  $\tau_e$  es el tiempo promedio en que tarda en remplazarse un volumen equivalente al contenido en la presa (Ryding y Rast, 1989). Diversos autores señalan que  $\tau_e$  se refiere al tiempo promedio en que será renovada totalmente el agua contenida en la presa y se asocia al transporte de los contaminantes en un cuerpo de agua (Monsen *et al.*, 2002).





### 3. Resultados

#### Precipitación directa

El volumen aportado por precipitación directa registrado en la presa de Aguamilpa durante el período de estudio fue de 112.27 Mm<sup>3</sup> (Figura V.1). Se observó un fuerte contraste pluviométrico entre los meses de junio, julio, agosto y septiembre con el resto del año. El mes de enero fue anormalmente lluvioso, mientras que el inicio de la época de lluvias se registró en la última semana del mes de junio. Agosto fue el mes con mayor volumen aportado por precipitación directa a la presa con un valor ponderado de 42.88 Mm<sup>3</sup>.

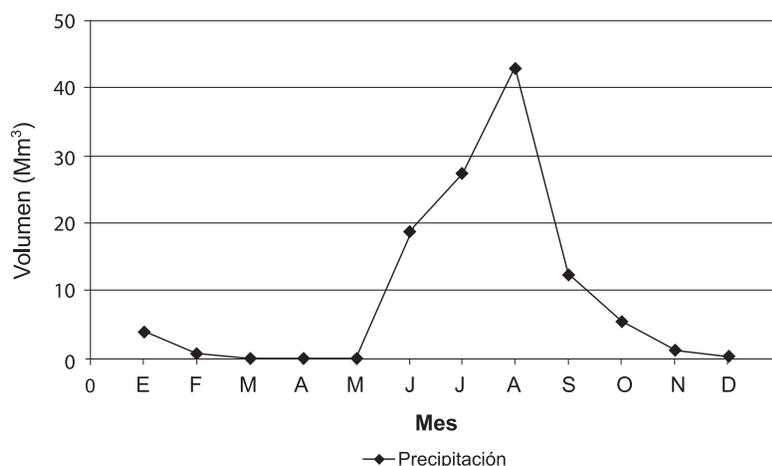


Figura V.1 Volumen aportado por precipitación directa en la presa de Aguamilpa durante 2007.

#### Escurrecimientos de la cuenca

El factor de permeabilidad para el cálculo de los escurrimientos en la presa fue obtenido a partir de la distribución del uso de suelo en el área de impacto a la presa utilizando la información oficial por parte del INEGI (2006) (Tabla V.2).

Empleando el valor anterior de  $K$  junto con el valor de precipitación anual durante el período de estudio, que es de 877.10 mm, la ecuación V.10 o V.11 arrojó un valor para el coeficiente de escurrimiento de 0.03173 (es decir, teóricamente el 3.17% de la precipitación sobre el área de impacto terminará en forma de escorrentía superficial hacia la presa de Aguamilpa).

TABLA V.2 FACTOR DE PERMEABILIDAD (K) PARA LA PRESA DE AGUAMILPA.			
USO DE SUELO	FACTOR K	PORCENTAJE EN ÁREA	FACTOR K PONDERADO
Bosques de encino	0.07	38.8	0.0271
Selva baja caducifolia	0.07	33.0	0.0231
Pastizales	0.14	11.2	0.0156
Vegetación secundaria	0.18	10.6	0.0190
Agricultura de temporal	0.24	5.6	0.0134
Zona urbana	0.35	0.8	0.0028
		100	0.1012

Este valor de coeficiente de escurrimiento es consistente con el valor sugerido por Fetter (2001) para zonas sin urbanizar y con una gran cantidad de vegetación, y es confirmado por estudios realizados en otros cuerpos de agua tropicales (D'Urquiza-Díaz, 2004; Ortiz-Jiménez, 2005).

TABLA V.3 VOLUMEN DE AGUA POR ESCORRENTÍA ESTIMADO PARA LA PRESA DE AGUAMILPA	
MES	ESCORRENTÍA (Mm <sup>3</sup> )
Enero	14.78
Febrero	3.78
Marzo	0.00
Abril	0.00
Mayo	0.00
Junio	95.91
Julio	139.53
Agosto	218.12
Septiembre	63.29
Octubre	27.54
Noviembre	6.64
Diciembre	1.50
Total anual	571.08

Dado que los valores para el escurrimiento en la presa de Aguamilpa fueron estimados a partir de los datos de precipitación directa a la presa, el comportamiento de este componente del balance hídrico fue similar al observado para la precipitación, alcanzando un máximo ponderado mensual de 218.12 Mm<sup>3</sup>.



Formaciones rocosas que se asemejan a un perfil de rostro humano en el embalse de Aguamilpa en la vertiente del río Huaynamota.

El valor ponderado anual para los escurrimientos en la presa de Aguamilpa durante el período de estudio se estimó en  $571.08 \text{ Mm}^3$  (Tabla V.3). Particularmente en este sistema, los aportes por escurrimiento son mayores por parte de la subcuenca del río Huaynamota debido a que esta subcuenca representa el 68.7% de la cuenca de la presa de Aguamilpa.

### *Evaporación*

El cálculo de evaporación se realizó de acuerdo a la Ecuación (V.12) tomando en cuenta que el área superficial de la presa de Aguamilpa varió en función al volumen de agua registrado (Figura V.2). Los valores más altos se registraron durante los meses de marzo a junio, previo a la época de lluvias. La máxima pérdida de agua

por evaporación en la presa de Aguamilpa se registró durante el mes de abril con un volumen de  $26.62 \text{ Mm}^3$ , mientras que el mes de septiembre representó la menor pérdida de agua por evaporación con  $11.63 \text{ Mm}^3$ . La pérdida de volumen de agua en la presa de Aguamilpa por efecto de la evaporación durante el período de estudio alcanzó un valor de  $217.39 \text{ Mm}^3$ .

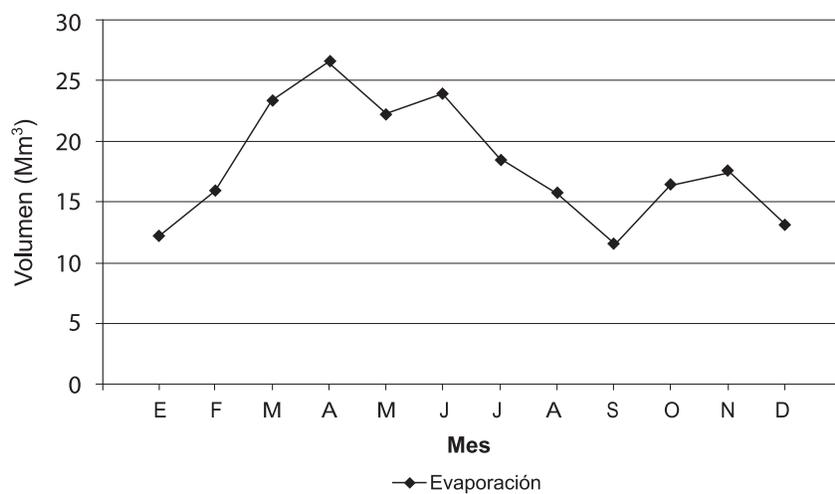


Figura V.2 Volumen de agua evaporada registrada en la presa de Aguamilpa durante el año 2007.

### Volumen aforado y descargado

El volumen de agua utilizado para la generación de energía eléctrica y el control de avenidas, tanto en la presa de Aguamilpa como en la presa El Cajón, fue variable a través del período de estudio (Figura V.3).

Durante los primeros cinco meses del año, el volumen de agua utilizado para la generación de energía eléctrica en la presa de Aguamilpa fue prácticamente constante, observándose un incremento durante la época de lluvias alcanzando un máximo de  $1,402.9 \text{ Mm}^3$  durante el mes de agosto.

El registro de las descargas de agua de la presa El Cajón muestra que la operación de dicha presa fue similar a lo observado en la presa de Aguamilpa, de tal forma que el volumen de agua utilizada fue máximo ( $1,711.29 \text{ Mm}^3$ ) durante el mes de agosto.

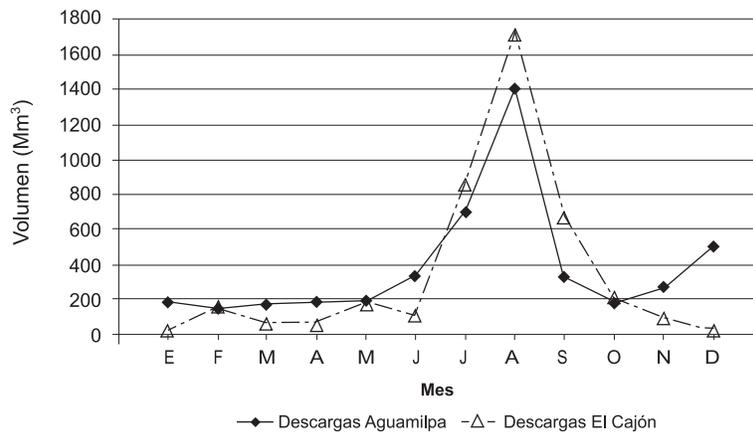


Figura V.3 Volumen de agua utilizado para la generación de energía eléctrica y control de avenidas de agua en la presa de Aguamilpa y El Cajón durante el año 2007.

### Modelo de balance hídrico

La Figura (V.4) muestra el volumen de agua obtenido mediante el modelo de balance hídrico realizado, y se compara con el volumen real registrado en la presa de Aguamilpa durante el período de estudio. Con esta información se pudo determinar un esquema global del balance hídrico de la presa de Aguamilpa (Figura V.5), el cual permite reconocer el volumen de agua total para cada componente del modelo.

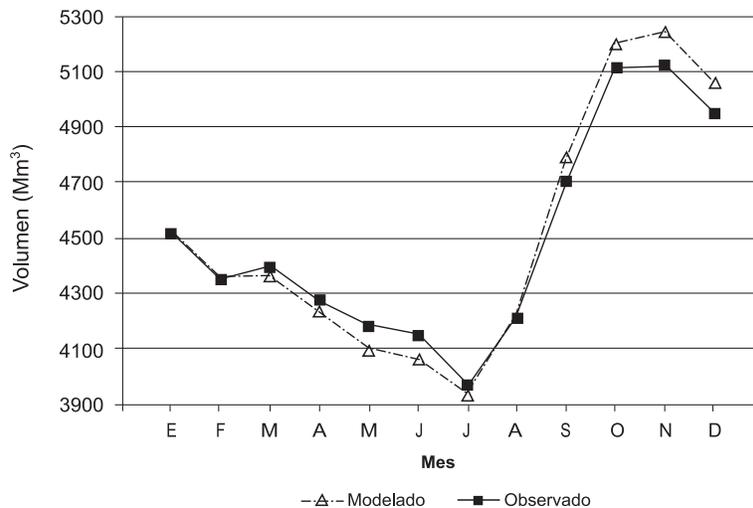


Figura V.4 Balance hídrico comparado contra el volumen real registrado en la presa de Aguamilpa durante el período de enero a diciembre de 2007.



Marcas sobre las rocas mostrando los cambios en el nivel del agua del embalse de Aguamilpa.

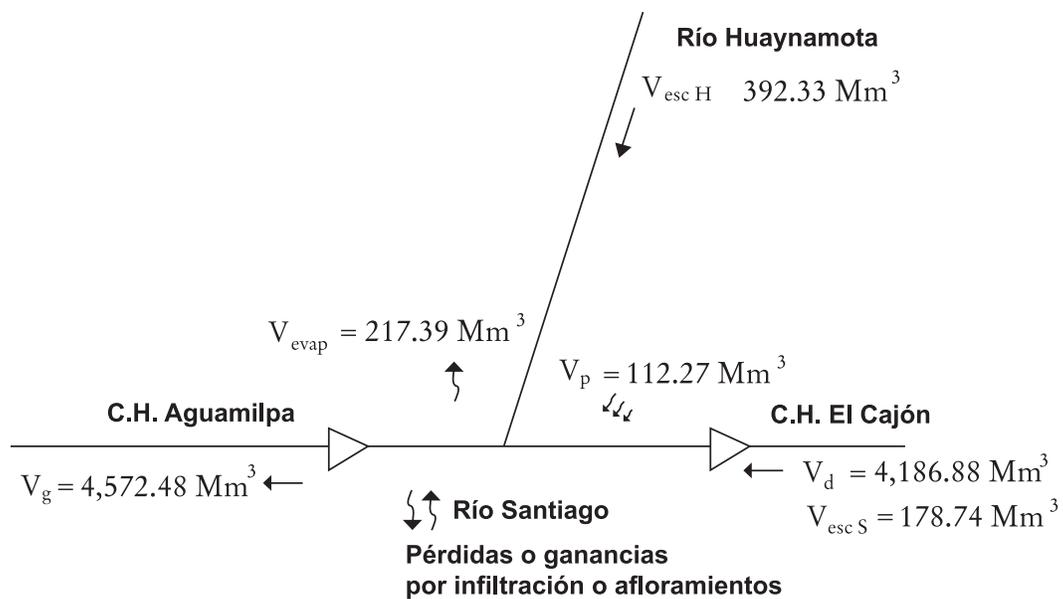


Figura V.5 Diagrama del balance hídrico anual de la presa de Aguamilpa.

Posteriormente se calculó el área bajo las curvas obtenidas mediante integración numérica por el método trapezoidal, a fin de determinar el porcentaje de error del balance hídrico realizado (Tabla V.4).

En la Tabla V.5 se presenta el cálculo realizado para la determinación del TRH en función a las entradas a la presa de Aguamilpa, el cual es de casi un año (339 días).

<b>INTERVALO</b>	<b>% ERROR ABSOLUTO</b>
1	0.11
2	0.23
3	0.78
4	1.45
5	2.10
6	1.55
7	0.17
8	1.19
9	1.73
10	2.02
11	2.31
Promedio =	1.24

Este TRH se calculó mediante el cociente del volumen promedio anual de la presa y el volumen total de las componentes de entrada del balance hídrico.

<b>Período (mes)</b>	<b>Precipitación (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Escurremientos (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Aforos (Mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen total (Mm<sup>3</sup>)</b>
Ene-07	2.91	14.78	21.63	4,522.08
Feb-07	0.74	3.78	157.16	4,365.40
Mar-07	0.00	0.00	64.50	4,369.99
Abr-07	0.00	0.00	68.42	4,242.22
May-07	0.00	0.00	179.49	4,103.47
Jun-07	18.85	95.91	114.25	4,068.36
Jul-07	27.43	139.53	853.24	3,939.38
Ago-07	42.88	218.12	1,711.29	4,241.28
Sep-07	12.44	63.29	665.79	4,794.89
Oct-07	5.41	27.54	205.60	5,200.74
Nov-07	1.31	6.64	95.26	5,243.81
Dic-07	0.29	1.50	50.25	5,062.58
Total anual	112.27	571.08	4,186.88	
			TRH =	339 (días)

Tabla V.5. Cálculo del tiempo de residencia hidráulico.



Majestuoso amanecer en el embalse de Aguamilpa.

#### 4. Conclusiones

De acuerdo con el modelo de balance hídrico realizado, las componentes más significativas del balance hídrico de la presa de Aguamilpa son los volúmenes utilizados para la generación de energía eléctrica entre ésta y la presa de El Cajón durante la época de lluvias. En este sentido, la operación y el manejo de las presas de Aguamilpa y El Cajón son factores determinantes en la cantidad de agua almacenada en el sistema.

Asimismo, es posible suponer que el volumen de agua almacenado en la presa de Aguamilpa puede presentar un comportamiento estacional a lo largo de un ciclo hidrológico completo, tal y como sucede en otras presas en regiones tropicales (Etoh y Kurita, 1992; López-Moreno *et al.*, 2004).



Cortina y embalse de la presa de Aguamilpa.

El régimen hidrológico en el área de estudio es variable, se registró un período de precipitación durante los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre, lo cual está de acuerdo con las características pluviales de otros sistemas tropicales (Navarro-Rodríguez *et al.*, 2004; Atobatele y Ugwumba, 2008).

Durante la época de lluvia existe un incremento en el volumen de agua almacenado en la presa, por lo que sus propiedades fisicoquímicas y biológicas pueden modificarse durante este período (Straskrabá *et al.*, 1993; Lind y Dávalos-Lind, 2002).

La mayor contribución en el error encontrado en el modelo de balance hídrico se debe principalmente a las estimaciones del escurrimiento hídrico en las cuencas tributarias. El cambio de la cobertura vegetal asociado con la expansión de la agricultura, tienen una profunda influencia en el régimen de escurrimiento natural de la cuenca (Gaytán *et al.*, 2009), por lo que, en este sentido, los valores estimados para dicha componente pueden mejorarse con el desarrollo de un modelo de escurrimientos (Götzinger y Bárdossy, 2005; Zhang *et al.*, 2008).

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que el TRH estimado para la presa de Aguamilpa durante el período de estudio se encuentra dentro del rango de la literatura internacional para este tipo de sistemas (Ambrosetti *et al.*, 2003; Rueda *et al.*, 2006). ☀

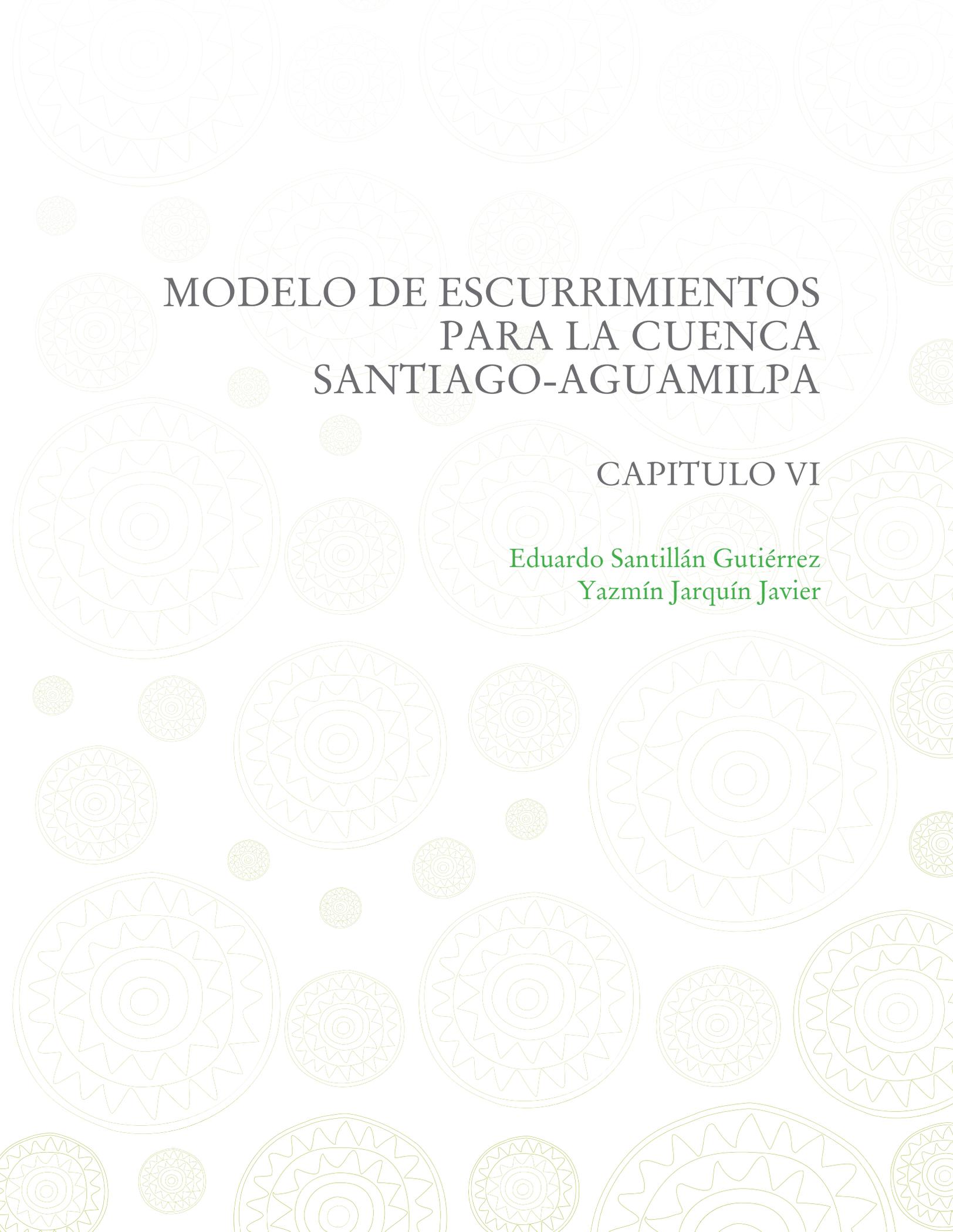
## Referencias

- Ambrosetti, W, Barbanti, L (2005). Evolution towards meromixis of Lake Iseo (Northern Italy) as revealed by its stability trend. *J. Limnol.* 64(1): 1-11.
- Atobatele, OE, Ugwumba, OA (2008). Seasonal variation in the physicochemistry of a small tropical reservoir. *African Journal of Biotechnology*, 7(12): 1962-1971.
- Barker, R, Scott, CA, De Fraiture, C, Amarasinghe, U (2000). Global Water Shortages and the Challenge Facing Mexico. *Water Resources Development*, 16 (4): 525-542.
- Bouwer, LM, Aerts, JCH, Droogers, P, Dolman, AJ (2006). Detecting the long-term impacts from climate variability and increasing water consumption on runoff in the Krishna river basin (India). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3: 1249-1280.
- Campos, DF (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Chahinian, N, Moussa, R (2007). Comparison of different multi-objective calibration criteria of a conceptual rainfall-runoff model of flood events. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4: 1031-1067.
- Chapra, SC (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. New York, McGraw-Hill.
- CFE (2009) Registro de observaciones hidrométricas y climatológicas en el embalse de Aguamilpa. [Online]:<http://h06814.iie.org.mx/presascfe/semanapresacaracol.aspx?estacion=agu>
- D'Urquiza-Díaz, A, (2004). Modelo hidrológico, calidad de agua y control de la eutrofización en el lago Zapotlán. México, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.
- D'Urquiza-Díaz, A, de Anda, J, Nelson, J(2009). The water balance for reservoirs and its application to tropical latitudes". *Journal of Environmental Hydrology*, Paper 25, Volume 17, 37 pp.
- De Victorica-Almeida, J (1984). Influencia en la Hidrodinámica de Embalses en la Evolución de la Calidad del Agua. *Revista del Instituto de Ingeniería de la UNAM*, 480, 24 p.
- Etoh, T, Kurita, H (1992). A theory of efficiency of storage-treatment systems. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 6(2): 89-101.
- Fearnside, PM (2005). Brazil's Samuel Dam: Lessons for Hydroelectric Development Policy and the Environment in Amazonia. *Environmental*

- Management, 35(1):1-19.
- Fetter, CW (2001), Applied Hydrogeology. Estados Unidos de América, Prentice Hall.
- Gaytán, R, de Anda, J, González-Farías, F (2009). Initial appraisal of water quality of Lake Santa Ana, Mexico. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 14(1): 41-55.
- Götzinger, J, Bárdossy, A (2005). Integration and calibration of a conceptual rainfall-runoff model in the framework of a decision support system for river basin management. *Advances in Geosciences*, 5: 31–35.
- INEGI (2006). Continuo Nacional del Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación, 1:1 250 000, serie II. México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jiménez-Cisneros, B (1996). Water Availability Index Base on Quality and Quantity: Its Application in Mexico. *Wat. Sci. Tech.*, 34(12): 165-172.
- Jiménez, BE, Garduño, H, Domínguez, R (1998). Water Availability in Mexico Considering Quantity, Quality and Uses. *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 124(1):1-7.
- Lind, OT, Dávalos-Lind, LO (2002). Interaction of water quantity with water quality: the Lake Chapala example. *Hydrobiologia*, 467: 159-167.
- López-Moreno, JI, Begueria, S, García-Ruiz, JM (2004). The management of a large Mediterranean reservoir: Storage regimens of the Yesa reservoir, upper Aragon River basin, central Spanish Pyrenees. *Environmental Management*, 34(4): 508-515.
- McGhee, TJ (1999). *Abastecimiento de Agua y Alcantarillado: Ingeniería Ambiental*. Colombia. McGraw-Hill.
- Monsen, NE, Cloern, JE, Lucas, LV, Monismith, SG (2002). The use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnol. Oceanography*, 47:1545–1553.
- Navarro-Rodríguez, MC, Flores-Vargas, R, González-Guevara, LF, González-Ruelas, ME (2004). Distribution and abundance of *Dormitator latifrons* (Richardson) larvae (Pisces: Eliotridae) in the natural protected area Estero El Salado in Jalisco, Mexico. *R. de Biol. Marina y Oceanografía*, 39(1): 31-36.
- Ortiz-Jiménez, MA, de Anda, J, Shear, H (2005). Hydrologic Balance of Lake Zapotlan, Mexico. *Journal of Environmental Hydrology*, 13(5):1-16.
- Oyebande, L, Sagua VO, Ekpenyong JL (1980). The effect of Kainji Dam on the hydrological regime, water balance and water quality of the River Niger.

- Proceedings of the Helsinki Symposium. IAHS—AISH Publ.,130: 221-228.
- Richter, BD, Thomas, GA (2007). Restoring Environmental Flows by Modifying Dam Operations. *Ecology and Society*,12(1):12 p.
- Rueda, F, Moreno-Ostos, E, Armengol, J (2006). The residence time of river water in reservoirs. *Ecological Modelling*, 191: 260-274.
- Ryding, SO, Rast, W (1989). The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs. *Man and the Biosphere Series: Volume I. Estados Unidos de América. Parthenon Publishing and UNESCO.*
- Schnoor, JL (1996). *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air and Soil. Estados Unidos de América. Wiley-Interscience.*
- Shi, P-J, Yuan Y, Zheng J, Wang J-A, Ge, Y, Qi, G-Y(2007). The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China.*CATENA*, 69(1): 31-35.
- Slack, RB, Welch, R (1980). Soil conservations service runoff curve number estimates from Landsat data. *Water Resources Bulletin*, 16(5): 887– 893.
- Smithers, S (2004). *Environmental Flows: Restoring the Balance. Geodate*, 17(1):1-5.
- Straskrabá, M, Tundisi, JG, Duncan, A(1993). *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management. Estados Unidos de América. KluwerAcademic Publishers.*
- Yeung, CW (2005). *Rainfall-runoff and water-balance models for management of the Fena Valley Reservoir, Guam.Estados Unidos de América.U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report.*
- Wetzel, RG, Linkens, GE (2000). *Limnological analyses. Estados Unidos de América. Springer.*
- Zhang, Z, Zhang, G, Zuo, C, Pi, X (2008). Hillslope soil erosion and runoff model for natural rainfall events . *Acta Mechanica Sinica*, 24(3): 277-283.



The background of the entire page is a repeating pattern of stylized suns. Each sun is composed of several concentric circles. The innermost circle is a small solid circle, followed by a ring of small dots, then a ring of larger dots, and finally an outer ring of sharp, triangular rays. The suns are scattered across the page in various sizes and orientations, creating a textured, decorative background.

# MODELO DE ESCURRIMIENTOS PARA LA CUENCA SANTIAGO-AGUAMILPA

## CAPITULO VI

Eduardo Santillán Gutiérrez  
Yazmín Jarquín Javier



## 1. Introducción

Por su naturaleza, el escurrimiento superficial es el que llega más rápidamente a la salida de la cuenca, en comparación con otros tipos de escurrimiento como el subsuperficial y el subterráneo.



En el estudio de cuencas hidrográficas, lo importante es la rapidez con la que estas responden a una tormenta y la cantidad de escurrimiento superficial generado dentro de su territorio, pues esto determina su respuesta hidrológica y la magnitud de las avenidas (Chow *et al.*, 1988).

El escurrimiento superficial se define por la porción de la precipitación que no se infiltra ni se acumula en la superficie del suelo, pero que fluye aguas abajo como flujo laminar o concentrado. En hidrología, los escurrimientos superficiales tienen dos objetivos principales: 1) estimar el volumen de agua por almacenar o retener para el abastecimiento público, irrigación, generación de energía eléctrica y recreación, y 2) estimar los escurrimientos máximos instantáneos para el diseño de obras de conservación, para control de inundaciones, drenaje vial, urbano y rural (Chow *et al.*, 1988).

La evaluación del escurrimiento por métodos empíricos como el método del Servicio de Conservación de Suelos (*Soil Conservation Service, SCS*) (NRCS 2004) y en el caso de México los métodos directo e indirecto de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (NOM, 2000) son comúnmente utilizados, por ser herramientas valiosas para estimar los componentes del balance hídrico en lugares donde solo existen registros de precipitación y en algunos casos información sobre el tipo y uso de suelo.

Hoy en día, existen paquetes de software especializados en "Simulación Hidrológica" con alto nivel de desarrollo que están disponibles en el mercado. Estos programas cuentan con modelos más confiables para la estimación de escurrimiento y en muchos casos de estudio han sido utilizados para calibrar modelos de escurrimiento en cuencas hidrográficas, para posteriormente ser aplicados en cuencas no aforadas en donde es necesario estimar la magnitud y variación del escurrimiento; esta información se requiere para la planeación y manejo de recursos hídricos, especialmente aquellos relacionados al control, disponibilidad y uso del agua.

En este capítulo se presenta una metodología para generar un modelo calibrado y validado para la estimación del escurrimiento superficial en cuencas grandes de topografía compleja, pretendiendo aportar una herramienta útil para la planeación del recurso hídrico y el manejo de cuencas.

Como base de estudio se consideró la cuenca del río Huaynamota para generar el modelo y las cuencas de los ríos Bolaños y Santiago-Aguamilpa para la estimación de sus volúmenes de escurrimiento. Se eligieron estas cuencas porque cuentan con las condiciones de magnitud, topografía e información suficiente para validar dicha metodología y en el caso de la cuenca del río Huaynamota por ser el principal afluente del sistema de la presa de Aguamilpa.

## 2. Metodología

Para la elaboración de este capítulo se utilizaron como herramientas principales los programas *Watershed Modeling System* (WMS) versión 8.2 y el *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) versión 3.3, soportado en un equipo Work Station (WS) Sun Solaris.

El método utilizado para la estimación del escurrimiento fue el *Soil Moisture Accounting* (SMA), por ser considerado un modelo adecuado para simular sistemas grandes y complejos en forma continua, pues permite representar todos los procesos del ciclo hidrológico involucrados en el escurrimiento que ocurren y cambian en un cierto periodo de tiempo a través de sus diversos parámetros, y además de simular periodos en climas secos y húmedos (HEC, 2008).





En cuanto a la información base utilizada se empleó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y cartografía digital *raster y vectorial* a escala 1:250,000 correspondiente a la zona de estudio, el cual fue proporcionado por el laboratorio de Análisis Espacial del Instituto de Geografía de la UNAM y del Sistema de Información Geográfica del Agua (SIGA), perteneciente a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); los datos hidroclimatológicos e hidrométricos de los años 1999 al 2001, fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en la Dirección General del Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico.

Como primer paso se eligió la cuenca del río Huaynamota para generar el modelo de escurrimiento superficial. La elección de esta cuenca se hizo con base a dos criterios: 1) la existencia de una estación hidrométrica cercana al punto de salida, a partir de la cual se obtuvieron datos de flujos diarios que ayudaron a calibrar y validar el modelo; y 2) las características físicas y morfológicas de la cuenca Huaynamota son similares a las de las cuencas de los ríos Bolaños y Santiago-Aguamilpa, esto hace suponer que los parámetros utilizados por el método SMA serán los mismos para cada una de las cuencas.

El modelo obtenido en la cuenca del río Huaynamota se utilizó en las otras dos cuencas, de los ríos Bolaños y Santiago-Aguamilpa, para la estimación de sus respectivos escurrimientos y la generación de sus hidrogramas. En un segundo paso, mediante el programa WMS se delimitó la cuenca del río Huaynamota y se procedió a seleccionar los métodos a utilizar para el cálculo de las pérdidas, la transformación de la precipitación neta en escorrentía y el cálculo del flujo base. A la selección de estos métodos se le conoce como preparación del modelo de cuenca (Santillán *et al.*, 2010).

Una vez delimitada la cuenca, se preparó el modelo meteorológico, introduciendo los datos de precipitación total diaria, la cual fue obtenida del promedio de las precipitaciones diarias registradas en las estaciones hidroclimatológicas Chapalagana, Jesús María y San Juan Peyotán ubicadas en las coordenadas geográficas mostradas en la Tabla VI.1, para la evapotranspiración y los datos hidrométricos, fueron tomados de la estación hidroclimatológica e hidrométrica Chapalagana.

Posteriormente se especificó el tiempo de simulación y el intervalo de cálculo, que en este caso el tiempo de simulación fue de un año completo con un intervalo de precisión de un día (24h).

Finalmente, para correr el modelo se seleccionó el nombre de la cuenca y se introdujeron los parámetros del método SMA. Una vez que se corrió el modelo y se observaron los resultados, se procedió a optimizar y calibrar los parámetros, utilizando los datos de los años 1999 y 2000. Posteriormente en base a la prueba de sensibilidad, se sintonizaron los valores de cada uno de ellos hasta lograr el ajuste adecuado entre los flujos diarios medidos y los escurrimientos simulados (Santillán *et al.*, 2010).

Después de completar la optimización y calibración de los parámetros, es necesario realizar el último paso conocido como validación del modelo. Para la validación se utilizaron los datos del año 2001 y los valores de los parámetros calibrados del método SMA (Santillán *et al.*, 2010).

TABLA VI.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES HIDROCLIMATOLÓGICAS UTILIZADAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL DIARIA.		
COORDENADAS GEOGRÁFICAS		
Estación	Latitud N	Longitud W
Chapalagana	21° 56' 39''	104° 30' 00''
Jesús María	22° 15' 19''	104° 30' 58''
San Juan Peyotán	22° 21' 40''	104° 25' 54''

Ya obtenido el modelo de escurrimiento validado, éste se utilizó para estimar el escurrimiento superficial de las otras dos cuencas de los ríos Bolaños y Santiago-Aguamilpa utilizando los datos de precipitación de los años 1999, 2000 y 2001, los cuales fueron tomados de las estaciones hidroclimatológicas Cerro Blanco y Bolaños, la primera ubicada dentro de la cuenca del río Santiago-Aguamilpa en las coordenadas 21° 22' 36" de latitud N y 104° 37' 06" de longitud W y la segunda en la cuenca del río Bolaños en las coordenadas latitud y longitud.



Aguas tranquilas durante las primeras horas de la mañana en la presa de Aguamilpa.

Cabe mencionar que se eligieron estas estaciones por su ubicación dentro de las cuencas, pues en ambos casos las estaciones se encuentran localizadas al centro de cada una de ellas, permitiendo suponer que la precipitación registrada es la que se presenta en forma uniforme en toda la cuenca.

### *3. Resultados*

Las láminas de escurrimientos estimados para la cuenca del río Huaynamota fueron las siguientes: para el año de 1999 fue de 60.63 mm, para el 2000 de 34.48 mm y del 2001 de 46.81 mm. Estos volúmenes estimados se compararon con los flujos observados y reportados en la estación hidrométrica Chapalagana con registros de 60.40 mm, 34.40 mm y 46.39 mm, observando una cercanía en sus volúmenes con los estimados.

TABLA VI.2 VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO ESTIMADO Y FLUJO OBSERVADO.						
RESULTADOS DE ESCURRIMIENTO ESTIMADO Y FLUJO OBSERVADO EN MILLONES DE METROS CÚBICOS Y MILÍMETROS						
Años	1999		2000		2001	
Volumen	Mm <sup>3</sup>	mm	Mm <sup>3</sup>	mm	Mm <sup>3</sup>	mm
Flujo estimado	1,048.0568	60.63	596.0189	34.48	809.2310	46.81
Flujo observado	1,044.15906	60.40	594.60584	34.40	801.84079	46.39
Error	0.37 %		0.23 %		0.92 %	

Como se puede ver en los hidrogramas de los años 1999, 2000 y 2001 el comportamiento de ambas series (flujos observados y escurrimiento estimado) tienen una similitud en sus tendencias (Figuras VI.1, VI.2 y VI.3), además de que, como se mencionó anteriormente, los volúmenes presentan un acercamiento aceptable teniendo errores menores al 1%, indicando una calibración y validación del modelo llevado a cabo con precisión (Tabla VI.2).

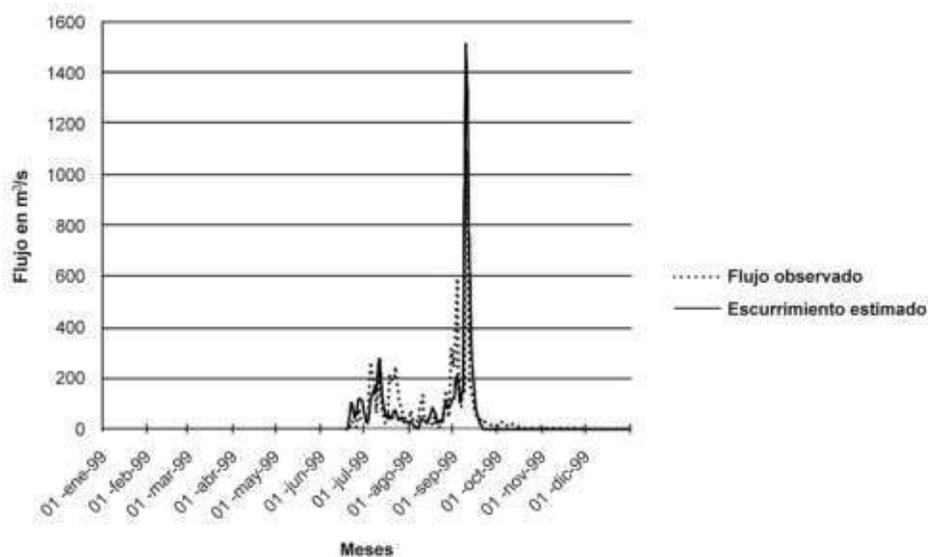


Figura VI.1 Hidrograma resultado del proceso de calibración del año 1999 de la cuenca del río Huaynamota.

Figura VI.1 Hidrograma resultado del proceso de calibración del año 2000 de la cuenca del río Huaynamota.

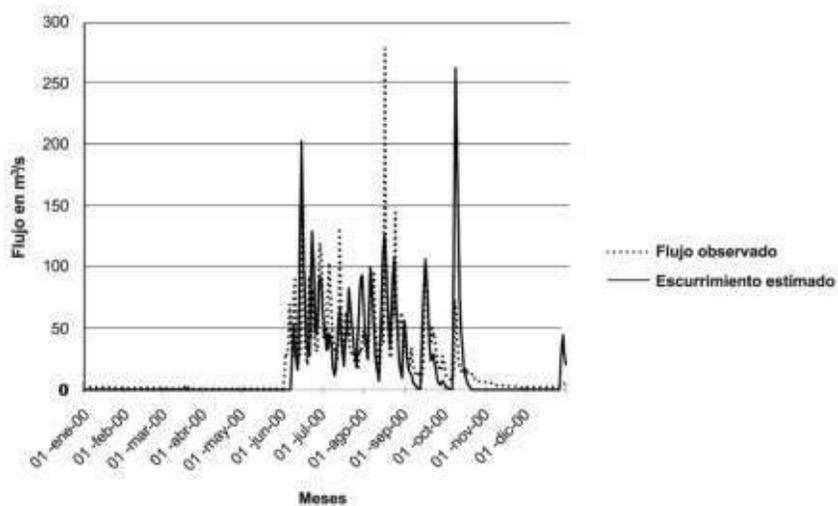
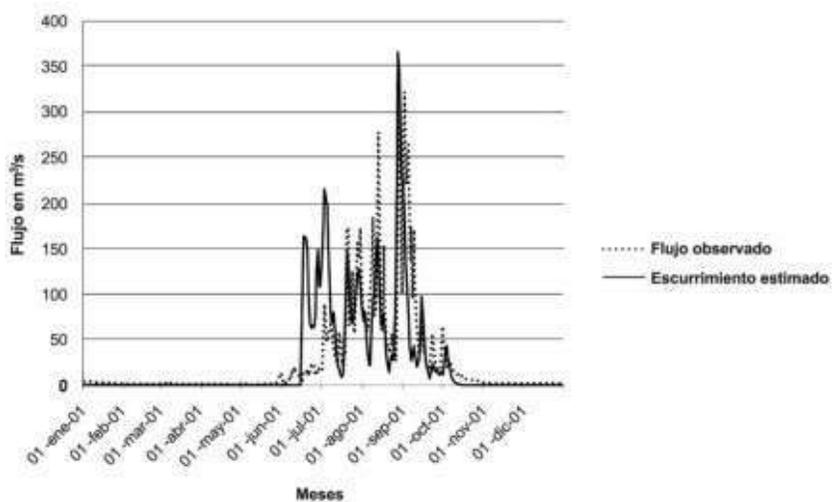


Figura VI.3 Hidrograma resultado del proceso de validación del año 2001 de la cuenca del río Huaynamota.



Utilizando el modelo de escurrimiento generado en la cuenca del río Huaynamota, se estimó el volumen de escurrimiento y sus respectivos hidrogramas de cada año simulado en la cuenca del río Bolaños, obteniendo los siguientes resultados (Tabla VI.3).

TABLA VI.3 VOLÚMENES DE ESCURRIMIENTO ESTIMADO DE LA CUENCA DEL RÍO BOLAÑOS.			
VOLÚMENES DE ESCURRIMIENTO ESTIMADO EN MILLONES DE METROS CÚBICOS Y MILÍMETROS			
Unidad	Año	Mm <sup>3</sup>	mm
Cuenca del río Bolaños	1999	255.7368	17.19
	2000	204.4947	13.74
	2001	469.8434	31.57

Los hidrogramas de las simulaciones para la cuenca del río Bolaños se muestran a continuación (Figuras VI.4, VI.5 y VI.6)

Figura VI.4 Hidrograma del año 1999 de la cuenca del río Bolaños.

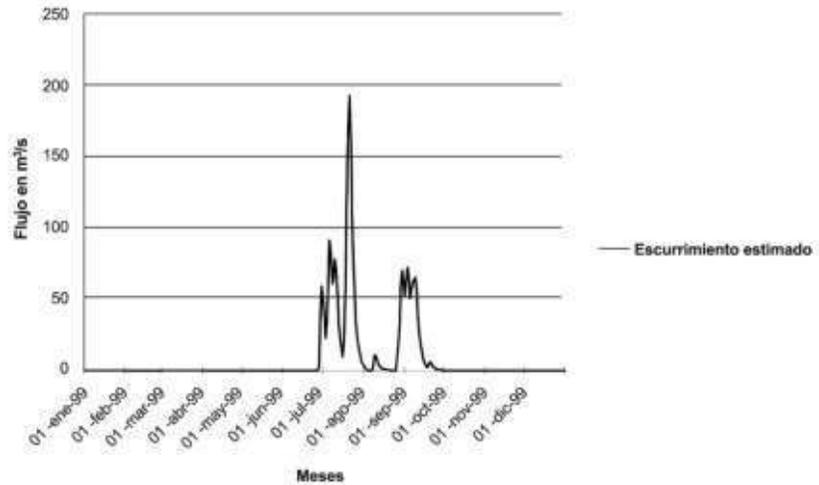


Figura VI.5 Hidrograma del año 2000 de la cuenca del río Bolaños.

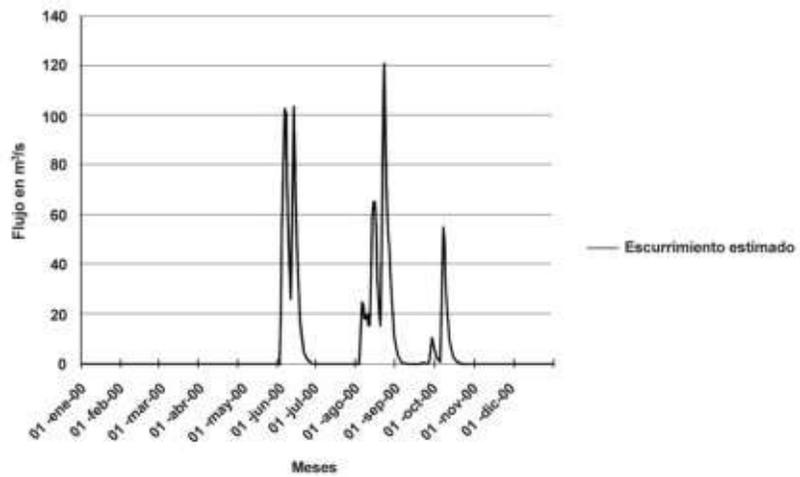
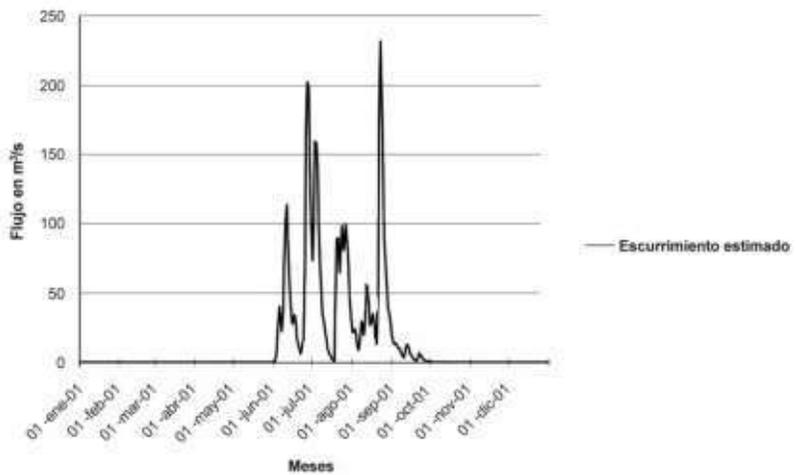


Figura VI.6 Hidrograma del año 2001 de la cuenca del río Bolaños.





Vista del embalse de Aguamilpa en las primeras horas de la mañana.

En cuanto se refieren a los resultados de la cuenca del río Santiago-Aguamilpa, se obtuvieron los siguientes volúmenes de escurrimiento (Tabla VI.4).

<b>TABLA VI.4 VOLÚMENES DE ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA DEL RÍO SANTIAGO AGUAMILPA.</b>			
<b>VOLÚMENES DE ESCURRIMIENTO ESTIMADO EN MILLONES DE METROS CÚBICOS Y MILÍMETROS</b>			
<b>Unidad</b>	<b>Año</b>	<b>Mm<sup>3</sup></b>	<b>mm</b>
Cuenca del río Santiago Aguamilpa	1999	1,288.6411	374.82
	2000	1,991.2044	579.18
	2001	552.3277	160.65

A continuación se presenta sus respectivos hidrogramas de los años 1999, 2000 y 2001 (Figuras VI.7, VI.8 y VI.9).

Figura VI.7 Hidrograma del año 1999 de la cuenca del río Santiago Aguamilpa.

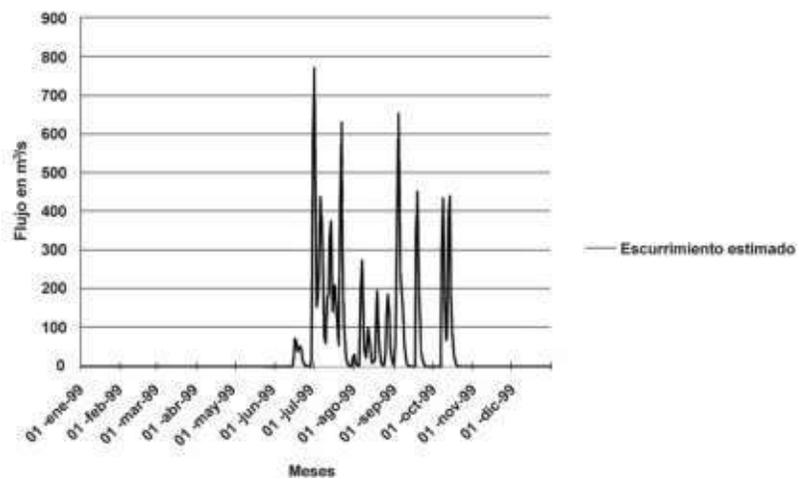


Figura VI.8 Hidrograma del año 2000 de la cuenca del río Santiago Aguamilpa.

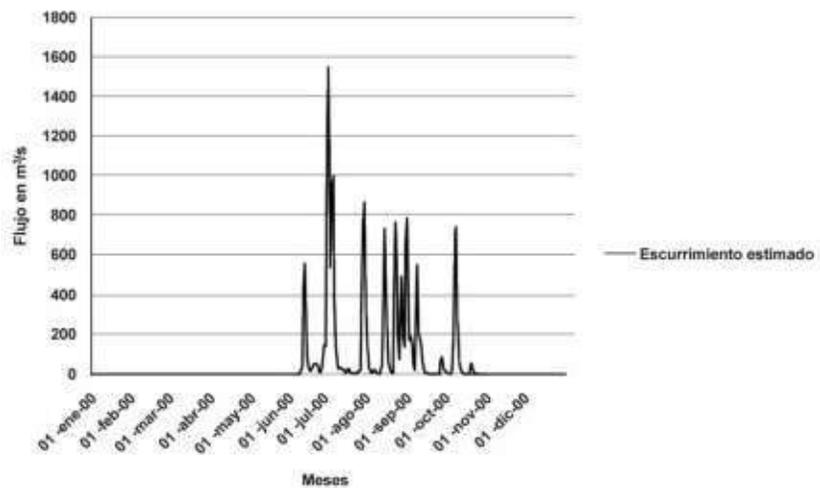
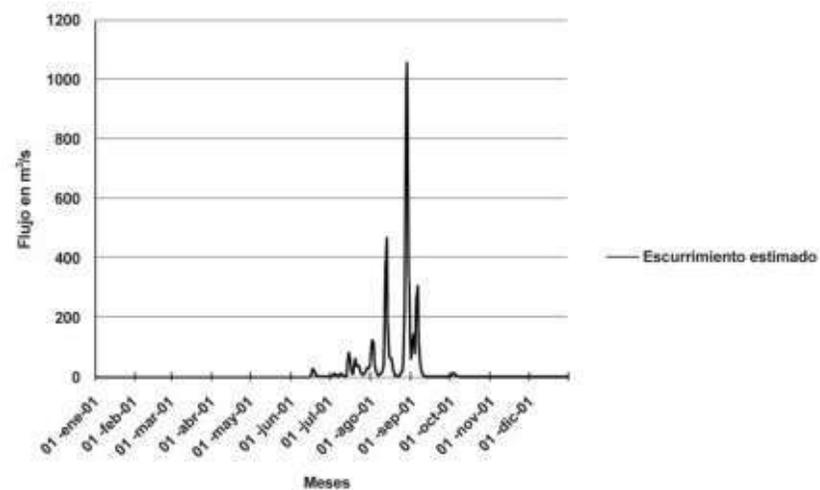


Figura VI.9 Hidrograma del año 2001 de la cuenca del río Santiago Aguamilpa.



## 4. Conclusiones

La estimación del escurrimiento obtenido con la combinación de los programas WMS 8.2 y HEC-HMS 3.3 y la correcta elección de los métodos, hace que dicha metodología en comparación con las convencionales facilite y agilice la estimación del escurrimiento de forma precisa, pues métodos como el de la SCS y los métodos directo e indirecto de la Norma Oficial Mexicana, no son aptos para periodos largos de simulación continua (Santillán *et al.*, 2010).

A pesar de que los resultados arrojados en este trabajo, derivados de los procesos de optimización y calibración de los parámetros del método SMA y la validación del modelo, se consideran aceptables con un error menor al 1%, es necesario recalcar que aunque se haya acertado con los valores reales de todos los parámetros introducidos y éstos se reflejen en la semejanza de los hidrogramas o en la cercanía de los volúmenes, se puede decir que los resultados arrojados en las cuencas de los ríos Huaynamota, Bolaños y Santiago-Aguamilpa, son resultados aproximados bajo importantes suposiciones, hechas a la hora de realizarse dicho trabajo, dada la falta de información hidrométrica en las cuencas estudiadas.

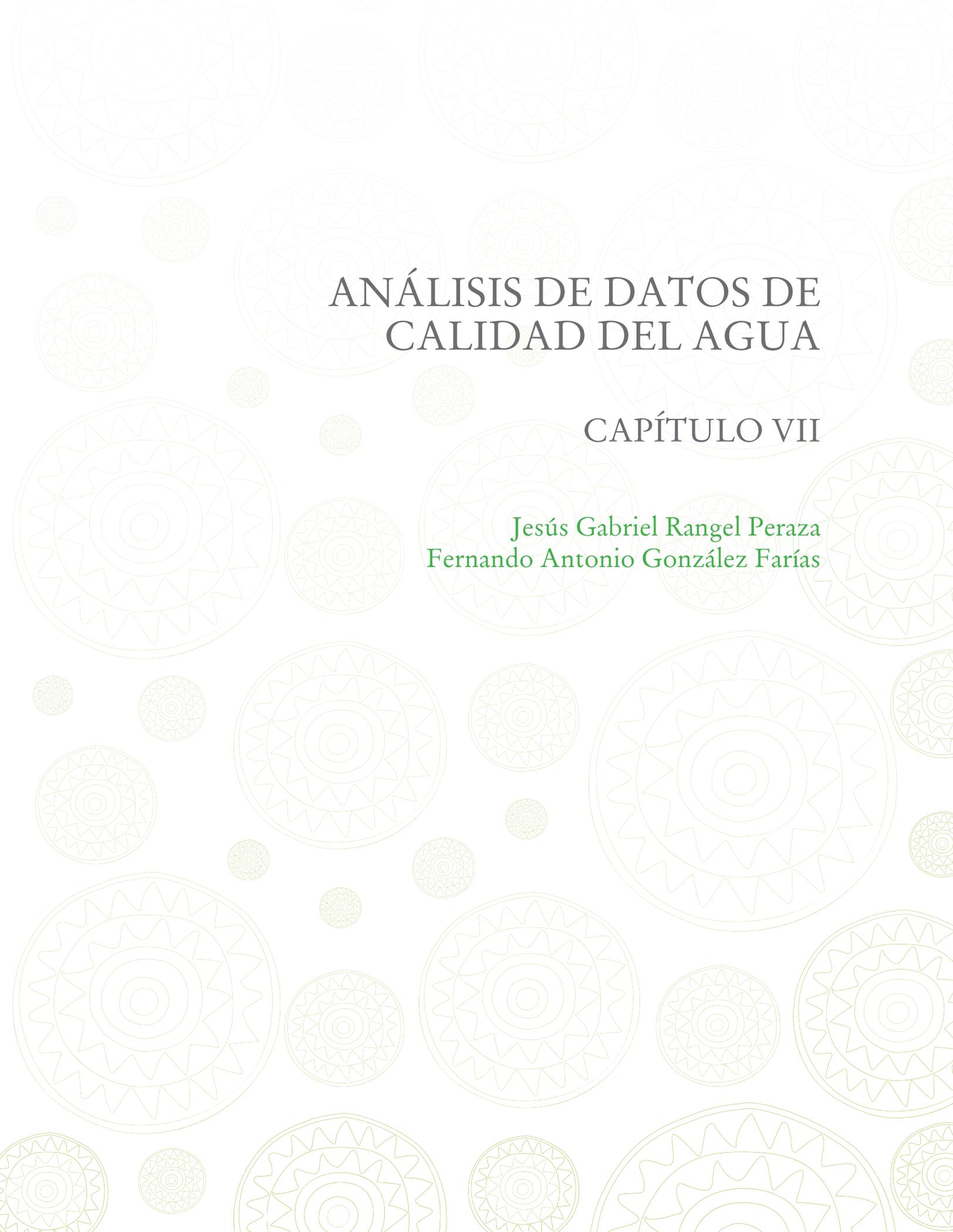
Finalmente, se puede concluir que las aplicaciones potenciales que tiene el trabajo presentado en este capítulo se pueden dirigir a la generación de un modelo calibrado de escurrimientos superficiales y su estimación, proporcionando información relevante para el control de avenidas y estimar riesgos por inundación o para el desarrollo de balances hídricos para propósitos de planeación, lo cual resulta relevante en el diseño de obras hidráulicas y desarrollo de infraestructura hidráulica, entre otras múltiples aplicaciones. ⚙️



## Referencias

- Chow, VT, Maidment Mays, LW (1988). Applied hydrology. New York, Mc Graw Hill.
- HEC-HMS (2008). Hydrologic Modeling System HEC-HMS V3.0.0.US Army Corps of Engineers®. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/download.html>.
- NOM-011-CNA-2000 Norma Oficial Mexicana. Conservación del recurso del agua – establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- NRCS (2004). National Engineering Handbook Part 630: Hydrologic, chapter 10. National Resources Conservation Service. <http://directives.sc.egov.usda.gov/17752.wba>.
- NWRI (1996). National Water Research Institute.WMS for Windows Version 1.0.User's Guide. Canada: NWRI.
- Santillan, E, Jarquin, Y, de Anda, J, Nelson, J, Olvera, M (en prensa). Desarrollo de una metodología para la estimación del escurrimiento superficial con WMS y HEC HMS. Artículo en proceso de arbitraje en la Revista Universidad y Ciencia.
- Scharffenberg, WA, Fleming, MJ (2008). Hydrologic Modeling System HEC-HMS.User's Manual. 289 pp.
- WMS (2006). Watershed Modeling System. Environmental Modeling Systems, Incorporated. <http://www.ems-i.com>.





# ANÁLISIS DE DATOS DE CALIDAD DEL AGUA

## CAPÍTULO VII

Jesús Gabriel Rangel Peraza  
Fernando Antonio González Farías



C.H. AG

## 1. Introducción

El desarrollo y la aplicación de un amplio rango de técnicas de modelado matemático que incluyen las características fisicoquímicas y biológicas del agua, se han producido como una respuesta a la necesidad de disponer de instrumentos para estimar y evaluar los impactos económicos, ambientales y ecológicos, a fin de formular y adoptar medidas relacionadas con la administración de recursos hídricos (Korfmacher, 1998; Ribeiro y Araújo, 2002).



Sin embargo, muchos de los esfuerzos para modelar lagos y presas no toman en cuenta la necesidad de probar si el comportamiento de dichas variables se encuentra asociado a características hidrológicas y climáticas de la cuenca. Como consecuencia, el modelo desarrollado puede ser confiable, únicamente, durante el período de tiempo en el cual son medidos los parámetros fisicoquímicos y biológicos. De esta forma, la información obtenida puede usarse de manera limitada para predecir el comportamiento de las condiciones de calidad de agua (Arheimer *et al.*, 2005; Ji, 2008).

Esta situación ocurre particularmente en las presas extensas y de reciente construcción, donde las características químicas y biológicas no se encuentran asociadas a las condiciones climáticas, o bien, en presas donde existan fuentes difusas de contaminación de forma tal que dichas variables no logran presentar un comportamiento estacional en el sistema.

Particularmente, la presa de Aguamilpa inició operaciones en 1994, no obstante de ser un cuerpo de agua relativamente nuevo, y dadas sus características dinámicas, es probable que las características fisicoquímicas y biológicas de la presa ya se encuentren asociadas a las variaciones del ciclo hidrológico propio de la cuenca.

En este sentido, el presente capítulo propone un método de evaluación estadístico del comportamiento temporal de los parámetros de calidad del agua, monitoreados durante el período de enero de 2000 a diciembre de 2007, a fin de conocer si la presa ha alcanzado una condición de estabilidad.

## 2. Metodología

### Monitoreo

En México, la calidad del agua se monitorea desde 1973 a través de la Red Nacional de Monitoreo (RNMCA) (Abarca, 2002), la cual está a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La RNMCA utiliza el índice de Calidad del Agua (ICA) como principal parámetro de referencia (CONAGUA, 2008). Por su parte, el ICA se basa en la determinación de hasta 35 variables fisicoquímicas y biológicas (López-Hernández *et al.*, 2007).

Durante el período de enero de 2000 a diciembre de 2007, la CONAGUA recolectó muestras de agua a 0.80 m de profundidad en una estación localizada en las coordenadas 21° 50' 23" latitud norte y 104° 47' 58" longitud oeste, ubicada junto a la cortina de la presa de Aguamilpa, que corresponde a la zona léntica de la presa.

Los parámetros monitoreados durante este período de estudio por la CONAGUA fueron: temperatura del agua, oxígeno disuelto, pH, conductividad, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes totales y fecales (CONAGUA, 2007). Los parámetros hidrológicos, hidrométricos y climáticos fueron obtenidos de una estación hidrometeorológica localizada en las coordenadas 21° 50' 32" latitud norte y 104° 46' 29" longitud oeste, a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). En esta estación se tomaron lecturas de manera automática y en tiempo real de la precipitación, evaporación, temperatura ambiente y volumen de agua en la presa, entre otras (CFE, 2008).

### Análisis estadístico

Los datos hidrológicos y de calidad del agua proporcionados por la CFE y la CONAGUA, respectivamente, fueron analizados y depurados de acuerdo a lo propuesto por Bartram y Balance (1996) y de Anda y Maniak (2007), para discriminar valores no confiables desde el punto de vista estadístico. El análisis de los datos en el presente trabajo fue realizado mediante el paquete estadístico Statgraphics Plus 7.1 (Statgraphics, 1994).

Se realizó un análisis estadístico descriptivo con los datos de calidad del agua reportados por la CONAGUA durante el período de 2000 a 2007. Se construyó una matriz con los datos hidroclimáticos y de calidad del agua de la presa y se agruparon según la fecha de colecta (de la Lanza-Espino *et al.*, 1998); los parámetros de calidad de agua se representaron gráficamente a fin de observar la variabilidad de los mismos y detectar su posible comportamiento estacional.

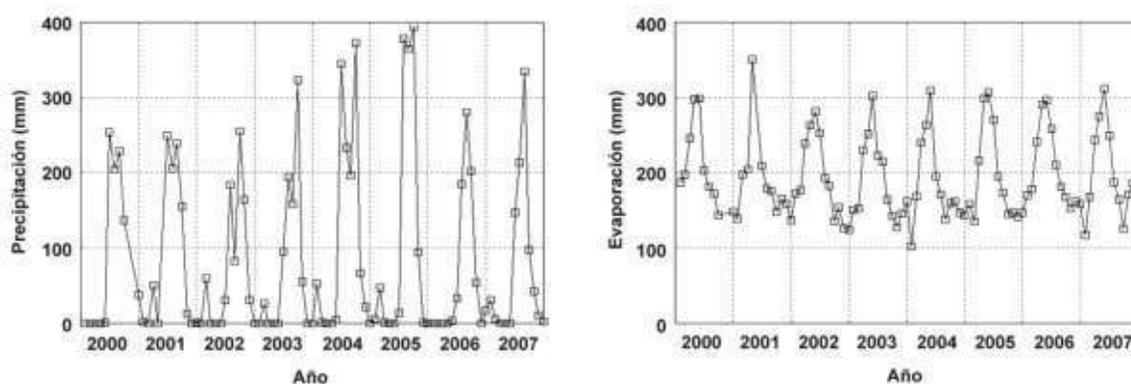


Figura VII.1 Precipitación y evaporación promedio mensual en la presa de Aguamilpa durante el período de estudio.

Para demostrar si el sistema responde de manera estable a los cambios en el régimen hidrológico y a las variaciones climáticas presentes en el área de estudio, se desarrolló un Análisis de Componentes Principales (ACP) (Jolliffe, 1986). Este análisis permite reducir las variables originales a un número menor de combinaciones lineales, identificando aquellos componentes que influyen mayormente en la variabilidad de los datos (de la Lanza-Espino *et al.*, 1998).

Por último, con los componentes extraídos a partir del ACP, se realizó un estudio comparativo entre las épocas de medición mediante un Análisis de Varianza (ANOVA); este análisis permite conocer las diferencias en el comportamiento de las características fisicoquímicas y biológicas de la presa y su respuesta a las épocas presentes.

### 3. Resultados

#### *Análisis estadístico de los datos*

Las características hidrológicas del área de estudio se presentan en la Figura VII.1. Los resultados muestran que el período de precipitación en el área de estudio comprende los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, con un valor máximo de 394.9 mm en septiembre de 2005; la evaporación máxima y mínima registradas durante el período de estudio fue de 350.95 mm en abril del año 2001 y 102.62 mm en enero de 2004, respectivamente, con una media mensual de  $194.19 \pm 5.82$  mm.

Por otro lado, la temperatura ambiente promedio en la presa de Aguamilpa señaló un intervalo de variación de  $21.9$  °C en enero de 2004 a  $29.7$  °C en junio del año 2006, con un promedio mensual de  $26.7 \pm 0.2$  °C (Figura VII.2).

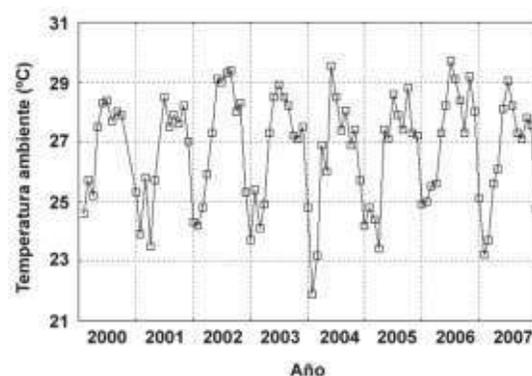


Figura VII.2 Temperatura ambiente mensual registrada en la presa de Aguamilpa de enero de 2000 a diciembre de 2007.

La Figura VII.3 muestra el volumen diario registrado en la presa durante el período de 2000 a 2007. El volumen promedio mensual mínimo ( $3,197.38 \pm 2.97$  Mm<sup>3</sup>) de la presa se presentó en el mes de junio de 2001, mientras que el volumen promedio mensual máximo ( $5,711.71 \pm 36.26$  Mm<sup>3</sup>) fue registrado en octubre del año 2004.

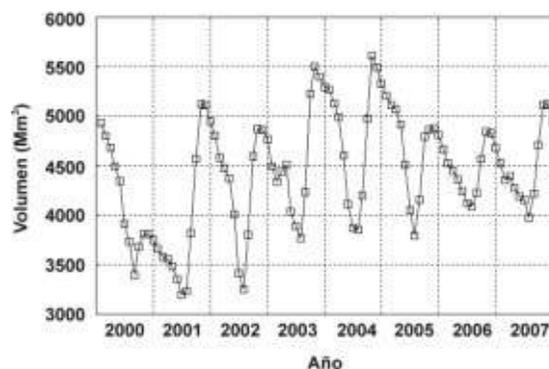


Figura VII.3 Volumen de agua mensual almacenado en la presa de Aguamilpa durante el período de enero de 2000 a diciembre de 2007.

TABLA VII.1 MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL (MEDIA), VARIABILIDAD (ERROR ESTÁNDAR) Y RANGO PARA LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS EN LA PRESA DE AGUAMILPA, NAYARIT (CONAGUA, 2007).					
PARÁMETRO	UNIDAD	NÚMERO DE DATOS	MEDIA	ERROR ESTÁNDAR	RANGO
Temperatura del agua	°C	41	27.0	0.4	20.0 – 31.0
Oxígeno disuelto	mg/l	49	4.84	0.25	1.30 – 8.10
pH		41	7.64	0.08	6.46 – 8.43
Conductividad	µS/cm	39	271	9	150 – 371
DQO	mg/l	47	13.71	0.73	3.60 - 24.00
DBO	mg/l	49	1.96	0.31	0.20 – 4.80
SST	mg/l	41	22.0	3.5	1 – 97.5
Coliformes totales	NMP/100ml	52	*3,263		15 – 241,960
Coliformes fecales	NMP/100ml	52	*182		3 – 46,000

\*Media geométrica

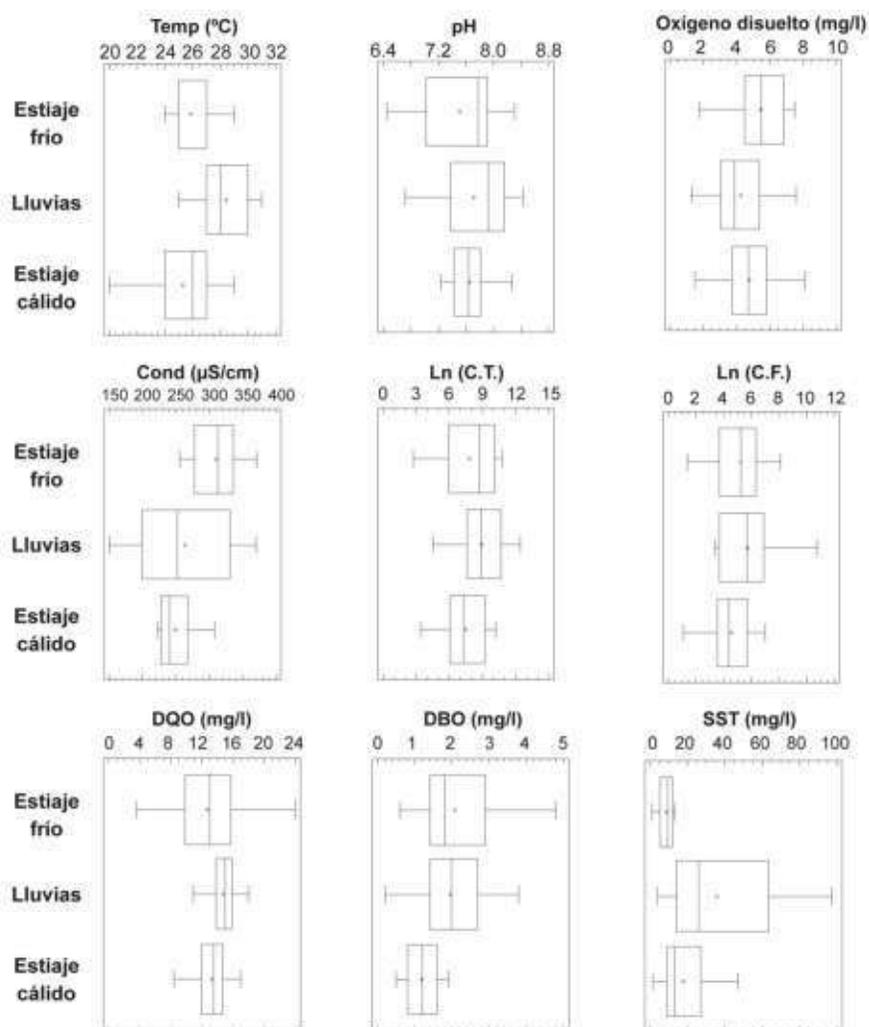


Figura VII.4 Diagrama de caja y bigotes de los parámetros físicoquímicos y microbiológicos de calidad del agua de la presa.





El tratamiento estadístico de los datos de calidad de agua se inició con un análisis descriptivo de los datos disponibles. El análisis estadístico descriptivo de los parámetros fisicoquímicos medidos en la cortina de la presa de Aguamilpa se muestra en la Tabla VII.1.

La distribución y descripción estadística de los datos de calidad del agua agrupados por época, se muestran en los diagramas de caja y bigotes (Box and Whisker Plot) (Figura VII.4). Este diagrama permite visualizar las variaciones de los parámetros de calidad de agua entre cada época y además se utiliza para detectar valores atípicos que puedan estar presentes en el conjunto de datos analizados.

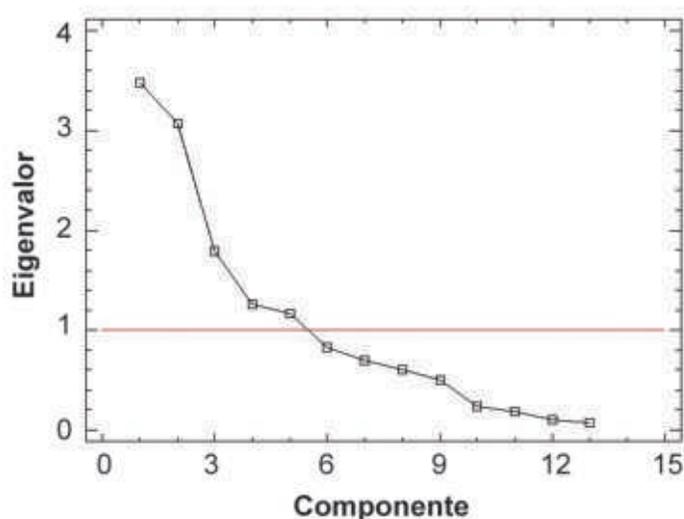


Figura VII.5 Gráfico de sedimentación del análisis de componentes principales.

Los resultados obtenidos del ACP se presentan en la Figura VII.5. Dicho análisis permitió reducir las dimensiones del problema mediante la obtención de variables sintéticas, correspondientes a cinco diferentes combinaciones lineales a partir de las trece variables originales.

Tales combinaciones lineales explicaron un 76.86% de la variabilidad observada (Tabla VII.2). Este análisis permitió, además, determinar los parámetros de calidad del agua que se encuentran asociados a los parámetros hidrológicos con el fin de sustentar las inferencias en los cambios de las características de calidad del agua de la presa a lo largo del ciclo hidrológico.

TABLA VII.2 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP).			
Componente	Autovalor	% Varianza	% Acumulado
1	3.477	24.84	24.84
2	3.067	21.91	46.75
3	1.790	12.79	59.54
4	1.257	8.98	68.52
5	1.167	8.34	76.86

Con estas nuevas variables, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía a fin de demostrar diferencias en la calidad de agua para cada época del año. Los valores F del ANOVA de los componentes principales extraídos se presentan en la Tabla VII.3. El ANOVA mostró un efecto de la época del año sobre las componentes 1 y 2, a un nivel de confianza del 95%.

TABLA VII.3 VALORES F CALCULADOS MEDIANTE UN ANOVA PARA LOS COMPONENTES EXTRAÍDOS DEL ACP.	
Componente	Valor F
1	29.51**
2	16.26**
3	0.23
4	0.25
5	2.14

\*\*Presenta diferencia significativa ( $p < 0.05$ )

Con la finalidad de verificar la respuesta del efecto encontrado para el ANOVA, se realizó una prueba de rangos múltiples aplicando el método de las diferencias de mínimos cuadrados (LSD) con un nivel de confianza del 95%.

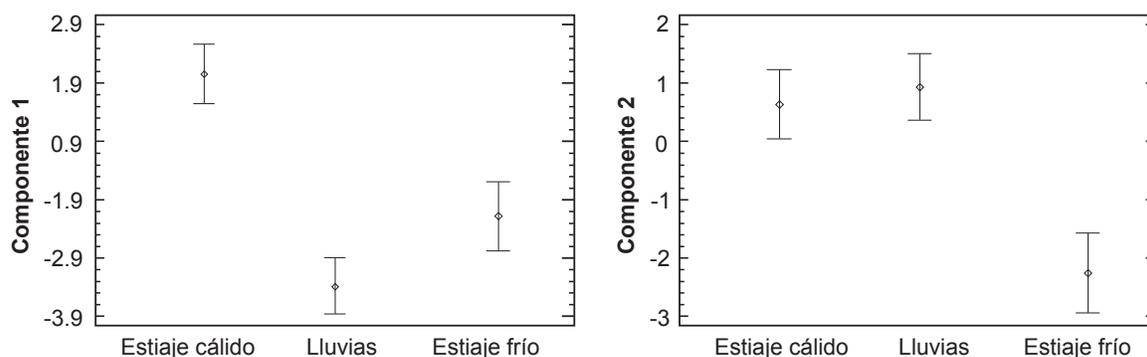


Figura VII.6 Gráfico de medias e intervalos de los componentes significativos del ANOVA.

La respuesta determinada para el componente 1 está definida en tres grupos homogéneos: estiaje cálido, lluvias y estiaje frío, mientras que para el componente 2, la época de estiaje frío tiene un efecto significativo en los parámetros de calidad del agua (Figura VII.6). Los parámetros que integran las componentes que presentaron efecto sobre los parámetros de calidad del agua se muestran en la Tabla VII.4.

TABLA VII.4 TABLA DE PESOS PARA LOS COMPONENTES 1 Y 2.			
Parámetro	Componente 1	Parámetro	Componente 2
SST	-0.424	Temp. ambiente	0.420
Evaporación	0.421	Volumen	-0.398
Temp. del agua	-0.373	Coliformes tot.	0.342
Precipitación	-0.359	Precipitación	0.261
Conductividad	0.340	DBO	0.231

### *Descripción de los resultados*

El análisis de los parámetros hidrológicos y climáticos sugieren la presencia de tres épocas: el estiaje cálido en los meses de marzo, abril, mayo y junio, el estiaje frío en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, y lluvias en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.

El rango de variación de la temperatura registrado en la superficie del agua en la presa de Aguamilpa se considera característico para los cuerpos de agua tropicales y adecuado para el desarrollo de la biota en la presa (de Anda *et al.*, 1998; Guarino *et al.*, 2005; Mustapha, 2008).

La concentración de oxígeno disuelto en el agua superficial se mantuvo en promedio por arriba de los 4 mg/l durante el período de estudio, donde el valor máximo de oxígeno disuelto en agua superficial de la presa de Aguamilpa se observó durante la época de estiaje frío, coincidiendo con lo reportado por Lewis (2000).

El pH promedio ( $7.64 \pm 0.08$ ) medido en la superficie del agua durante el período de enero de 2000 a diciembre de 2007 denota que la presa de Aguamilpa es ligeramente alcalina. Los resultados revelaron una baja variabilidad del pH en

la superficie de agua de la presa en las diferentes épocas identificadas durante el período de estudio. Estos valores se consideran dentro del intervalo normal para estos cuerpos de agua (Wetzel, 1993).

La influencia de la cuenca sobre las características fisicoquímicas en el cuerpo de agua se confirma con el incremento en la cantidad de SST registrada durante el periodo de lluvias. Esta situación puede estar asociada a los escurrimientos, los cuales son la principal fuente de material sólido suspendido en el cuerpo de agua (de Anda *et al.*, 2004; Kemdirim, 2005).

De acuerdo con la clasificación propuesta por Péfaur (1995), los valores de conductividad registrados en la superficie de la presa de Aguamilpa pueden suponerse como normales. En esta clasificación se consideran bajos los niveles de conductividad menores a  $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ , medios aquellos con un rango entre 50 y  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ , y los valores por arriba de  $500 \mu\text{S}/\text{cm}$  se consideran altos.

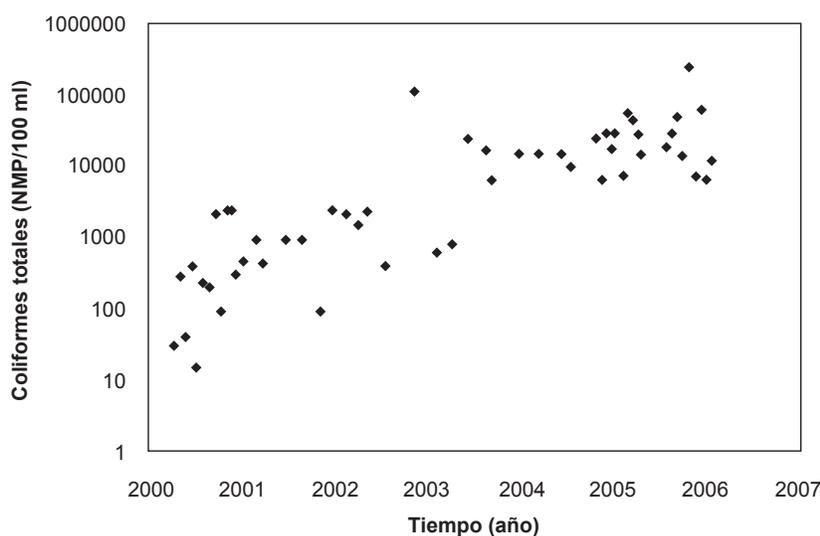


Figura VII.7 Comportamiento de los coliformes totales en la presa de Aguamilpa durante el período de estudio.

Por otro lado, Chapman (1996) propone una concentración máxima de DQO y DBO de  $20 \text{ mg}/\text{l}$  y  $2 \text{ mg}/\text{l}$ , respectivamente, como indicadores de contaminación orgánica en cuerpos de agua superficiales; tomando en cuenta los criterios señalados anteriormente, la presa de Aguamilpa no presenta contaminación por materia orgánica en las aguas superficiales.





Esto coincide con lo señalado por la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual señala un valor máximo de DBO de 30 mg/l. Cabe señalar que dicha norma es hasta hoy, la única normatividad de referencia existente en México para la regulación de la contaminación en cuerpos de agua, a pesar de que dicha norma se encuentra orientada para su aplicación en la regulación de la concentración de contaminantes para las descargas de agua residual a cuerpos de agua nacionales.

La concentración media de bacterias coliformes totales registradas en el sitio de muestreo de la presa durante el período de estudio (Figura VII.7), se encuentra por arriba de las concentraciones recomendadas por la USEPA (2006), quien señala que la concentración máxima de coliformes fecales para fines recreativos y para pesca y navegación es de 100 NMP/100 ml y 1,000 NMP/100 ml. Dicha situación confirma lo señalado por García-Cabrera (2007), quien ya había documentado la problemática de la presa por la presencia de bacterias coliformes, lo cual representa un riesgo para la salud pública y los múltiples usos de la presa.

#### *4. Conclusiones*

La aplicación de los métodos multivariantes como herramienta de análisis ha permitido correlacionar de manera eficiente las variables fisicoquímicas y biológicas del sistema con las variables hidrológicas y climáticas del mismo.

A partir de este análisis se determinó que los parámetros de calidad del agua que conforman la componente 1 (temperatura del agua, conductividad, sólidos suspendidos totales) muestran un comportamiento significativamente diferente en las tres épocas, estiaje cálido, lluvias y estiaje frío, mientras que las variables que conforman la componente 2 (demanda bioquímica de oxígeno y coliformes totales) responden solo a las variaciones en el ciclo hidrológico.

Por consiguiente, esta herramienta puede ser igualmente utilizada para explicar el comportamiento de otros cuerpos de agua en zonas tropicales, reforzando con ello los criterios de aplicación de modelos predictivos de la calidad del agua en sistemas de agua dulce.



Aguas turbias durante el estiaje frío en el embalse de Aguamilpa.

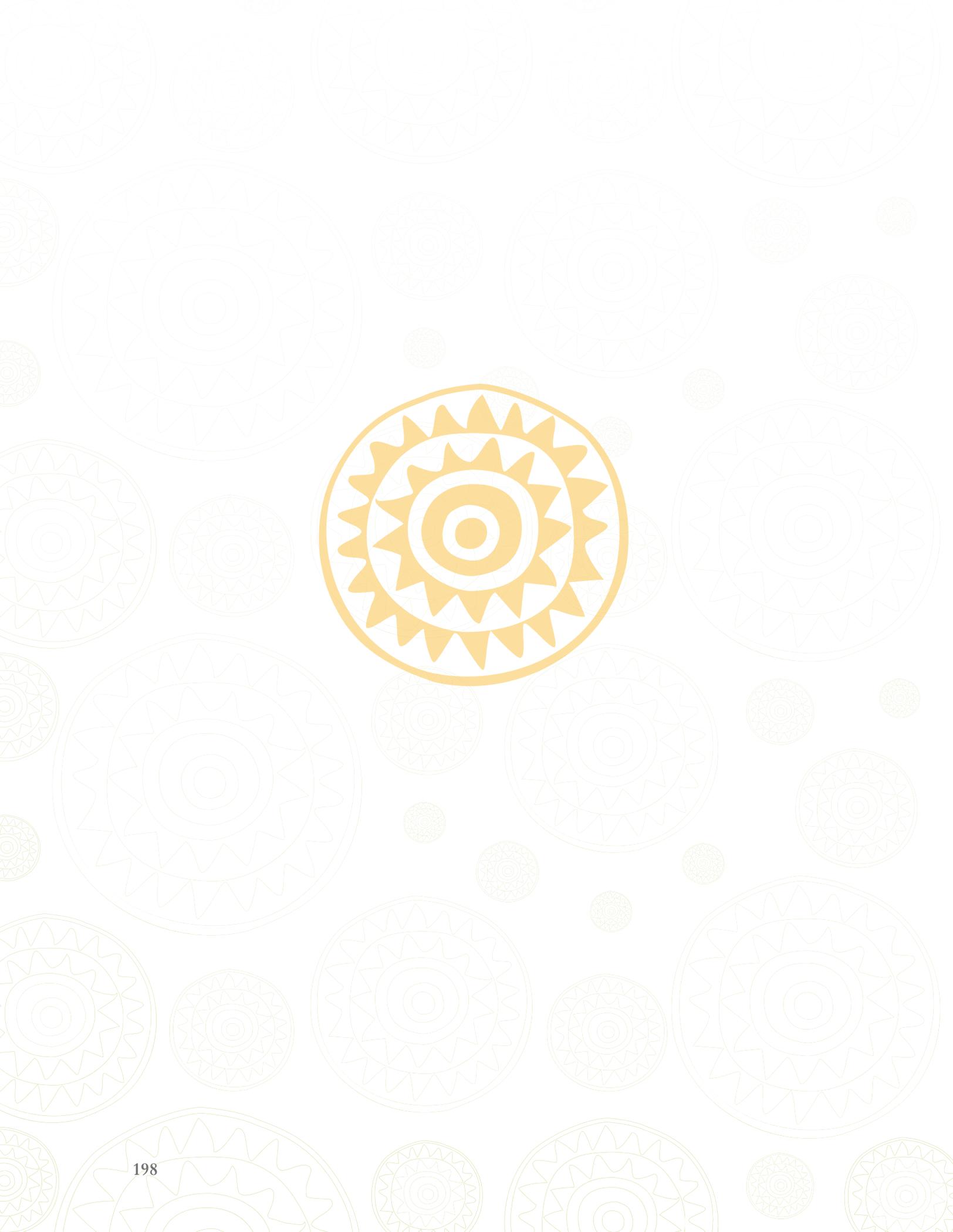
Los resultados muestran que para llevar a cabo la caracterización de las condiciones fisicoquímicas y biológicas de una presa tropical próxima al nivel del mar, no basta con realizar el estudio de la misma únicamente durante la época de estiaje y lluvias, tal como se explica en la mayoría de los estudios reportados en la literatura con estas características, sino que es necesario considerar que existen diferencias entre la época de estiaje frío y estiaje cálido ya que existen cambios notables en las variables antes mencionadas.

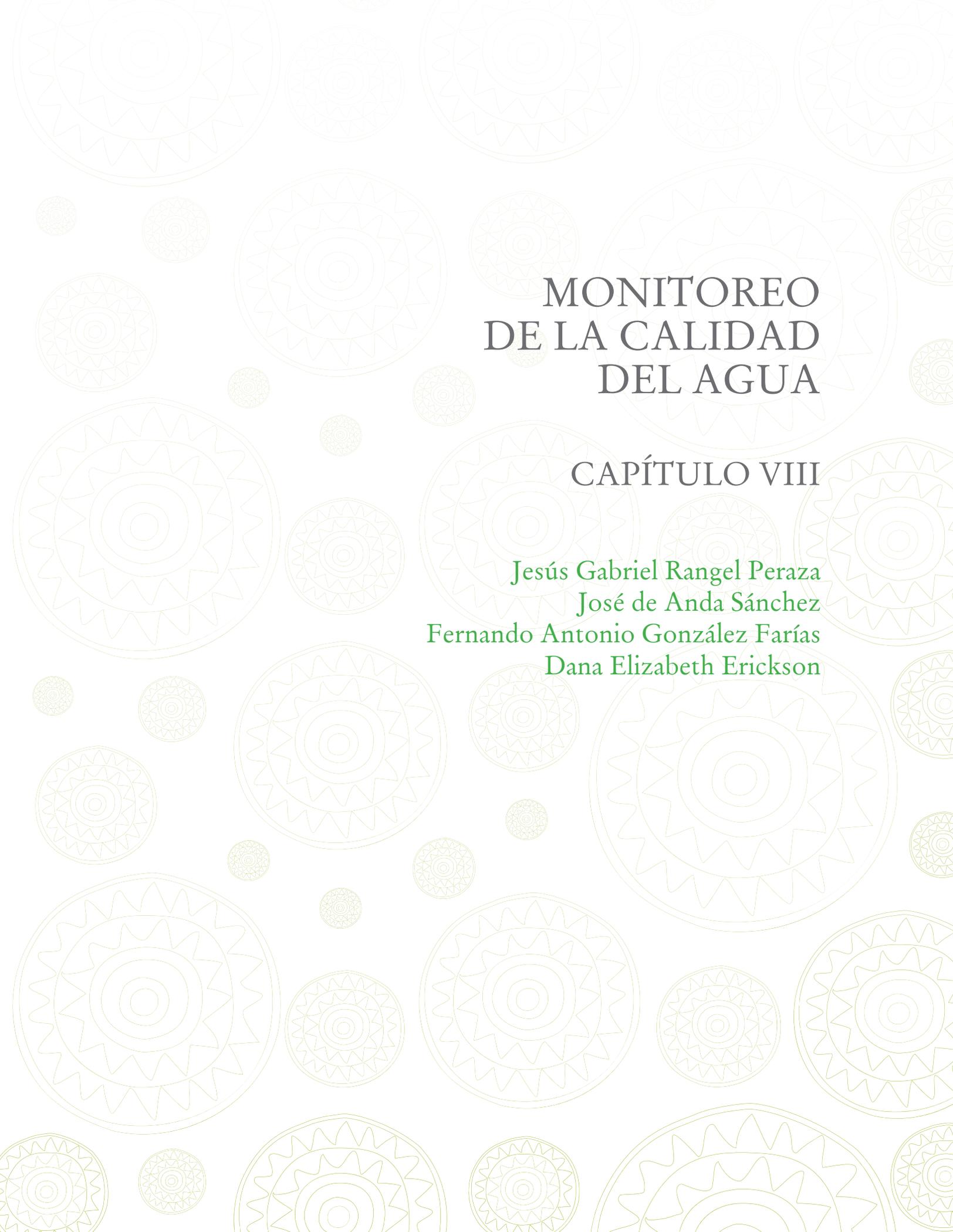
Finalmente, se reconoce que para lograr una mayor comprensión del comportamiento de la presa en su conjunto, es necesario extender el estudio a otros sitios de monitoreo que comprendan las diferentes zonas de la presa (zona fluvial, zona de transición y zona léntica). Asimismo, sería conveniente tener dos puntos de monitoreo adicionales en la zona léntica con la finalidad de validar que el comportamiento observado de las variables fisicoquímicas y biológicas en el sitio seleccionado para el monitoreo sea reproducible o similar al observado en el presente estudio.☀

## Referencias

- Arheimer, B, Andréasson, J, Fogelberg, S, Holger, J, Pers, CB, Persson, K (2005). Climate change impact on water quality: model results from southern Sweden. *AMBIO*, 34(7): 559-566.
- Bartram, J, Balance, R(1996). *Water Quality Monitoring*. Reino Unido E&FN Spon.
- CFE (2008). Registro de observaciones hidrométricas y climatológicas en el embalse de Aguamilpa. [Online]:[http://h06814.iie.org.mx/presas\\_cfe/semanapresacaracol.aspx?estacion=agu](http://h06814.iie.org.mx/presas_cfe/semanapresacaracol.aspx?estacion=agu)
- Chapman, DV (1996). *Water Quality Assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Reino Unido. E&FN Spon.
- CONAGUA (2007). Datos de calidad del agua en la presa de Aguamilpa. México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA (2008). Estadísticas del agua en México. Edición 2008. México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- de Anda, J, Quiñones-Cisneros, SE, French, RH, Guzmán, M(1998). Hydrologic Balance of Lake Chapala. *JAWRA*, 34(6): 1319-1331.
- de Anda, J, Shear, H, Maniak, U, Zárate del Valle, PF(2004). Solids distribution in Lake Chapala, Mexico. *JAWRA*, 40(1):97-109.
- de Anda, J, Maniak, U(2007). Modificaciones en el régimen hidrológico y sus efectos en la acumulación de fósforo y fosfatos en el Lago de Chapala, México. *Interciencia*, 32(2):100-107.
- de la Lanza-Espino, G, Sánchez-Santillán, N, Esquivel-Herrera, A (1998). Análisis temporal y espacial fisicoquímico de una laguna tropical a través del análisis multivariado. *Hidrobiológica*, 8(2): 89-96.
- García-Cabrera, J (2007). Plancton como indicador de calidad del agua en la presa Aguamilpa. *Ingeniería hidráulica en México*, 22(1):103-116.
- Guarino, AWS, Branco, CWC, Diniz, GP, Rocha, R(2005). Limnological characteristics of an old tropical reservoir (Ribeirao das Lajes Reservoir, RJ, Brazil). *Acta Limnol. Bras.*,17(2):129-141.
- Ji, Z-G (2008). *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. Estados Unidos de América, Wiley-Interscience.
- Jolliffe, IT (1986). *Principal Component Analysis*. Estados Unidos de América. Springer-Verlag.
- Kemdirim, EC (2005). *Studies on the hydrochemistry of Kangimi reservoir*,

- Kaduna State, Nigeria. *Afr. J. Ecol.*, 43:7-13.
- Korfmacher, KS (1998). Water quality modeling for environmental management: Lessons from the policy sciences. *Policy Sciences*, 31(1): 35-54.
- Lewis, WM (2000). Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 5: 35-48.
- López-Hernández, M, Ramos-Espinosa, MG, Carranza-Fraser, J (2007). Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el río Lerma y lago de Chapala, México. *Hidrobiológica*, 17(1 Sup.): 17-30.
- Mustapha, MK (2008). Assessment of the Water Quality of Oyun Reservoir, Offa, Nigeria, Using Selected Physico-Chemical Parameters. *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.*, 8: 309-319.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Péfaur, JE (1995). Metodología de un análisis faunístico integral en el estudio de una cuenca hidrográfica. *Rev. Ecol. Lat. Am.*, 2(1-3): 59-67.
- Ribeiro, CHA, Araújo, M (2002). Mathematical modelling as a management tool for water quality control of the tropical Beberibe estuary, NE Brazil. *Hydrobiologia*, 476: 229-237.
- Statgraphics Plus Version 7.1 (1994). Users guide reference. México, Statistical Graphics.
- USEPA (2006). 2006 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories. Estados Unidos de América. EPA 822-R-06-013. Office of Water.
- Wetzel, RG (1993). *Limnología*. Portugal, Fundacao Calouste Gulbenkian.





# MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA

## CAPÍTULO VIII

Jesús Gabriel Rangel Peraza  
José de Anda Sánchez  
Fernando Antonio González Farías  
Dana Elizabeth Erickson



## 1. Introducción

La desigualdad en la distribución del agua dulce entre las regiones naturales y económicas del mundo, aunada al desarrollo socioeconómico sin una planeación, trae consigo la desigualdad social, debido a que las regiones con mayores recursos económicos disponen de mayor acceso al agua, independientemente de los costos económicos, sociales o ambientales.



En el mundo, seis países disponen del 40% del total del agua dulce del planeta y muchos otros países disponen de este recurso de manera estacional, lo que ha dificultado su aprovechamiento; dicha situación ha obligado a la construcción de la infraestructura necesaria para la captación y distribución del líquido (Revenga *et al.*, 2000).

Por lo general las intervenciones en el ciclo hidrológico natural, mediante el represamiento de los ríos se llevan a cabo para generar beneficios a la población, entre los que se tienen la irrigación de terrenos, la protección contra inundaciones, la recreación, el suministro de agua potable, la generación de energía eléctrica y la mejora en la navegación. Sin embargo, la experiencia ha mostrado que el resultado a largo plazo de la degradación ambiental frecuentemente excede esos beneficios (Chapman, 1996).

Los lagos y presas alrededor del mundo son componentes críticos en el sistema ecológico; proveen hábitat y alimento a muchas especies de peces y fauna silvestre, y son también una fuente de agua para una cantidad importante de industrias (Dinar *et al.*, 1995). Debido a la escasez de lagos naturales, los países ubicados en regiones tropicales construyen presas paralelamente con su desarrollo económico, convirtiendo a las presas en el cuerpo de agua predominante en muchas regiones (Lewis, 2000).

Hoy en día, existen más de 800,000 presas construidas en el mundo (WCD, 2000). Estos ecosistemas, aunque no contribuyen de manera significativa en el área de la superficie global, ofrecen los mismos servicios ambientales a las poblaciones

urbanas y rurales que se encuentran en sus alrededores que los realizados por los lagos. Sin embargo, estos cuerpos de agua son más susceptibles a la contaminación y degradación que los lagos (Wetzel, 1993).

Por tal motivo, el estudio de los cuerpos de agua localizados en latitudes tropicales debe estar fuertemente orientado hacia las presas, con el objetivo de ser una fuente particularmente importante de información científica y tecnológica.

El conocimiento actual sobre el comportamiento de las características fisicoquímicas y biológicas en presas localizados en regiones tropicales se debe, en gran parte, a los estudios que se han desarrollado en las últimas décadas, particularmente en latitudes bajas del trópico (Melack, 1996; Casallas y Gunkel, 2001). Sin embargo, dicho conocimiento es restringido puesto que los estudios se han realizado en cuerpos de agua tropicales localizados en alta montaña, que son someros, a diferencia de los ubicados en zonas bajas que son más profundos (Gunkel, 2003; Ramírez y Plata-Díaz, 2008).

Las presas representan el mayor volumen de agua almacenada disponible en México, con una capacidad de almacenamiento aproximada del 70% (CONAGUA, 2008); a pesar de su importancia, son escasos los trabajos publicados sobre la cantidad y calidad del agua en estos cuerpos de agua (de la Lanza-Espino *et al.*, 2000; de la Lanza-Espino y García-Calderon, 2002; Cotler-Ávalos *et al.*, 2006), por lo que su influencia en el ámbito de las políticas públicas para la protección y restauración ha sido limitada.

Los estudios sobre las presas en México han sido realizados más como una necesidad para resolver un problema puntual y no como producto de una planeación estratégica (Arredondo-Figueroa *et al.*, 2007). Sin embargo, el análisis integrado de esta información permite contar con un panorama generalizado acerca de las características limnológicas que distinguen a estas presas, comprendiendo mejor el comportamiento de estos cuerpos de agua que son característicos de los ambientes cálidos-húmedos (Arredondo-Figueroa *et al.*, 2007).

El sistema Lerma-Santiago da origen a la presa de Aguamilpa que, a partir del cambio de régimen de circulación con la construcción de las diversas presas que se encuentran a lo largo del río Santiago, podría presentar síntomas de eutrofización



Río Santiago aguas abajo de la presa El Cajón.

(de Victorica-Almeida, 1993; García-Cabrera, 2007; Peña-Messina *et al.*, 2007). Por otro lado, el aporte de aguas residuales de origen agrícola, industrial y urbano que recibe de la cuenca alta del río Santiago y de la Zona Metropolitana de Guadalajara, constituye uno de los problemas más severos de contaminación a las aguas de este río (von Bertrab, 2003; Durán y Torres, 2003).

Gracias a las contribuciones de los ríos Verde Grande, Juchipila, Bolaños y Huaynamota y a la sedimentación a lo largo del recorrido del río Santiago, se presenta un efecto de dilución, favoreciendo en cierta medida a su proceso de depuración natural antes de llegar al Océano Pacífico (Peña-Messina *et al.*, 2007). Se ha reconocido a nivel mundial que para la protección efectiva de los recursos naturales, se requiere conocer a detalle las condiciones ambientales existentes y esto depende en gran medida de la habilidad para detectar y medir cambios en dichas condiciones (León-Vizcaíno, 1992).

En este sentido, los estudios en relación a la cantidad y calidad del agua para la presa de Aguamilpa son recientes (Tabla VIII.1), pero a su vez son limitados como para determinar las condiciones de calidad de agua del ecosistema (Ontiveros-Retes, 1993; de Victorica-Almeida, 1993, 1995; Aranguré-Zúñiga *et al.*, 2005; Zambrano-Cárdenas *et al.*, 2005; García-Cabrera, 2007).

Dada la importancia de la presa de Aguamilpa en la generación de energía eléctrica, la producción piscícola, el suministro de agua para riego agrícola, además de que representa un importante aporte de agua dulce a humedales costeros de Nayarit y una posible fuente de abastecimiento público para los próximos años (Superintendencia CFE Aguamilpa, 2007, com. per.), se hace evidente la necesidad de conocer con mayor precisión, las características de la calidad de agua de este importante embalse.

<b>TABLA VIII.1 ESTUDIOS EN RELACIÓN A LA CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA PARA LA PRESA DE AGUAMILPA</b>			
<b>REFERENCIA</b>	<b>TIPO DE INFORMACIÓN</b>	<b>FUENTE</b>	<b>TÍTULO DEL ESTUDIO REALIZADO</b>
Ontiveros-Retes (1993)	Cantidad de agua	Tesis de maestría	Modelo para el pronóstico en tiempo real de las avenidas que ingresarán al proyecto hidroeléctrico Aguamilpa.
de Victorica-Almeida (1993)	Calidad del agua	Reporte técnico	Impacto a la calidad del agua por el proyecto hidroeléctrico Aguamilpa, Nayarit.
de Victorica-Almeida (1995)	Calidad del agua	Tesis doctoral	Análisis de la dinámica de calidad del agua en lagos y embalses.
de Victorica-Almeida (1996)	Calidad del agua	Publicación	Modelo para simular la evolución de oxígeno disuelto en embalses.
Aranguré-Zúñiga <i>et al.</i> (2005)	Calidad del agua	Tesis de maestría	Contaminación por residuos de plaguicidas organoclorados en sedimentos y peces de la presa Aguamilpa, Nayarit.
Zambrano-Cárdenas <i>et al.</i> (2005)	Calidad del agua	Tesis de maestría	Niveles de contaminación por metales pesados en sedimentos y peces de la presa Aguamilpa.
García-Cabrera (2007)	Calidad del agua	Publicación	Plancton como indicador de calidad del agua en la presa Aguamilpa.
Peña-Messina <i>et al.</i> (2007)	Calidad del agua	Capítulo de libro	Producción acuática en el embalse de Aguamilpa.
Obregón (2008)	Cantidad y calidad del agua	Tesis de maestría	Evaluación de un modelo de calidad del agua en regiones subtropicales.

## 2. Metodología

### *Calibración de los sensores de la sonda multiparámetros.*

Se llevó a cabo un muestreo en la presa de Aguamilpa de manera bimestral durante el período de junio del 2008 a abril del 2009.

El muestreo se realizó entre las 8:00 y 14:00 horas desde la superficie de agua (0.80 m) hasta los 120 m de profundidad durante todo el período de estudio en una estación localizada en las coordenadas 21° 50' 23" latitud norte y 104° 47' 58" longitud oeste, junto a la cortina de la presa, en la zona más profunda de la presa (zona léntica).

Los perfiles verticales de temperatura, oxígeno disuelto, pH, potencial de óxido-reducción (Eh), conductividad, la clorofila total y las algas verde-azules fueron replicados por cada muestreo realizado, utilizando una sonda de calidad de agua (YSI Modelo 6600D).

Asimismo, se tomaron muestras control para la medición de la concentración de oxígeno disuelto, las cuales se fijaron en campo para su análisis en el laboratorio por el método de Winkler (APHA, 2005). Además, se midió la transparencia del agua mediante la utilización del disco de Secchi (Tyler, 1968) anotando el valor promedio de las mediciones obtenidas al bajar y subir el disco en el lado sombreado de la embarcación.



La sonda fue calibrada *in situ* antes de cada campaña de muestreo.







Preparación de la sonda multiparámetros para mediciones en campo.

El principio de operación para la medición de clorofila por medio de la sonda YSI es similar al de los fluorómetros tradicionales, los cuales hacen pasar un haz de luz en la muestra a una longitud de onda apropiada (470 nm), induciendo a la clorofila a fluorescer, y midiendo posteriormente la fluorescencia emitida (entre los 650 y 700 nm).

La determinación de las algas verde-azules se basa en la capacidad que tiene la ficocianina de fluorescer entre los 600 y 700 nm de la región del espectro, cuando se encuentra presente en las células de las algas verde-azules (YSI, 2008). Se tomaron muestras superficiales en botellas plásticas de 1 litro de capacidad, que se fijaron con acetato de lugol al 1%, hasta que la muestra tomó un color coñac. Las muestras se tomaron durante los meses de octubre y diciembre del 2008 y se analizaron con ayuda de un microscopio invertido de acuerdo al método de Utermöhl realizando el cálculo de las abundancias en células por mililitro. Estos resultados fueron comparados con las algas verde-azules medidas *in situ* a fin de validar el proceso de cuantificación de la sonda.



Estación hidrometeorológica instalada en la presa de Aguamilpa.

Finalmente, se obtuvieron datos de una estación meteorológica que opera en tiempo real en la presa, la cual se localiza en las coordenadas  $21^{\circ} 50' 32''$  latitud norte y  $104^{\circ} 46' 29''$  longitud oeste, a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a fin de contar con los datos diarios de precipitación, temperatura ambiente y volumen de la presa (CFE, 2008).

### 3. Resultados

Las características hidrológicas y climáticas del área de estudio durante el período de estudio, de abril del 2008 a abril del 2009, se describen en la en la Figura VIII.1. Los resultados corroboran la presencia de las tres épocas identificadas en el capítulo anterior, estiaje cálido, lluvias y estiaje frío.

La temperatura ambiente en el área de estudio mostró un intervalo mensual de variación de  $23.1 \pm 0.1$  °C en diciembre del 2008 y de  $28.6 \pm 0.5$  °C en mayo del 2008 con una temperatura promedio anual de  $26.1 \pm 0.1$  °C. En el mes de julio del 2008, se registró la máxima precipitación durante el período de estudio con un valor de 531.4 mm, correspondiendo a su vez con el volumen más alto en la presa de Aguamilpa de  $5,786.19 \pm 36.26$  Mm<sup>3</sup> en septiembre del 2008. Por otro lado, el volumen mínimo fue observado al inicio del mes de julio del 2008 con un valor de  $3,197.38 \pm 2.97$  Mm<sup>3</sup>.

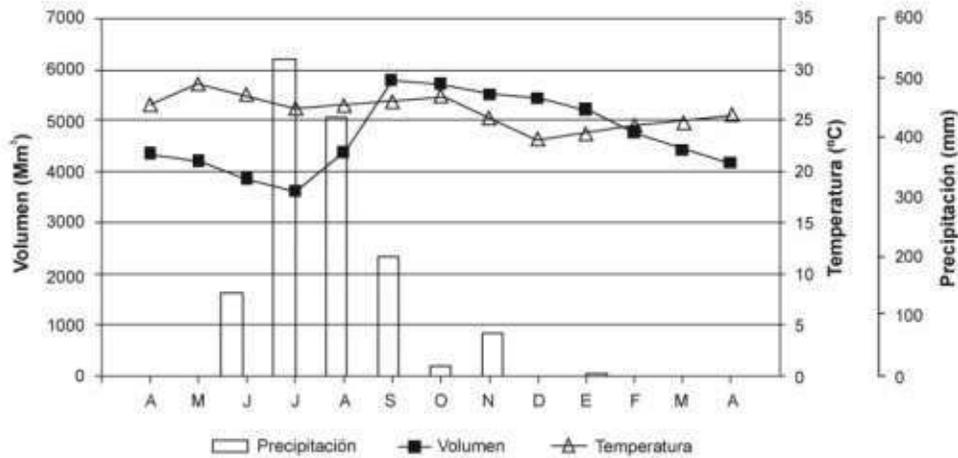


Figura VIII.1 Promedio mensual de la precipitación, temperatura ambiente y volumen de agua almacenado en la presa de Aguamilpa de abril de 2008 a abril de 2009.

La absorción de calor proveniente de la radiación solar en la superficie de agua de la presa y la ganancia de calor mediante el proceso de convección, debida a la diferencia con la temperatura ambiente presente, dieron como resultado cambios estructurales en la columna de agua en la zona léntica de la presa de Aguamilpa.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura VIII.2, el incremento en la temperatura en la superficie de agua desde 25.9 °C en junio del 2008 hasta más de 29.1 °C en agosto y octubre del 2008, generó una discontinuidad térmica durante las épocas de estiaje cálido y lluvias en los primeros 60 m de la columna de agua, mientras que por debajo de esta profundidad, la temperatura prácticamente permaneció constante durante todo el período de estudio hasta los 120 m.

Durante el estiaje frío, la temperatura del agua en la superficie disminuye, alcanzando un valor mínimo en el mes de febrero del año 2009. Debido a dicho enfriamiento, existe un rompimiento de la termoclina lo que condujo a una homogenización térmica en la columna de agua.

El oxígeno disuelto en las aguas superficiales es el resultado de interacción entre el oxígeno atmosférico, la actividad algal fotosintética, la respiración de los organismos acuáticos y la oxidación química y bioquímica de materia orgánica (Wetzel, 1993).

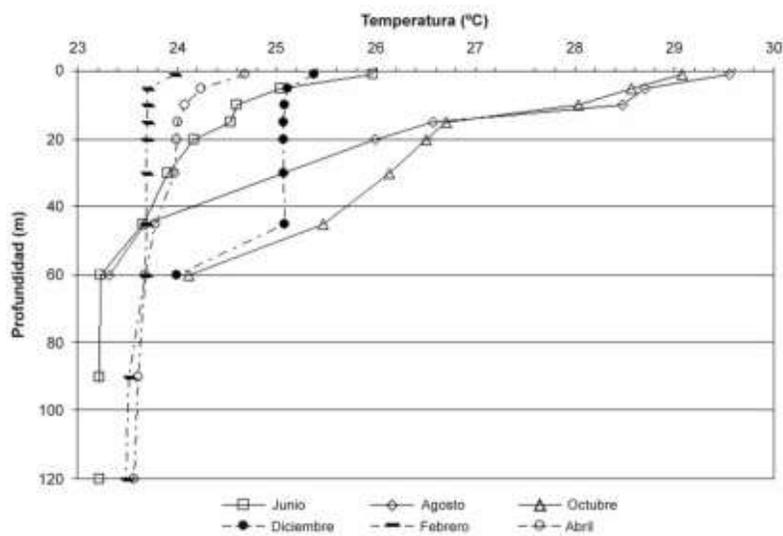


Figura VIII.2 Perfil térmico de la presa de Aguamilpa de junio de 2008 a abril de 2009.

La presencia del oxígeno disuelto en el agua es una condicionante fundamental para el desarrollo de la vida acuática, por lo que el registro de altas concentraciones de este parámetro es un indicador de una buena calidad del agua. La distribución vertical del oxígeno disuelto registrado en la presa de Aguamilpa entre los meses de junio del 2008 y abril del año 2009 se muestran en la Figura VIII.3.

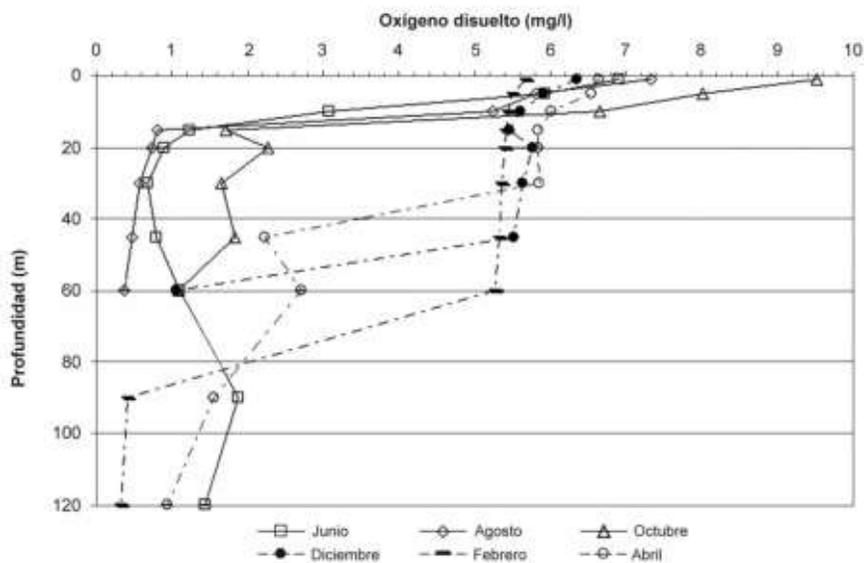


Figura VIII.3 Distribución vertical del oxígeno disuelto durante el período de junio de 2008 a abril de 2009.

La acción del viento mantuvo en constante mezclado la capa superficial (epilimnion) de la zona léntica de la presa durante el período de estudio, alcanzando una concentración máxima de oxígeno disuelto de 9.53 mg/l en octubre del año 2008 y una concentración mínima de 5.69 mg/l en febrero del año 2009.

Por otro lado, la columna de agua se caracterizó por la presencia de una oxiclina a 10 m de profundidad durante los meses de junio a octubre del año 2008, por consiguiente, aguas hipóxicas y anóxicas (concentraciones menores de 2 y 0.5 mg/l respectivamente), estuvieron presentes por debajo de la oxiclina durante el período en el cual se mantuvo estratificado la presa.

A pesar de la homogenización térmica registrada en la columna de agua durante la época de estiaje frío, una oxiclina fue identificada a los 60 m de profundidad. Las condiciones hipóxicas y anóxicas registradas en el hipolimnion de la presa de Aguamilpa, aunado a las condiciones reductoras encontradas en estos meses, sugieren que en el fondo de la presa se lleva a cabo un proceso de descomposición de la materia orgánica (Figura VIII.4).

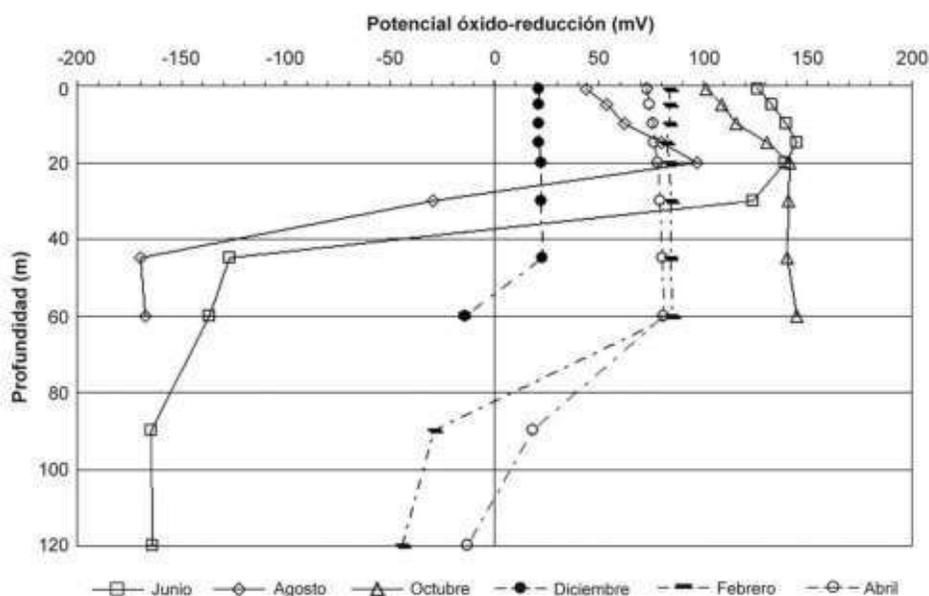


Figura VIII.4 Perfil vertical del potencial óxido-reducción en la presa de Aguamilpa durante el período de estudio.

Las condiciones anaerobias son importantes ya que la toma de agua para la generación de energía en la presa de Aguamilpa se encuentra ubicada a los 170 msnm (alrededor de 60 m de profundidad).

Los bajos niveles de oxígeno disuelto en las aguas que pasan a través de las turbinas u otra maquinaria pudieran ocasionar algún daño al equipo (Martin *et al.*, 2007) o pudieran tener repercusiones negativas en la flora y fauna presentes aguas abajo de la descarga de agua.

A una temperatura dada, el pH (o la actividad del ion de hidrógeno) indica la intensidad del carácter ácido o básico del agua. Los valores de pH son controlados por los compuestos químicos disueltos y los procesos bioquímicos que ocurren en un cuerpo de agua. Para el caso de aguas no contaminadas, el pH se debe principalmente al balance entre el dióxido de carbono, carbonato e iones de bicarbonato, así como por otros compuestos naturales como los ácidos húmicos y fúlvicos.

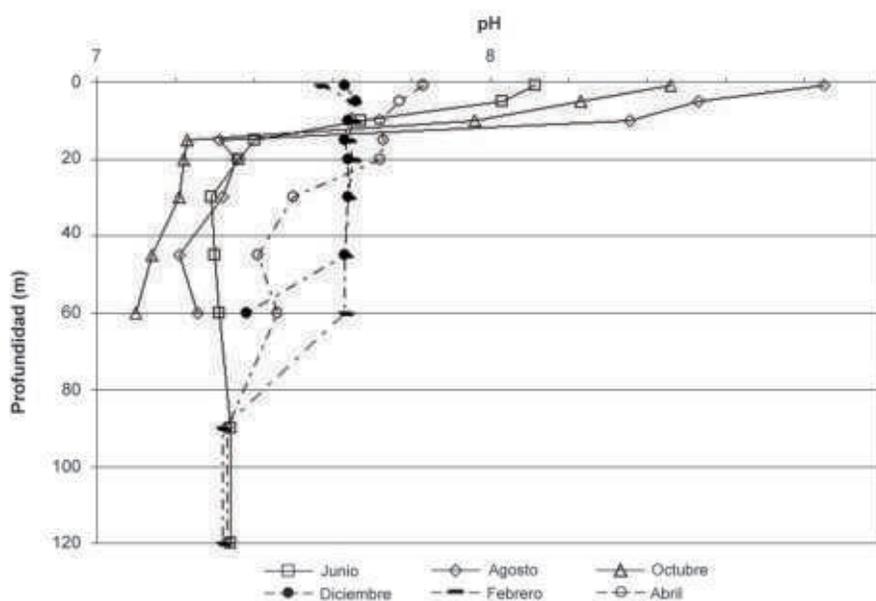


Figura VIII.5 Valores de pH observados en la presa de Aguamilpa durante el período de junio de 2008 a abril de 2009.

La Figura VIII.5 muestra el perfil vertical del pH en la zona léntica de la presa de Aguamilpa durante el período de estudio. Durante los meses de junio, agosto y octubre del año 2008, los valores del pH de la superficie fueron alcalinos y estuvieron en el rango de 8.12 a 8.85, y disminuyeron desde la superficie hasta los





15 m hasta un valor de 7.3 alcanzando un valor constante de 7.2 por debajo de los 20 m. De la misma forma que lo señalado para la temperatura y el oxígeno disuelto, el perfil vertical del pH durante el estiaje frío fue prácticamente homogéneo en la columna de agua, con un valor de 7.64 hasta los 45 m, disminuyendo a 7.32 por debajo de los 60 m. Durante el mes de abril del año 2009 se observó que el pH en la superficie de la presa aumentó ligeramente con respecto al valor registrado en el mes de febrero.

En cuerpos de agua naturales, la conductividad se encuentra relacionada directamente a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. Los elementos cuya concentración se relacionan positivamente con la conductividad son los iones de proporcionalidad constante, es decir, aquellos iones que varían poco con la actividad de los microorganismos (Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008).

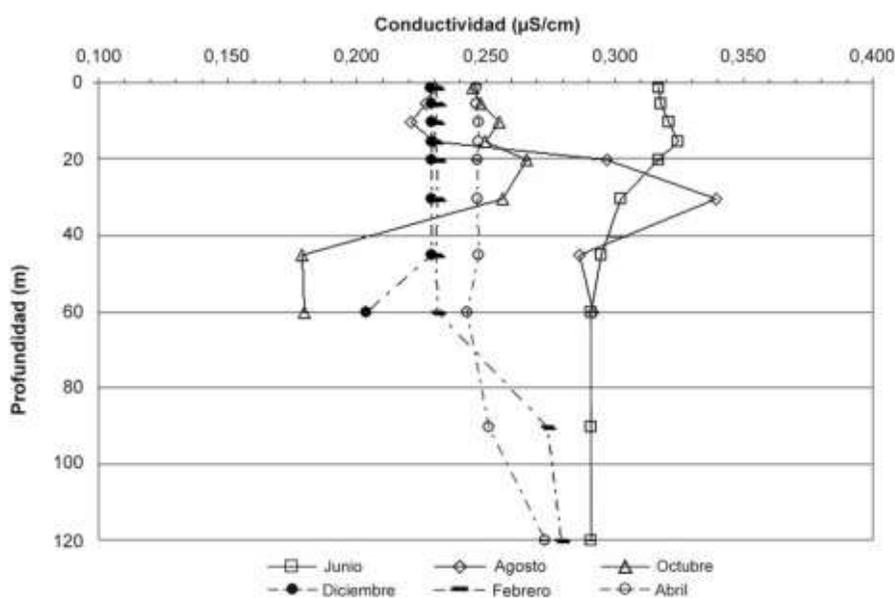


Figura VIII.6 Valores de conductividad observados en la columna de agua de la presa de Aguamilpa durante el período de estudio.

Estos iones pueden ser los metales alcalinotérreos monovalentes ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ), divalentes ( $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ ), iones de ácidos fuertes ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ ) y el ácido débil  $\text{HCO}_3^-$ . En este sentido, los valores máximos de conductividad observados en la presa de Aguamilpa durante la época de lluvias (Figura VIII.6) indican un incremento en la cantidad de minerales en la columna de agua, los cuales están

asociados al arrastre de sedimento proveniente del proceso de erosión en la cuenca durante esta época (González *et al.*, 2004; De Wever *et al.*, 2005).

Por otro lado, el incremento en la conductividad en capas profundas de la presa durante los meses de febrero y abril del año 2009, puede atribuirse a un proceso de remineralización en los estratos inferiores de la presa. En este proceso, el material autóctono (material orgánico producido en la superficie de la presa debido a la muerte de los microorganismos) sedimenta y se oxida por la acción de bacterias, utilizando oxígeno y liberando CO<sub>2</sub> (Zhang 2000).

Una vez que el oxígeno en el hipolimnion se agota, el material orgánico es degradado por la vía anaerobia, donde se favorece la acumulación de iones como el bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Este proceso de remineralización ha sido ampliamente reconocido en cuerpos de agua ubicados en latitudes tropicales (Lewis, 2000) y se encuentra relacionado principalmente con la profundidad del cuerpo de agua (Wetzel, 1993; Hakanson, 2005; Hayami *et al.*, 2008).

De manera natural, los ecosistemas acuáticos producen materia orgánica a partir de materia inorgánica a través del proceso de fotosíntesis, lo cual representa el punto de partida de la circulación de energía a través de la cadena trófica; sin embargo, la producción de la biomasa en un ecosistema acuático se encuentra limitada por la falta de algún nutriente, ya sea fósforo o nitrógeno.

La contaminación antropogénica de las aguas, por descargas industriales, desechos agroquímicos o depositación atmosférica, puede aportar cantidades importantes de esos nutrientes, incrementando con ello la producción primaria del ecosistema.

Dado que el proceso de fotosíntesis se lleva a cabo bajo la actividad de la clorofila en las algas, la determinación de este compuesto proporciona una idea de la producción primaria de un ecosistema. Cabe aclarar que esta estimación es sólo aproximada, puesto que el contenido de este compuesto en el fitoplancton varía ampliamente dependiendo de las especies, de su estado fisiológico, del grado de iluminación, del tipo de luz, entre otros factores.

En el caso particular de la presa de Aguamilpa, los niveles más altos de clorofila total fueron observados en la superficie del agua durante la época de estiaje cálido, alcanzando un valor máximo de 7.9 µg/l (Figura VIII.7). Este valor coincide con algunos valores registrados por diversos autores en otros cuerpos de agua

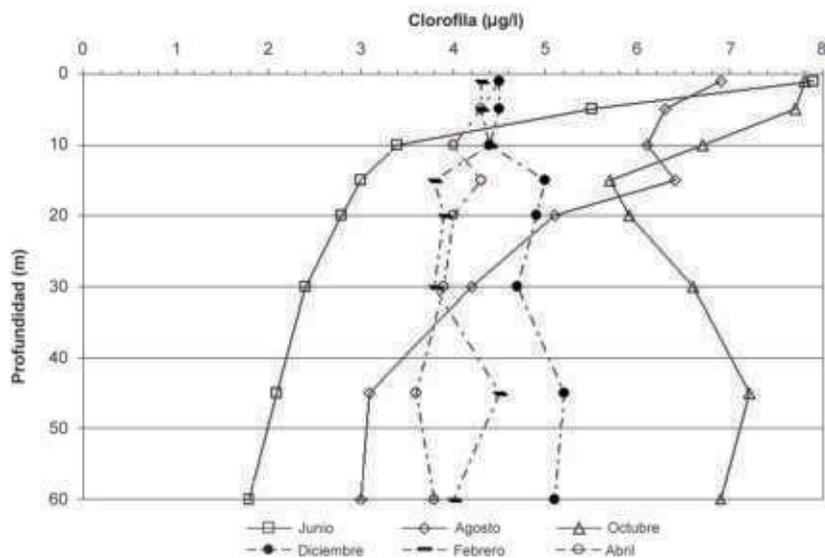


Figura VIII.7 Distribución vertical de la clorofila total durante el período de junio de 2008 a abril de 2009.

tropicales (González *et al.*, 2004; Oliva-Martinez *et al.*, 2008), quienes sugieren que estos niveles pueden estar relacionados a la temperatura ambiente, característica de estos sistemas.

Asimismo, se observó una disminución en la concentración de clorofila total por debajo de los 5 m en junio del 2008, situación que puede ser asociada al nivel eufótico de la presa. Este nivel corresponde a la profundidad en la que penetra la luz y que, por consiguiente, se lleva a cabo la fotosíntesis (Bandu-Amarasinghe y Vijverberg, 2002).



Elevada abundancia de cianobacterias en el río Huaynamota durante el estiaje cálido

Por tal motivo, cuando la transparencia del agua en la presa presentó su máxima profundidad (83 cm medida con el disco Secchi), la concentración de clorofila total registró una concentración máxima ( $7.9 \mu\text{g/l}$ ); mientras que cuando el disco Secchi registró su profundidad mínima, la concentración de clorofila total en la superficie se redujo a casi la mitad ( $4.3 \mu\text{g/l}$ ).

Una especie de nata, con aspecto de pintura verde-azul, estaba presente en la superficie de agua de la presa en el momento que las floraciones algales fueron observadas en la superficie del embalse.

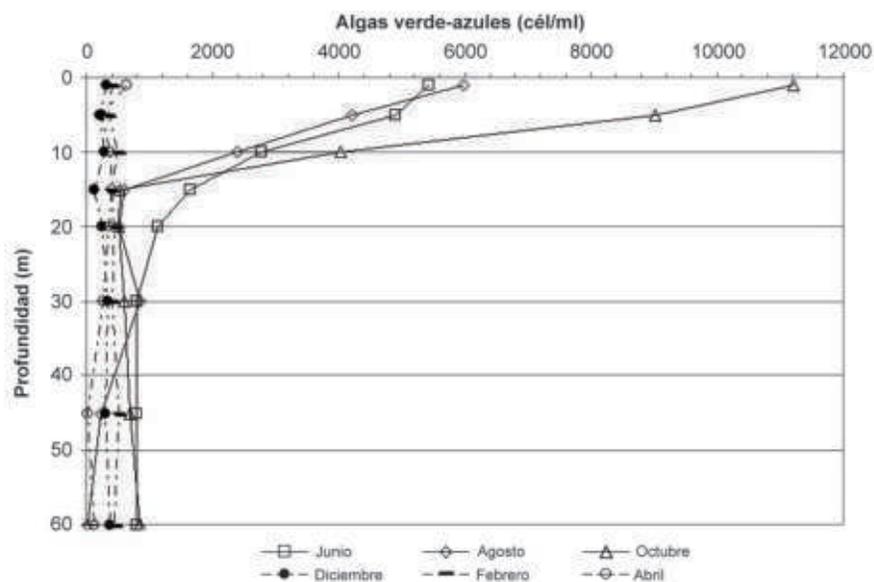


Figura VIII.8. Perfil de algas verde-azules en la columna de agua de la presa de Aguamilpa de junio de 2008 a abril de 2009.

La abundancia más alta de algas verde-azules (11,200 cel/ml) se registró durante el mes de octubre del año 2008 (Figura VIII.8). Esta situación puede estar principalmente relacionada con el incremento en la temperatura de la superficie de agua y el enriquecimiento de nutrientes en la presa debido al escurrimiento en la cuenca durante la época de lluvias. Esta situación se asemeja con otros estudios realizados en cuerpos de agua localizados en regiones tropicales (Akin-Oriola, 2003; Von Sperling, 2008).

#### 4. Conclusiones

La estratificación térmica que separa la parte superior caliente (epilimnion) de la inferior fría (hipolimnion) en la zona léntica de la presa de Aguamilpa, impide la interacción entre ambas capas, lo que aísla los diversos procesos que ocurren en cada una de ellas. Dicha situación puede observarse en el comportamiento de algunos

C.H. AGUAN



MILPA SOLIDARIDAD



parámetros fisicoquímicos y biológicos de la presa, siendo el oxígeno disuelto, el pH y las algas verde-azules los principales parámetros que se encuentran asociados a la variación registrada en la temperatura de la columna de agua.

De acuerdo con estas características térmicas, la presa de Aguamilpa puede clasificarse como monomítica (las aguas se mezclan una vez al año), observándose que el mezclado se presenta durante la época de estiaje frío.

Los resultados muestran que en las capas profundas de la presa, donde no penetra la luz, se produce un consumo de oxígeno por la respiración de los microorganismos y por la mineralización de la materia orgánica producida por la fotosíntesis y por la materia procedente de los aportes exógenos a la cuenca. Debido a la presencia de la termoclina no fue posible que el oxígeno se difundiera desde las capas superficiales a las profundas, por lo que se incrementó el déficit de oxígeno y se propició la formación de condiciones reductoras en el hipolimnion.

La presencia de dichas condiciones reductoras hipolimnéticas en la presa de Aguamilpa puede generar importantes problemas en el uso del recurso hídrico, ya que bajo estas condiciones se produce la liberación y solubilización de iones como el hierro, manganeso y arsénico, los cuales representan un riesgo cuando se encuentran en elevadas concentraciones en aguas destinadas al consumo humano y para la agricultura. Asimismo, estas condiciones favorecen la formación de compuestos reductores como el ácido sulfhídrico, amonio, nitrito y metano, éste último considerado como gas efecto invernadero.

La importancia de la presencia de las algas verde-azules en la superficie de la presa radica en el hecho que algunas especies de éstas son capaces de producir ciertos compuestos químicos que pueden ser tóxicos para especies de flora, fauna y seres humanos, cuando están presentes en concentraciones elevadas en los cuerpos de agua (Carmichael *et al.*, 2001; Falconer y Humpage, 2006). Existe poca información disponible en cuanto a las densidades máximas permisibles para las algas verdes-azules en cuerpos de agua, dependiendo del uso que se le dé al recurso.

El Consejo Australiano de Investigación en Salud y Medicina sugiere que la abundancia de algas verde-azules por debajo de 20,000 cel/ml se puede considerar como recomendable; sin embargo, también sugiere que, en caso de presentarse floraciones de algas verde-azules en un cuerpo de agua, se debe utilizar una fuente

alterna de agua cuando el recurso esté destinado para el riego agrícola o para agua potable.

Bajo este criterio, a pesar de que la abundancia de algas verde-azules estuvo por debajo de los límites sugeridos, las floraciones registradas en la superficie de la presa de Aguamilpa sugieren que estas aguas no deben ser utilizadas para los usos antes mencionados, durante la época de estiaje cálido y lluvias.

En la literatura mundial se localizaron pocas referencias que realizaran una descripción cuantitativa y cualitativa del comportamiento de las variables fisicoquímicas, biológicas y de calidad del agua en presas tropicales.

Particularmente la información localizada a nivel nacional se limita a algunos aspectos biológicos y ecológicos de las presas, por lo que es necesario dar mayor importancia a los estudios limnológicos y de calidad del agua en las presas y embalses de México dada la coyuntura de escasez de agua que enfrentarán los recursos hídricos nacionales debido a: sobreexplotación de los recursos de agua subterránea, incremento de la demanda de agua para las zonas urbanas y agrícolas y a los efectos del cambio climático global. ☀



## Referencias

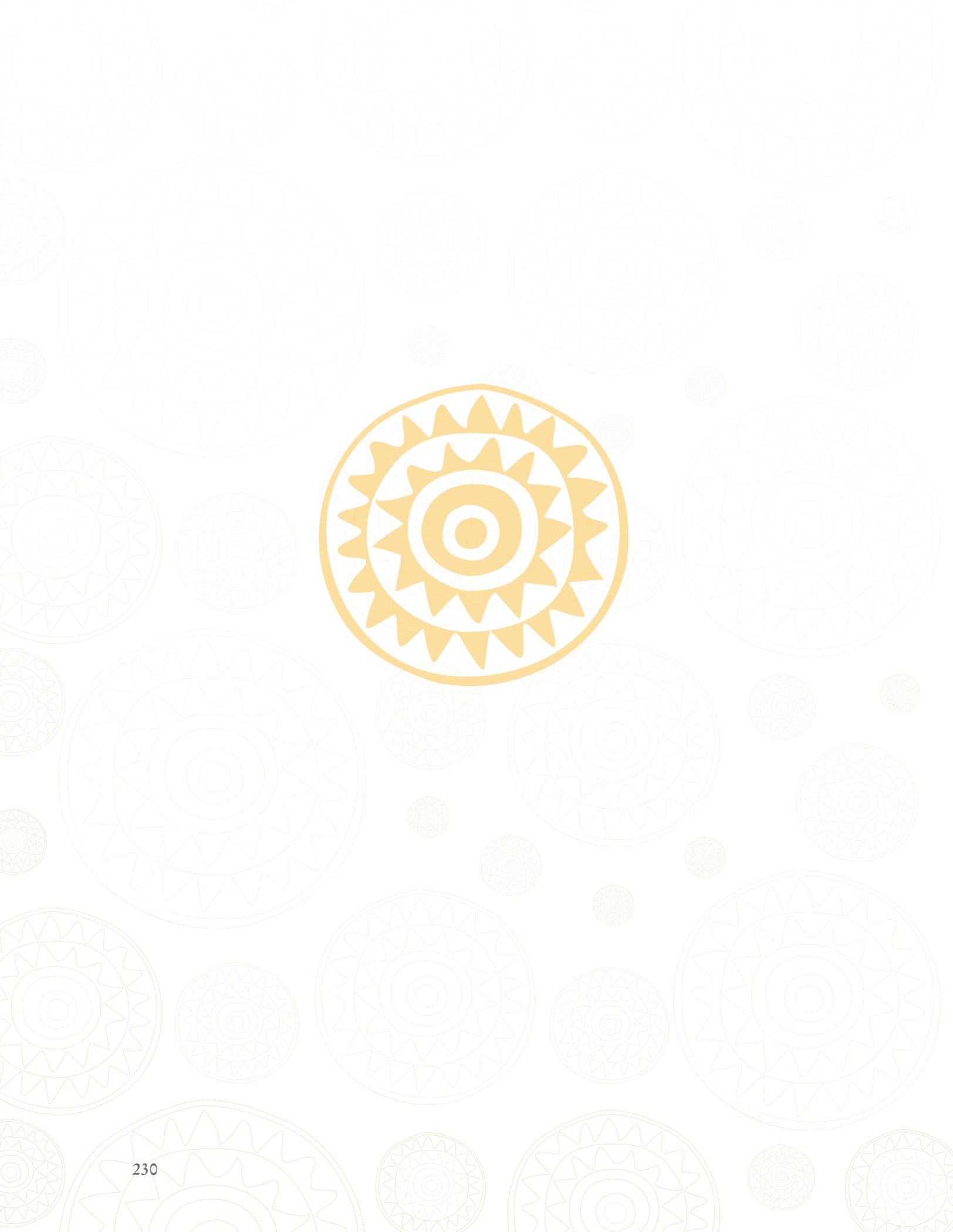
- Ambrosetti, W, Barbanti, L (2005). Evolution towards meromixis of Lake Iseo (Northern Italy) as revealed by its stability trend. *J. Limnol.*, 64 (1):1-11.
- APHA (1998). Standard Methods for Examination of Water and Waste Water. 20th edition. American Water Works Association. Water Environment Federation. Washington, D.C. 1325 pp.
- Arangur -Zu niga, FJ (2005). Contaminación por residuos de Plaguicidas Organoclorados en Sedimentos y Peces de la presa Hidroeléctrica Aguamilpa. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias por el Instituto Tecnológico de Tepic. Tepic, México.
- Arredondo-Figueroa, JL, Diaz-Zavaleta, G, Ponce-Palafox, JT (2007). Limnología de las presas mexicanas. Aspectos teóricos y prácticos. AGT Editor S.A. 899 p.
- Akin-Oriola, GA (2003). Zooplankton Associations and Environmental Factors in Ogunpa and Ona rivers, Nigeria. *Rev. Biol. trop.* 51(2): 391-398.
- Bandu-Amarasinghe, P, Vijverberg, J (2002). Primary production in a tropical reservoir in Sri Lanka. *Hydrobiologia* 487: 85-93,
- Burns, J, Williams, C, Chapman, A (2002). Cyanobacteria and their toxins in Florida surface waters. In: Johnson D. & Harbison R.D. Eds. Proceedings of health effects of exposure to cyanobacteria toxins. State of science, Saratoga, Florida, August 13-14, 2002:16-21.
- Carmichael, WW, Azevedo, SM, An, JS, Molica, RJ, Jochimsen, EM, Lau, S, Rinehart, KL, Shaw, GR, Eaglesham, GK (2001). Human fatalities from cyanobacteria: Chemical and biological evidence for cyanotoxins. *Environ. Health Perspect.* 109: 663-668.
- Casallas, JE, Gunkel, G (2001). Algunos aspectos limnológicos de un lago alto andino: el lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica* 20(2): 215-232.
- Chapman, DV (1996). Water Quality Assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. E&FN Spon. World Health Organization. Cambridge, United Kingdom. 609 pp.
- CEA Jalisco (2009). Resultados del Monitoreo del Arroyo El Ahogado y Río Santiago Realizados por la CEA. Dirección de Cuencas y Sustentabilidad. Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco. Available from URL: [http://www.ceajalisco.gob.mx/notas/documentos/nota\\_resultados\\_monitoreo2.pdf](http://www.ceajalisco.gob.mx/notas/documentos/nota_resultados_monitoreo2.pdf) 4 Abril 2009.

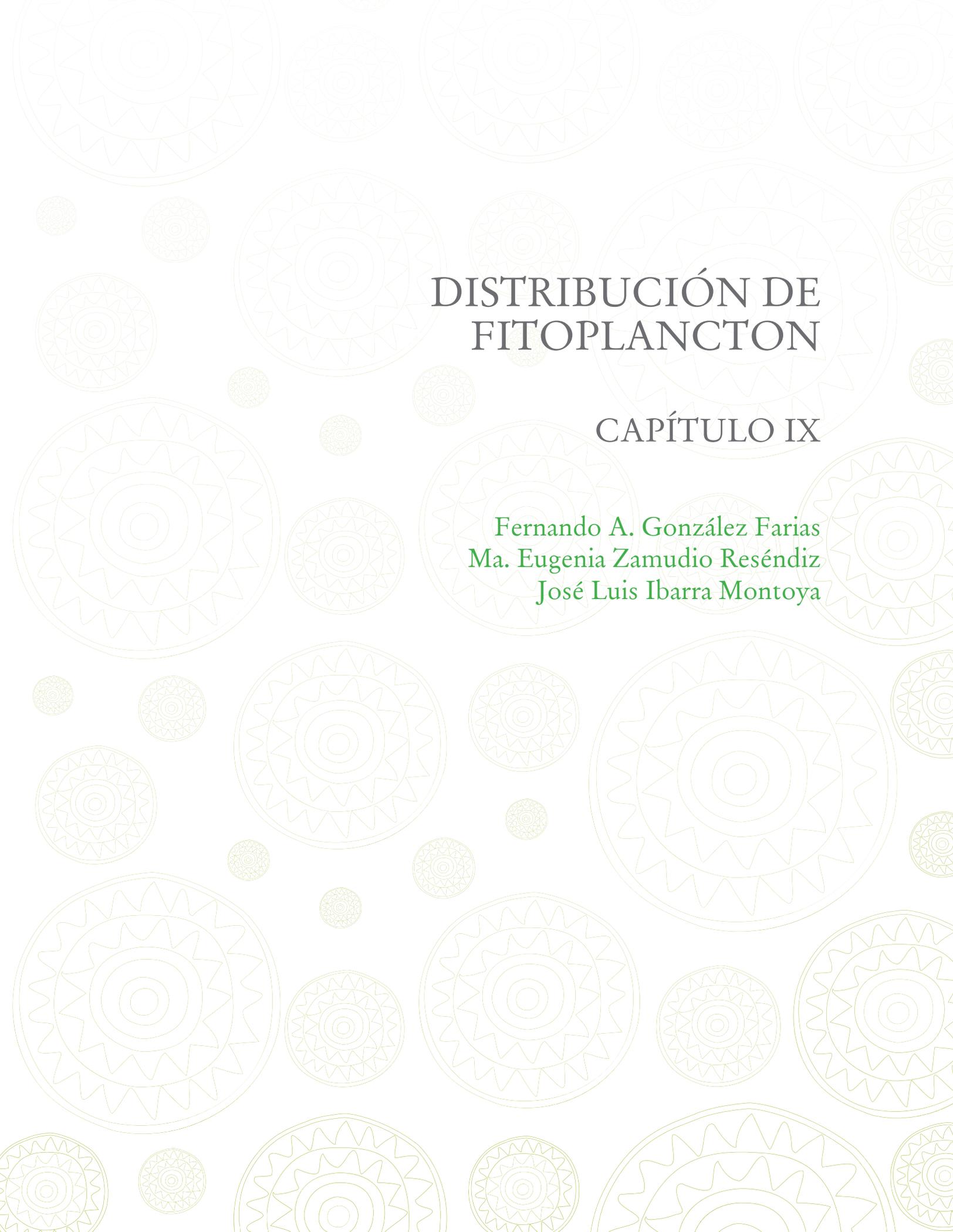
- CFE (1991). Proyecto hidroeléctrico Aguamilpa. Información General del Proyecto Aguamilpa. Mexico. 47 pp.
- CFE (2008). Registro de observaciones hidrométricas y climatológicas en el embalse de Aguamilpa. Available from URL: <http://h06814.iiie.org.mx/presascfe/semanapresacaracol.aspx?estacion=agu> [4 Marzo, 2009].
- CONAGUA (2008). Estadísticas del agua en México Edición 2008. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 228 pp.
- Cotler, H, Mazari-Hiriart, M, de Anda-Sánchez, J (Editors) (2006). Atlas de la cuenca Lerma-Chapala: construyendo una visión conjunta. Instituto Nacional de Ecología-UNAM, México, D. F. México. 198 pp. ISBN 968-817-783-0.
- De la Lanza, G, Hernández, PS, Carbajal, PJJ (compiladores) (2000). Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (Bioindicadores). Plaza y Valdéz Eds. México, D.F. 633 pp.
- De la Lanza-Espino, G, García Calderón, JL (2002). Historical summary of the geology, climate, hydrology, culture and natural resource utilization in the Basin of Mexico. In: Fenn E., L.I. de Bauer nad T. Hernández-Tejeda (Eds). Urban Air Pollution and Forest. Springer New Cork: 3-23.
- de Victorica-Almeida, J (1995). Análisis de la dinámica de la calidad del agua en lagos y embalses. Tesis doctoral, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- de Victorica-Almeida, J (1996). Modelo para simular la evolución de oxígeno disuelto en embalses. Ingeniería del Agua, 3 (2): 63-74.
- De Wever, A, Muylaert, K, Van der Gucht, K, Pirlot, S, Cocquyt, C, Descy, JP, Plisnier, PD, Vyverman, W (2005). Bacterial Community Composition in Lake Tanganyika: Vertical and Horizontal Heterogeneity. Appl. Environ. Microbiol., 71 (9): 5029-5037.
- Denimal, S, Bertrand, C, Mudry, J, Paquette, Y, Hochart, M & Steinmann, M (2005). Evolution of the aqueous geochemistry of mine pit lakes – Blanzey-Montceau-les Mines coal basin (Massif Central, France): origin of sulfate contents; effects of stratification on water quality. Applied Geochemistry, 20: 825-839.
- Dinar, A., Seidl, P., Olem, H., Jorden, V., Dada, A., Johnson, R. 1995. Restoring and protecting the worlds lakes and reservoirs. World Bank Technical Paper No. 289. The World Bank, Washington DC, p. 85.
- DOF (2006). Diario Oficial de la Federación. Lunes 28 de Agosto de 2006. Segunda Sección. Poder Ejecutivo. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos

- Naturales. 128 p.
- Dokulil, MT, Teubner, K (2000). Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 438:1-12.
- Falconer, IR, Humpage, AR (2006). Cyanobacterial (Blue-Green Algal) Toxins in Water Supplies: Cylindrospermopsins. *Environ. Toxicol*, 21: 299-304.
- Fastner, J, Rücker, J, Stüken, A, Preußel, K, Nixdorf, B, Chorus, I, Köhler, A, Wiedner, C (2007). Occurrence of the Cyanobacterial Toxin Cylindrospermopsin in Northeast Germany. *Environ. Toxicol*, 22: 26-32.
- García-Cabrera, J (2007). Plancton como indicador de calidad del agua en la presa de Aguamilpa. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22 (1):103-116.
- Ghosh, AK, Kumar, P, Bose, N (2003) Study of trophic status of a pond through diurnal profiling. *Oceans 2003. Proceedings*, 3:1199 -1204.
- González, EJ, Carrillo, V, Peñaherrera, C (2004). Características Físicas y Químicas del Embalse Agua Fría (Parque Nacional Macarao, Estado Miranda, Venezuela). *Acta Científica Venezolana*, 55: 225-236.
- Gunkel, G. 2003. Limnología de un Lago Tropical de Alta Montaña, en Ecuador: Características de los sedimentos y tasa de sedimentación. *Rev. Biol. Trop.* 51(2):381-390.
- Hayami, Y, Ohmori, K, Yoshino, K, Garno YS (2008). Observation of anoxic water mass in a tropical reservoir: the Cirata Reservoir in Java, Indonesia. *Limnology*, 9: 81-87.
- Hakanson, L (2005). The importance of Lake Morphometry for the Structure and Function of Lakes. *Internat. Rev. Hydrobiol.*, 90 (4): 433-461.
- Hong Qi, MA, KeMing, CAO (2007). Key technical problems of extra-high concrete faced rock-fill dam., *Sci. China Ser. E-Tech. Sci.* 50 (1): 20-33.
- Hutchinson, GE (1937). A contribution to the limnology of arid regions. *Trans. Conn. Acad. Arts Sci.*, 33: 47-132
- Kemdirim, EC (2005). Studies on the hydrochemistry of Kangimi reservoir, Kaduna State, Nigeria. *Afr. J. Ecol.* 43: 7-13.
- Klimaszyk, P, Joniak, T, Ławniczak, J (2006). Annual changeability of thermal and oxygen conditions in a meromictic lake (Czarne Lake – Drawieński National Park). *Limnological Review*, 6: 141-146.
- Kuroiwa, K, Ogawa, Y, Seki, H, Ichimura, S (1979). Dynamics of dissolved oxygen in a hypereutrophic lake: Lake Kasumigaura, Japan. *Water, Air and Soil Pollution*, 12: 255-264.
- Lehours, A C, Bardot, C, Thenot, A, Debroas, D & Fonty, G 2005. Anaerobic

- Microbial Communities in Lake Pavin, a Unique Meromictic Lake in France. *Appl. Environ. Microbiol.*, 71 (11): 7389-7400.
- Lewis, WM (2000). Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 5: 35-48.
- Löffler, H (2004). The origin of lake basins. In: O'Sullivan P E, Reynolds CS Eds. *The lakes handbook Vol. 1*, Oxford Science Ltd. Blackwell Publ. Co. 8-60 p.
- Mankiewicz, J, Komárková, J, Izydorczyk, K, Jurczak, T, Tarczynska, M, Zalewski, M (2005). Hepatotoxic cyanobacterial blooms in the lakes of northern Poland. *Environ. Toxicol.*, 20 (5): 499-506.
- Manti, G, Mattei, D, Messineo, V, Melchiorre, S, Bogialli, S, Sechi, N, Casiddu, P, Luglio, L, Di Brizio, M, Bruno, M (2005) First report of *Cylindrospermopsis raciborskii* in Italy. *Harmful Algal News*, 28: 8-9.
- Marques-Lopes, MR, Bicudo, CEM, Ferragut, MC (2006). Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. *Hidrobiología*, 542: 235-247.
- Masojídek, J, Grobbelaar, JU, Pechar, L, Koblížek, M (2001). Photosystem II Electron Transport Rates and Oxygen Production in Natural Waterblooms of Freshwater Cyanobacteria During a Diel Cycle. *J. Plankton Res.*, 23: 57-66.
- Melack, JM (1996). Recent developments in tropical limnology. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 26: 211-216.
- Meybeck, M, Helmer, R (1990) The quality of Rivers: from pristine stage to global pollution. *Global Planetary Change*, 283-309 p.
- Meybeck, M (1995). Le lacs et leur bassin versant. In: R. Pourriot, M. Meybeck Eds. *Limnologie Générale*. Masson, Paris, 6-60.
- Mustapha, MK (2008). Assessment of the Water Quality of Oyun Reservoir, Offa, Nigeria, Using Selected Physico-Chemical Parameters. *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.*, 8:309-319.
- Navarro-Rodríguez, MC, Flores-Vargas, R, González-Guevara, LF, González-Ruelas, ME (2004). Distribution and abundance of *Dormitator latifrons* (Richardson) larvae (Pisces: Eliotridae) in the natural protected area "Estero El Salado" in Jalisco, Mexico. *R. de Biol. Marina y Oceanografía*, 39 (1):31-36.
- Oliva-Martínez, MG, Rodríguez-Rocha, A, Lugo-Vázquez, A, Sánchez-Rodríguez, MR (2008). Composición y dinámica del fitoplancton en un lago urbano hipertrófico. *Hidrobiológica*. 18 (1):1-13.
- Quiroz-Castelán, H, Mondragón-Eslava, O, Molina-Astudillo, I, García-Rodríguez, J, Díaz-Vargas, M (2008). Dinámica espacio-temporal de oxígeno-

- temperatura en los lagos Zempoala y Tonatiahua. *Acta Universitaria*, 18 (1):57-65.
- Ramírez, AM, Plata-Díaz, Y (2008). Diatomeas perifíticas en diferentes tramos de dos sistemas lóticos de alta montaña (páramo de Santurbán, norte de Santander, Colombia) y su relación con las variables ambientales. *Acta biol. Colom.* 13(1):199-216.
- Stirling, DJ & Quilliam, MA (2001). First report on the cyanobacterial toxin cylindrospermopsin in New Zealand. *Toxicon*, 39:1219–1222.
- Roldán-Pérez, G, Ramírez-Restrepo, JJ (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Editorial Universidad de Antioquia. Colombia. 421 p.
- Talling, JF, Lemoalle, J (1998). *Ecological dynamics of tropical inland waters*. Cambridge University Press, Cambridge. 432 pp.
- Tundisi, JG (1994). Tropical South America: Present and perspectives. In: Margalef, R. Ed. *Limnology Now: A Paradigm of Planetary Problems*. Elsevier, Amsterdam. 353-424 p.
- Villalobos, GU (2006). Ciclo anual de estratificación y circulación en el Embalse Arenal, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 54 (1): 257-263.
- Von Sperling EV, Ferreira, ACS, Gomes, LNL (2008). Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth. *Desalination* 226: 169–174.
- Watanabe, M, Horiuchi, S, Ambre, Y (2000). Sudden changes of thermal stratification in meromictic lake, Lake Kaiike, Japan. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 27: 261-264.
- WCD (2000). *Dams and Development*. Technical report. World Commission on Dams. London. United Kingdom. 456 pp.
- Wetzel, RG (1993). *Limnología*. Fundacao Calouste Gulbenkian, Lisboa, 919pp.
- Zambrano-Cárdenas, RM (2005). *Niveles de Contaminación por Metales Pesados en Sedimentos y Peces de la presa Aguamilpa, Nayarit*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias por el Instituto Tecnológico de Tepic. Tepic, Nayarit, México.
- Zhang, YJ, Jha, M, Gu, R, Wensheng, L, Alin, L, (2010). A DEM-based parallel computing hydrodynamic and transport model. 28 (5): 647–658.





# DISTRIBUCIÓN DE FITOPLANCTON

## CAPÍTULO IX

Fernando A. González Farías  
Ma. Eugenia Zamudio Reséndiz  
José Luis Ibarra Montoya



BIENVENIDOS  
A AGUAMILPA  
TERRITORIO  
MERCURY

## 1. Introducción

El fitoplancton está constituido por organismos microscópicos, fotosintéticos, que viven suspendidos en ambientes acuáticos y por definición son una comunidad que está a merced de las corrientes, tanto convectivas como las inducidas por el viento y las mareas, y su presencia y desarrollo refleja los cambios fisicoquímicos de la columna de agua en tiempo y espacio (De la Lanza *et al.*, 2000).



En la mayoría de los ambientes acuáticos los organismos fitoplanctónicos son los principales productores primarios y constituyen la base de la cadena trófica. Las condiciones ambientales que controlan la estabilidad de la columna de agua influyen en la estructura y dinámica del fitoplancton y dado su tamaño microscópico, éste puede multiplicarse a tasas exponenciales y cubrir extensas áreas (Pérez *et al.*, 1999).

El tener un diagnóstico de la comunidad fitoplanctónica (composición, variación estacional y relación con la calidad del agua) permite pronosticar la proliferación o desaparición de algunos grupos que la conforman y generar medidas preventivas para mitigar el impacto ambiental que producen las actividades humanas (Ferreiros, 1980), en particular la construcción de presas en donde se pasa, en poco tiempo, de un ambiente lótico a uno léntico.

Por estudios anteriores se sabe que las poblaciones del fitoplancton en embalses, lagos y lagunas, presentan variaciones estacionales y son reguladas tanto por factores químicos, como físicos y biológicos. Entre otros factores se tienen la concentración de nutrientes, luz, profundidad, volumen, área de drenaje, superficie, competencia y depredación, que pueden influenciar a la comunidad fitoplanctónica (Hutchinson, 1967; Jasprica *et al.*, 2005; Gutiérrez Mendieta *et al.*, 2006).

La temperatura del cuerpo de agua y su variación a través de las estaciones climáticas es uno de los factores más importantes en la sucesión de especies fitoplanctónicas (Karentz y Smayda, 1984; Zalocar de Domitrovic *et al.*, 1998).

En la actualidad en muchos ecosistemas acuáticos las comunidades fitoplanctónicas se encuentran perturbadas debido a la contaminación. Los aportes de residuos antropogénicos han generado procesos de eutrofización, que provocan la desaparición de algunas especies de clorofitas y diatomeas, dando origen a un crecimiento desmesurado de cianofitas, con el agravante de que estas últimas son productoras potenciales de toxinas, así como de efectos organolépticos y estéticos indeseables (Prosperi, 2002).

Recientemente se ha reportado en diversos sistemas acuáticos de México la presencia de microcistinas, que son toxinas producidas por cianobacterias (Vasconcelos *et al.*, 2010). En este trabajo se presenta un listado de las especies de fitoplancton colectadas bimensualmente a lo largo del embalse de la Presa de Aguamilpa, Nayarit, en el período de agosto 2008 a junio 2009. Se presenta también la variación espacial y temporal de la abundancia fitoplanctónica, así como los índices de riqueza de especies ( $d$ ), de equitatividad ( $J'$ ) y de diversidad de Shannon-Wiever ( $H'$ ) y de Simpson ( $1-\lambda$ ).

## 2. Metodología

En la Presa de Aguamilpa, cuyas características se describen ampliamente en el Capítulo IV de esta obra, se colectaron muestras de fitoplancton en 11 estaciones cuya localización se presenta en la Figura IX.1.

Se efectuaron seis colectas de fitoplancton en agosto, octubre y diciembre del 2008, y en febrero, abril y junio del 2009. Se tomaron muestras de agua superficial en botellas plásticas (1 L) en las 11 estaciones de muestreo (Figura IX.1).

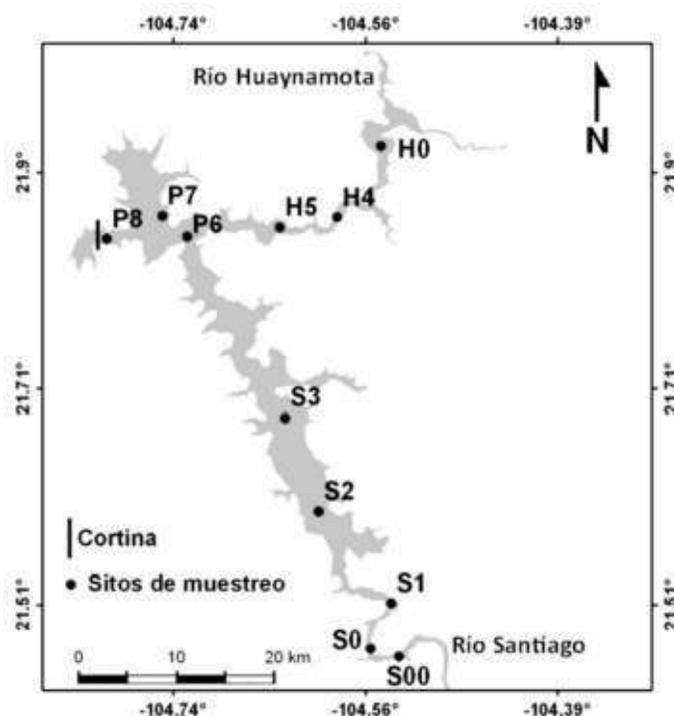


Figura IX.1. Ubicación de las estaciones de muestreo.

Las muestras, inmediatamente después de su colecta, fueron fijadas con acetato de lugol a una concentración del 1% (Ferrario *et al.*, 1995) y transportadas en hieleras al laboratorio. Posteriormente, las muestras fueron analizadas con ayuda de un microscopio invertido de acuerdo al método de Utermöhl (Hasle, 1978) y las abundancias fueron calculadas en células por mililitro.

El análisis de la diversidad de especies por muestra se obtuvo con los índices siguientes:

ÍNDICE:	FÓRMULA:
Riqueza de especies (Margalef)	$d = (S-1)/\text{Log}(N)$
Equitatividad (Pielou)	$J' = H'/\text{Log}(S)$
Shannon - Wiever	$H' = - \sum(P_i * \text{Log}(P_i))$
Simpson	$1-\lambda = 1 - \sum(N_i * (N_i - 1)) / (N * (N - 1))$

### 3. Resultados

Durante el período de estudio se identificaron un total de 98 taxa, donde el grupo de las clorofitas presentó 37 especies, seguido por las cianofitas con 26, las diatomeas con 20, las fitoflageladas con 10, los dinoflagelados con cuatro y una especie de rodofita (Figura IX.2; Tabla IX.1).

En la Figura IX.3 se presentan micrografías de algunas de las especies colectadas durante el período de muestreo. Si bien hubo una gran variación en la diversidad fitoplanctónica, a través del tiempo y el espacio, cuatro especies siempre se presentaron en todos los muestreos, que fueron las cianofitas *Merismopedia minutissima* y *M. punctata*, una diatomea *Aulacoseira granulata var. granulata* y una fitoflagelada (Figura IX.4).

<b>TABLA IX.1 ESPECIES DE FITOPLANCTON COLECTADAS EN 1=AGOSTO 2008, 2=OCTUBRE 2008, 3=DICIEMBRE 2008, 4=FEBRERO 2009, 5=ABRIL 2009 Y 6=JUNIO 2009.</b>						
<b>FECHA:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>TOTAL DE ESPECIES REGISTRADAS POR FECHA:</b>	<b>28</b>	<b>41</b>	<b>25</b>	<b>41</b>	<b>52</b>	<b>42</b>
<b>DIATOMEAS (20):</b>						
<i>Achnanthes</i> sp.					X	
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>granulata</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	X	X		X	X	X
<i>Coscinodiscus</i> sp.					X	
<i>Cyclotella</i> sp.		X	X			
<i>Cyclotella</i> cf. <i>comta</i>	X			X	X	X
<i>Cyclotella</i> cf. <i>operculata</i>				X	X	X
<i>Extubucelus</i> sp.		X		X	X	X
<i>Fragillaria</i> sp.	X					
<i>Gomphonema</i> sp.					X	
<i>Licmophora</i> sp.		X				
<i>Navicula</i> sp. 1				X	X	X
<i>Navicula</i> sp.		X		X	X	X
<i>Nitzschia</i> sp.		X		X	X	X
<i>Nitzschia</i> af. <i>palea</i>		X				
<i>Rhopalodia gibberula</i>					X	
<i>Synedra</i> cf. <i>fasciculata</i> var. <i>truncata</i>	X				X	
<i>Synedra ulna</i>					X	
<i>Synedra</i> sp.		X	X		X	
Diatomea central	X		X			
<b>DINOFLAGELADOS (4)</b>						
<i>Gonyaulax</i> sp.			X			
<i>Gymnodinium</i> sp.		X	X	X		X
<i>Gymnodinium</i> af. <i>verruculosum</i>		X				
<i>Peridinium</i> sp.				X	X	X
<b>FITOFLAGELADAS (10)</b>						
Fitoflagelada	X	X	X	X	X	X
<i>Dinobryon</i> sp.					X	
Cryptophyta				X	X	X
Criptophyceae		X	X			

Crisophyceae		X	X	X	X	X
<i>Chrysocromulina</i> sp.					X	
<i>Chroomonas</i> sp.		X	X			
Prasinophyta		X	X	X		X
Primnesiophyceae		X	X	X	X	X
<i>Pyramimonas</i> sp.				X	X	X
Raphidophyceae		X	X			
<b>CIANOFITAS (26)</b>						
<i>Anabaena</i> sp.	X			X		X
<i>Anabaena flos-aquae</i>					X	
<i>Anabaena spiroides</i>	X					
<i>Anabaenopsis circularis</i>				X		X
<i>Aphanizomenon</i> sp.	X					
<i>Aphanocapsa</i> sp.				X	X	X
<i>Chroococcus</i> cf. <i>minutus</i>				X	X	X
Cianophyta		X	X	X	X	X
<i>Cylindrospermopsis</i> sp.		X	X			
<i>Cylindrospermum comatum</i>		X				
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>				X		X
<i>Gleocapsa</i> sp.	X					
<i>Gomphosphaeria</i> sp.	X	X		X	X	X
<i>Merismopedia minutissima</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Merismopedia punctata</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Microcystis</i> sp.		X	X	X	X	X
<i>Microcystis aeruginosa</i>				X		X
<i>Nostoc</i> sp.	X			X	X	X
<i>Nostoc pruniforme</i>		X				
<i>Oscillatoria</i> sp.		X				
<i>Oscillatoria</i> af. <i>proboscidea</i>		X				
<i>Phormidium tenue</i>	X					
<i>Pseudanabaena</i> sp.				X		X
<i>Radiocystis</i> sp.				X		X
<i>Raphidiopsis mediterranea</i>				X		X
<i>Woronichina</i> sp.			X	X		X
<b>CLOROFITAS (37)</b>						
<i>Actinastrum hantzschii</i>		X	X		X	
<i>Ankistrodesmus convolutus</i>	X	X		X	X	X

Clorofita	X		X	X	X	X
<i>Chlorella</i> sp.		X		X	X	X
<i>Closterium</i> sp.	X		X			
<i>Closterium ceratium</i>		X	X			
<i>Closterium gracile</i>				X	X	X
<i>Closterium kuetzingii</i>					X	
<i>Closterium parvulum</i>	X	X				
<i>Cosmarium nitidulum</i>		X				
<i>Crucigenia</i> sp.				X		X
<i>Crucigenia irregularis</i>	X					
<i>Crucigenia quadrata</i>		X				
<i>Crucigenia rectangularis</i>				X	X	X
<i>Crucigenia tetrapedia</i>					X	
<i>Eudorina</i> sp.				X		X
<i>Eudorina elegans</i>			X	X	X	X
<i>Euglena</i> sp.						X
<i>Euglena convoluta</i>	X	X			X	
<i>Gleocystis</i> sp.	X				X	
<i>Pediastrum boryanum</i>					X	
<i>Pediastrum duplex</i>					X	
<i>Pediastrum simplex</i>					X	
<i>Phacus</i> sp.			X			
<i>Phacus longicauda</i>		X			X	
<i>Selenastrum</i> sp.		X			X	
<i>Scelenastrum gracile</i>	X					
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	X	X				
<i>Scenedesmus bicaudatus</i>				X	X	X
<i>Scenedesmus bijuga</i>	X	X	X			
<i>Scenedesmus ecornis</i>				X	X	X
<i>Scenedesmus obtusus</i>					X	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	X			X	X	X
<i>Scenedesmus quadricauda</i> var. <i>quadrispina</i>		X				
<i>Schroederia</i> sp.					X	
<i>Staurastrum</i> sp.					X	
<i>Trachelomonas hispida</i>	X					
<b>RODOFITAS (1)</b>						
Rodofita filamentosa		X				

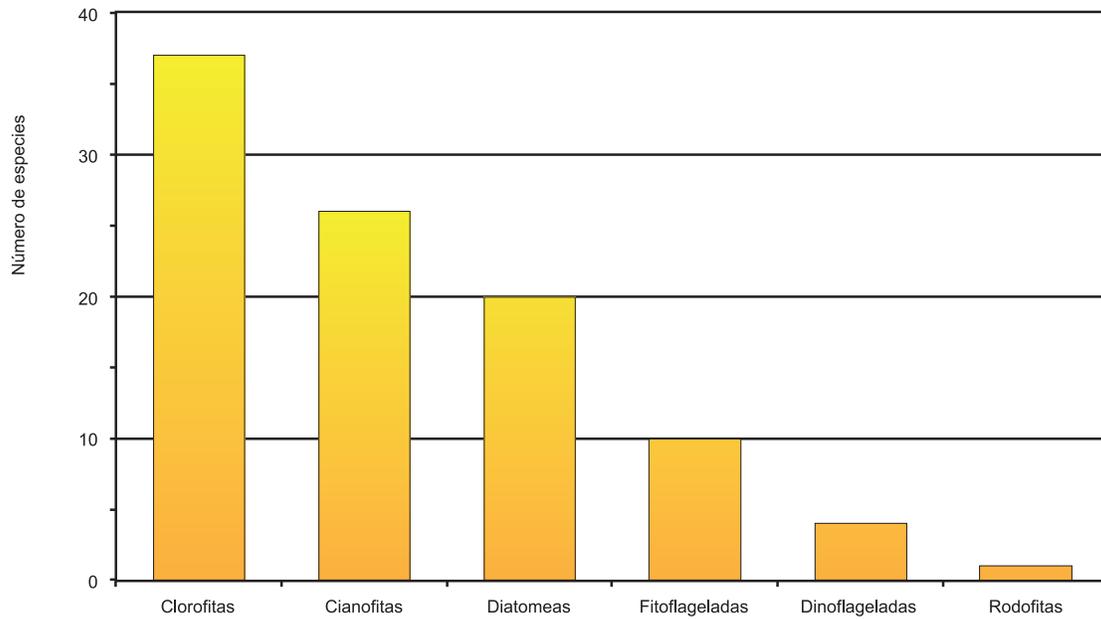
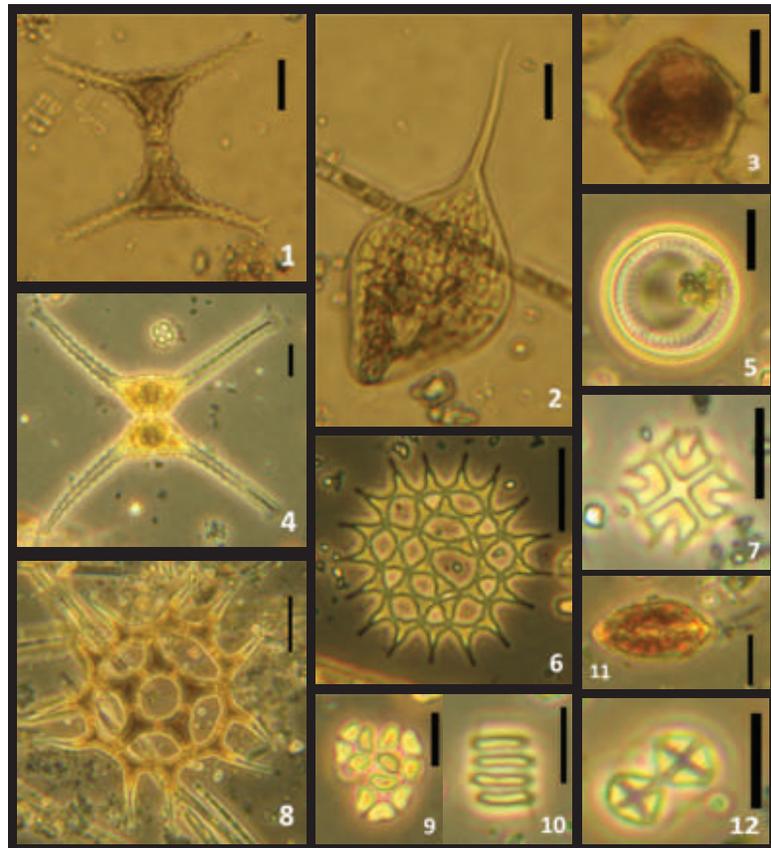


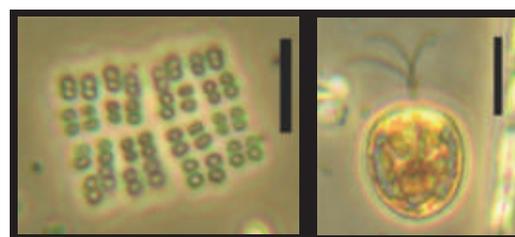
Figura IX.2 Número de especies por grupo taxonómico identificadas durante el período de muestreo.

Figura IX.3 Especies de fitoplancton identificadas en el embalse de Aguamilpa:

- 1) *Staurastrum* sp.;
- 2) *Phacus longicauda*;
- 3) *Peridinium* sp.;
- 4) *Staurastrum* sp.;
- 5) *Scenedesmus obtusus*;
- 6) *Pediastrum duplex*;
- 7) *Crucigenia tetrapedia*;
- 8) *Pediastrum simplex*;
- 9) *Crucigenia rectangularis*;
- 10) *Scenedesmus bicaudatus*;
- 11) Cryptophyta;
- 12) *Crucigenia rectangularis*.

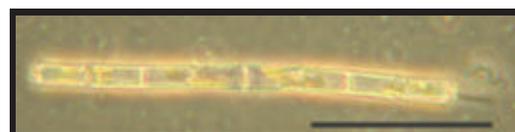


Con respecto al número de especies detectadas en el embalse se presentaron de 5 a 30 taxa por localidad, con los valores más bajos (<10 especies) en las estaciones P8 (diciembre 2008), S0 (febrero 2009) y H0 (junio 2009), y los más altos (>25 especies) en las estaciones H4, H5 y S3 todos en abril 2009.



*Merismopedia minutissima*  
(escala 10  $\mu\text{m}$ )

Fitoflagelada  
(escala 10  $\mu\text{m}$ )



*Aulacoseira granulata* (escala 50  $\mu\text{m}$ )

Figura IX.4 Fotomicrografías de tres especies de fitoplancton que se presentaron en todas las colectas.

La abundancia de células fitoplanctónicas en agua superficial varió considerablemente de un mínimo de 104  $\text{cél}\cdot\text{mL}^{-1}$  a un máximo de 31'579,334  $\text{cél}\cdot\text{mL}^{-1}$ . Para todo el embalse se presentó, en promedio, la mayor abundancia en junio 2009 (6'340,044  $\text{cél}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) y la menor abundancia en octubre 2008 (654  $\text{cél}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) (Figura IX. 5).

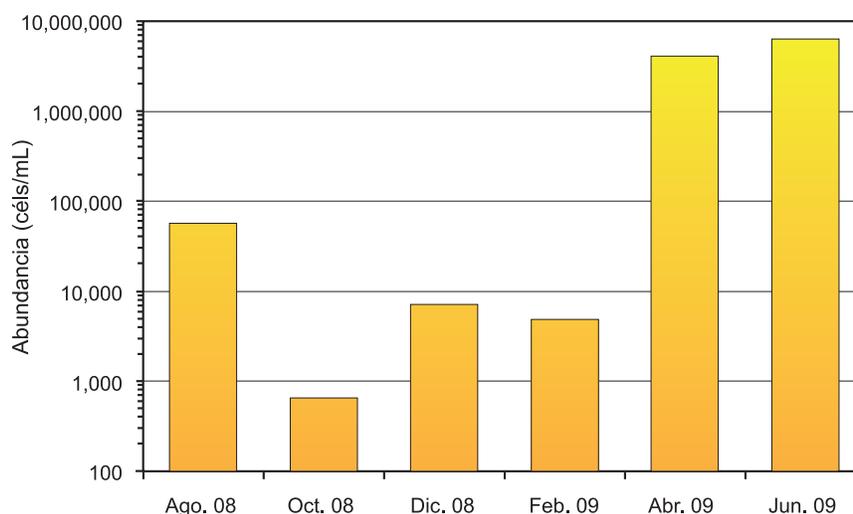


Figura IX.5 Abundancia promedio de fitoplancton en la Presa de Aguamilpa, Nayarit, en distintas fechas de muestreo.

A nivel general, se tiene que concentraciones de fitoplancton superiores a  $10^6$   $\text{cél}\cdot\text{L}^{-1}$  se consideran como floraciones fitoplántónicas (*blooms*), que en muchos de los casos presentan especies potencialmente productoras de toxinas (Reguera, 2002). Dicho esto, se tiene que las abundancias promedio que se presentaron en el embalse en abril y junio del 2009 pueden considerarse como floraciones fitoplántónicas.

Vale mencionar que las abundancias más elevadas estuvieron conformadas en un elevado porcentaje por cianofitas (Figura IX.6), lo que indica una eutrofización del cuerpo de agua debida, posiblemente, al transporte de contaminantes a través de los ríos.

Considerando que las estaciones de muestreo delimitadas e influenciadas por el río Huaynamota son H0, H4 y H5, las del río Santiago son S00, S0, S1, S2 y S3, y las estaciones propias del embalse son P6, P7 y P8, es evidente que el mayor porcentaje de cianofitas se presentó en las estaciones del río Santiago (Tabla IX.3), por lo que es probable la presencia de toxinas a lo largo de la cuenca de este río dado el elevado número de células de *Anabaena* sp., *Nostoc* sp. y *Raphidiopsis mediterranea* Skuja, las que están reportadas como generadoras de toxinas (Cronberg y Annadotter, 2006).

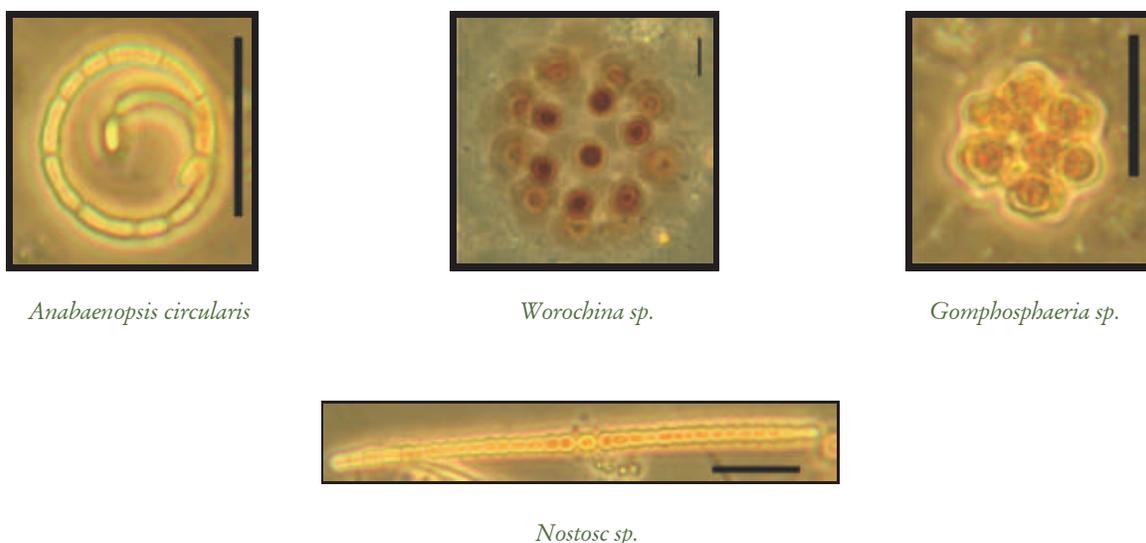


Figura IX.6 Fotomicrografías de especies de cianofitas presentes en el embalse de Aguamilpa. Las escalas corresponden a  $20\ \mu\text{m}$ .





TABLA IX.3 PORCENTAJE DE CIANOFITAS QUE CONFORMAN LA ABUNDANCIA DE FITOPLANCTON CORRESPONDIENTES AL MUESTREO DE JUNIO 2009.					
Río Huaynamota	%	Río Santiago	%	Embalse	%
H0	29,4	S00	37,3	P6	77,0
H4	11,8	S0	24,4	P7	91,5
H5	80,2	S1	98,8	P8	61,3
		S2	99,8		
		S3	99,4		

Con respecto a la riqueza de especies (d) ésta varió de un máximo de 3.08 (H5 en octubre 2008) a un mínimo de 0.54 (H0 en junio 2009). Con los valores mensuales promedio se obtuvo una variación de 0.94 (junio 2009) a 2.46 (octubre 2008), respectivamente (Figura IX.7). El menor valor promedio de este índice se obtuvo para junio 2009, lo que se debió principalmente al elevado porcentaje de cianofitas. Las cianofitas, en dicha fecha, se presentaron en todas las estaciones y en siete de ellas en un porcentaje mayor al 60% (Tabla IX.3).

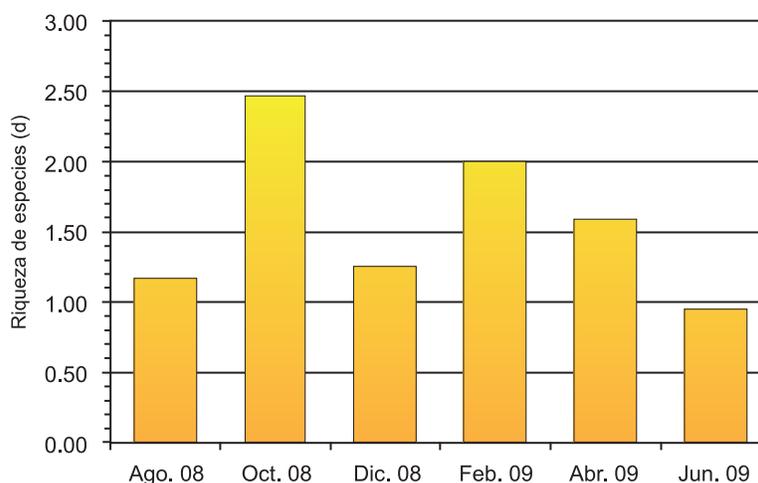


Figura IX.7 Índice de riqueza de especies (d) promedio de fitoplancton en la Presa de Aguamilpa, Nayarit, en distintas fechas de muestreo.

El índice de equitatividad ( $J'$ ) varió de 0.907 (S3 en octubre 2008) a 0.257 (S3 en junio 2009). El intervalo de variación promedio para este índice, en los distintos meses de muestreo, fue de 0.535 (agosto 2008) a 0.774 (octubre 2008) (Figura IX.8).

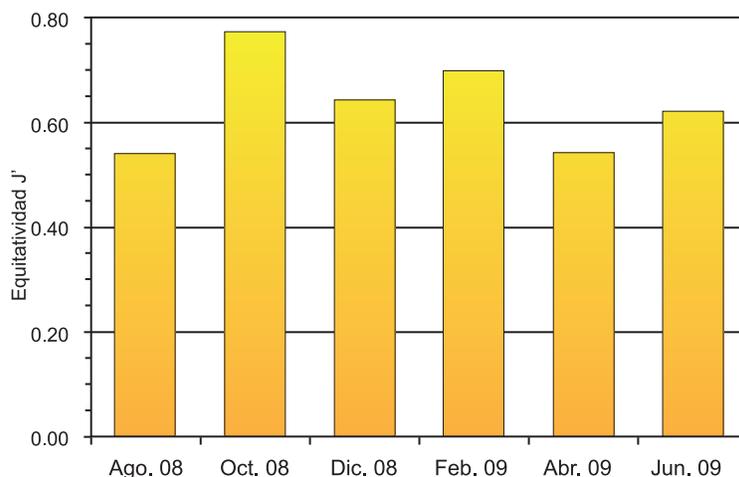


Figura IX.8 Índice de equitatividad J' promedio de fitoplancton en la Presa de Aguamilpa, Nayarit, en distintas fechas de muestreo.

Con respecto al índice de diversidad de Shannon-Wiever éste presentó un mínimo de 0.66 (S3 en junio 2009) y un máximo de 2.58 (S1 en octubre 2008). Los promedios mensuales para este índice variaron de 0.84 (febrero 2009) a 2.15 (octubre 2008) (Figura IX.9).

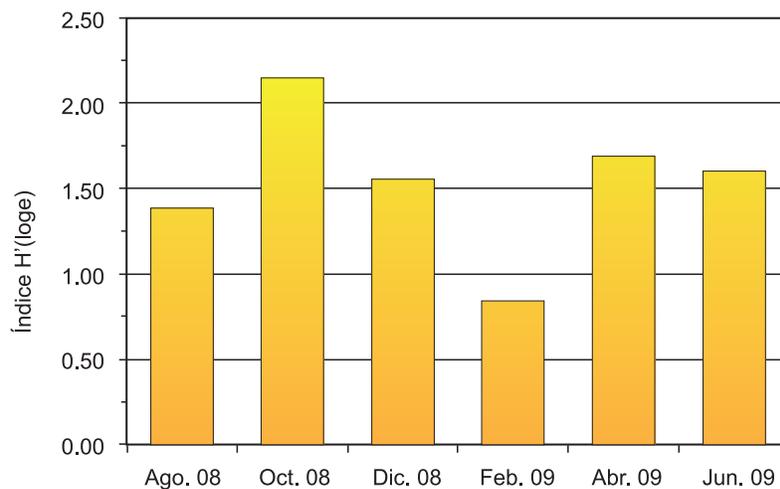


Figura IX.9 Índice H' (log) (diversidad Shannon-Wiever) promedio de fitoplancton en la Presa de Aguamilpa, Nayarit, en distintas fechas de muestreo.

El índice de diversidad de Simpson presentó un mínimo de 0.301 (S3 en junio 2009) y un máximo de 0.915 (S3 en octubre 2008). El promedio mensual de este índice tuvo poca variación, con un mínimo de 0.654 y un máximo de 0.814 (Figura IX.10).

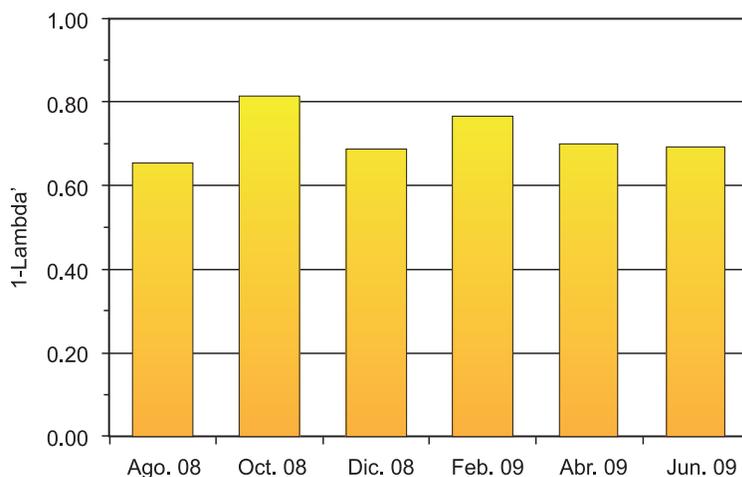


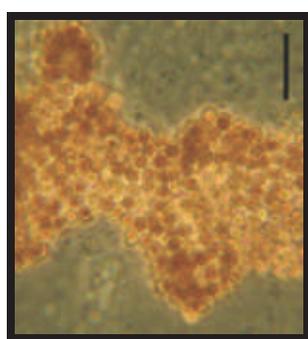
Figura IX.10 Índice 1-Lambda' (diversidad de Simpson) promedio de fitoplancton en la Presa de Aguamilpa, Nayarit, en distintas fechas de muestreo.

Los índices presentados se ven influenciados tanto por la abundancia como por la diversidad, con los promedios mensuales calculados con los valores de todas las estaciones de muestreo, es evidente que el muestreo de octubre del 2008 presenta la mayor riqueza de especies, equitatividad y diversidad (Figuras IX.6-9).

#### 4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos se concluye que: se tiene una elevada diversidad fitoplanctónica a través del tiempo. Esto es debido a que se generan nichos con diferentes condiciones ambientales (temperatura, intensidad luminosa, concentración de nutrientes, etc.) que permiten el desarrollo de una gran diversidad de especies (Ibarra-Montoya *et al.*, 2010). Se presentan a través del año floraciones fitoplanctónicas dominadas principalmente por cianofitas, y debidas a la entrada de grandes cantidades de nutrientes (N y P) procedentes de actividades antropogénicas desarrolladas en la cuenca (Rangel-Peraza *et al.*, 2009).

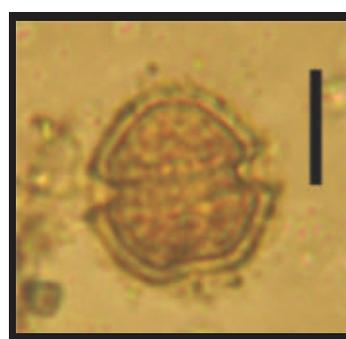
Es probable la presencia de toxinas a lo largo de la cuenca del río Santiago por el elevado número de células de *Anabaena* sp., *Nostoc* sp. y *Raphidiopsis mediterranea* Skuja, que se han reportado como tóxicas (Cronberg y Annadotter, 2006). La presencia de las cianofitas *Microcystis* y *Anabaena flos-aquae* en el embalse, es una señal de alerta ya que algunas de éstas producen toxinas (Vasconcelos *et al.*, 2010). Además de las cianofitas se identificaron otras especies reportadas como productoras potenciales de toxinas, tal es el caso de *Gymnodinium* sp. (Figura VIII.11)



*Microcystis aeruginosa*  
(escala 20  $\mu\text{m}$ )



*Anabaena flos-aquae*  
(escala 20  $\mu\text{m}$ )



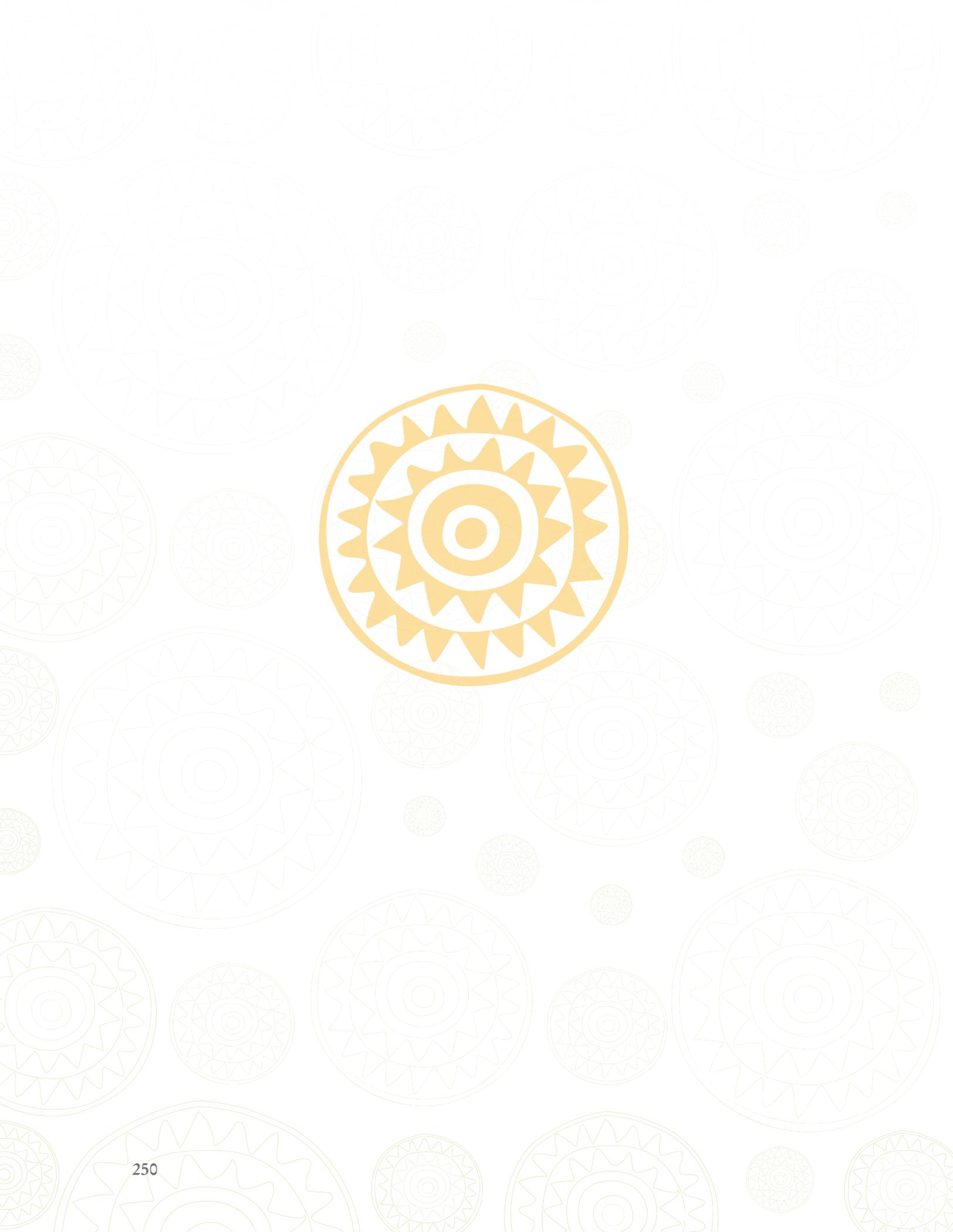
*Gymnodinium* sp.  
(escala 10  $\mu\text{m}$ )

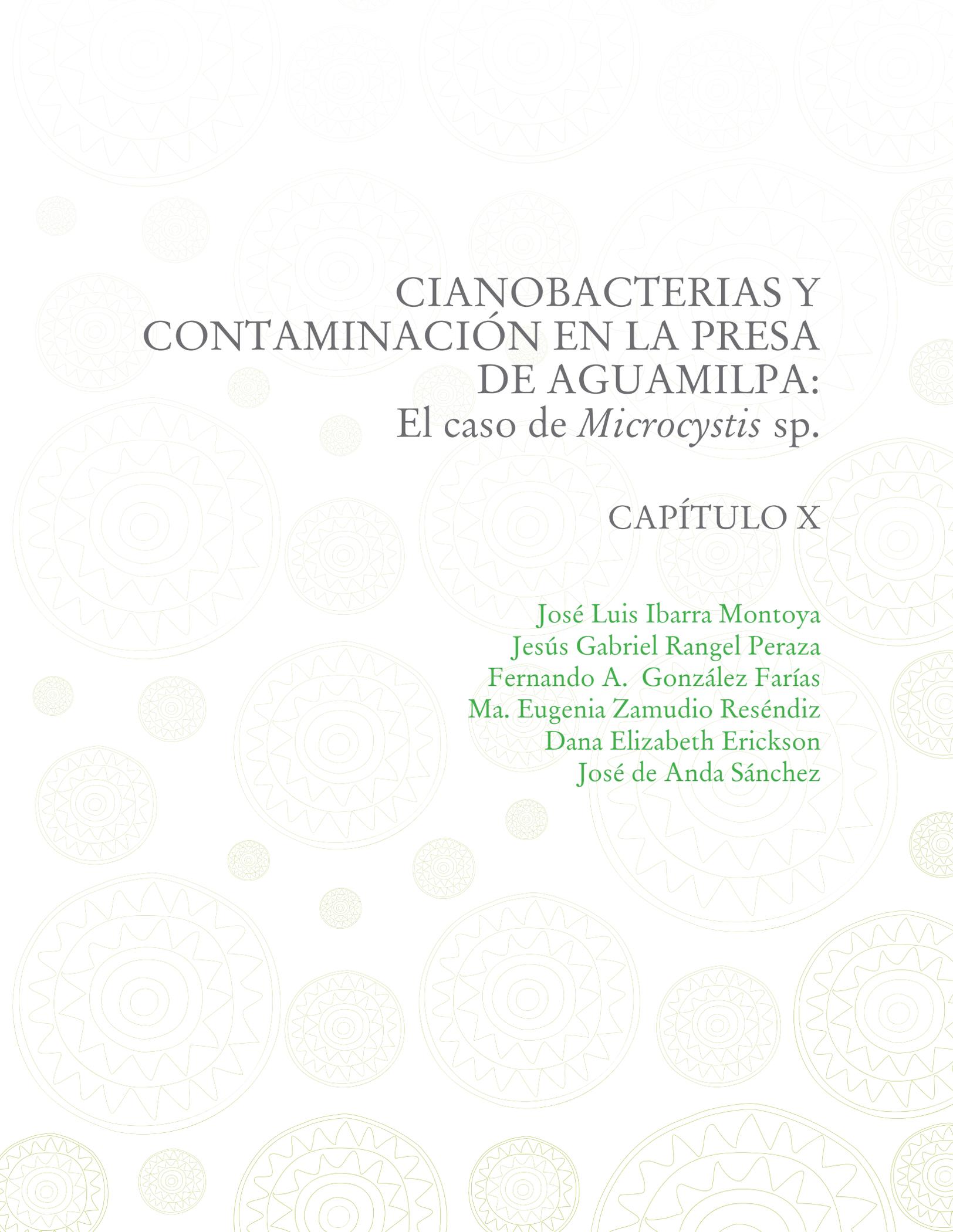
Figura IX.11 Especies de fitoplancton reportadas como productoras potenciales de toxinas (Vasconcelos *et al.*, 2010). ⚙

## Referencias

- Argañaraz, B, Parodi R, Cáceres, (2005). Caracterización citomorfométrica de *Anabaena circinalis* (Cyanophyta) en una proliferación masiva en el embalse Paso de Las Piedras (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Bol. Soc. Argent. Bot., 40(1-2): 51-60.
- Cronberg, G, Annadotter, H (2006). Manual on aquatic cyanobacteria. A photo guide and synopsis of their toxicology. IOC, UNESCO. 106 pp.
- De la Lanza, G, Hernández, PS, Carbajal P (2000). Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (Bioindicadores). Plaza y Valdéz Eds. México, D.F. 633 pp.
- Ferrario, ME, Sar, E, Sala, E (1995). Metodología básica para el estudio del fitoplancton con especial referencia a las diatomas. In: Alveal, K, ME, Ferrario, EC, Olvera y E, Sar (Eds.) Manual de Métodos Ficológicos. Editorial Aníbal Pinto, S. A. de Concepción, Chile: 1-24.
- Ferreiros, IV (1980). Contribución al estudio de los índices bióticos como parámetros para evaluar la calidad del agua. Rev. Latinoamer. Microbiól., 22: 189-204.
- García-Cabrera, J (2007). Plancton como indicador de calidad del agua en la presa Aguamilpa. Ingeniería Hidráulica México, 23: 103-116.
- García-Rodríguez, J, Tavera, R (2002). Phytoplankton composition and biomass in a shallow monomictic tropical lake. Hydrobiología. 467: 91-98.
- Gutiérrez-Mendieta, FJ, Varona, C, Contreras, E (2006). Caracterización estacional de las condiciones físico-químicas y de productividad primaria fitoplanctónica de dos lagunas costeras tropicales del estado de Chiapas, México. Hidrobiológica, 16(2): 137-146.
- Hasle, GR (1978). The inverted-microscope method. In: Sournia, A. (ed.) Phytoplankton Manual. UNESCO, París. 191-196.
- Hutchinson, GE (1967). A Treatise on Limnology. Introduction to lake biology and the limnoplankton. J. Wiley & Sons, Inc., New York, Vol. 2, 1015 pp.
- Ibarra-Montoya, JL, Rangel-Peraza, G, González-Farias, F, De Anda, J, Zamudio-Reséndiz, E, Martínez-Meyer, E, Macias-Cuellar, H (2010). Modelo de nicho ecológico para predecir la distribución potencial de fitoplancton en la Presa Hidroeléctrica Aguamilpa, Nayarit, México. Ambia Agua, 5 (3): 60-75.
- Jasprica, N, Hafner, D, Batistié, M, Kapetanovié, (2005). Phytoplankton in three freshwater lakes in the Neretva River delta (Eastern Adriatic, NE

- Mediterranean). *Nova Hedwigia*, 81(1-2): 37-54.
- Karentz, D, Smayda, (1984). Temperature and seasonal occurrence patterns of 30 dominant phytoplankton species in Narragansett Bay over a 22-year period (1959– 980). *Marine Ecology-Progress Series*, 18: 277–293.
- Pérez, M, Bonilla, C, Martínez, G (1999). Phytoplankton community of a polymictic reservoir, La Plata River basin, Uruguay. *Rev. Brasil. Biol.*, 59(4): 535-541.
- Pizzolon, L (1996). Importancia de las cianobacterias como factor de toxicidad en las aguas continentales. *Interciencia*, 21(6): 239-245.
- Prosperi, C H (2002). Composición del fitoplancton del Embalse San Roque. *Rev. Tec. Cienc.*, 6(13): 8-10.
- Rangel-Peraza, JG, de Anda, J, González-Farias, F, Erickson, D (2009). Water quality assessment of Aguamilpa reservoir, Nayarit, Mexico. En: Brebbia, C.A. (Ed.), *Water Resources Management V. WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 125: 169-184.
- Reguera, B (2002). Establecimiento de un programa de seguimiento de microalgas tóxicas. In: Sar, E.A.; M. E., Ferrario y B., Reguera (eds.) *Floraciones algales Nocivas en el Cono Sur Americano*. Instituto Español de Oceanografía. pp. 19-52.
- Ulloa-Ramírez, P A, Patiño-Valencia, J, Sánchez-Regalado, R (2007). Dictamen para la implementación de la veda 2007, Aguamilpa, Nayarit. SAGARPA, INP-CRIP Bahía Banderas, Nayarit. 10 pp.
- Vasconcelos, V, Martins, A, Vale, A, Antunes, J, Azevedo, M, Welker, O, López, Montejano, G (2010). First report on the occurrence of microcystins in planktonic cyanobacteria from Central Mexico. *Toxicon*, 56: 425–431.
- Zalocar de Domitrovic, Y, Asselborn, V, Casco, S (1998). Variaciones espaciales y temporales del fitoplancton en un lago subtropical de Argentina. *Rev. Brasil. Biol.*, 58(3): 359-382.





CIANOBACTERIAS Y  
CONTAMINACIÓN EN LA PRESA  
DE AGUAMILPA:  
El caso de *Microcystis* sp.

CAPÍTULO X

José Luis Ibarra Montoya  
Jesús Gabriel Rangel Peraza  
Fernando A. González Farías  
Ma. Eugenia Zamudio Reséndiz  
Dana Elizabeth Erickson  
José de Anda Sánchez



## 1. Introducción

El enriquecimiento excesivo en nutrientes de las aguas de superficie, principalmente en fósforo (P) y nitrógeno (N), necesariamente conduce al cambio de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y al deterioro de la calidad de agua. Entre los cambios estructurales producidos por la eutrofización es de destacar el dominio de la principal comunidad de productores pelágicos de lagos y embalses: el fitoplancton, y en particular de las cianobacterias.



En México, especialmente durante la última década, las cianobacterias comenzaron a verse como un problema para la calidad de agua y para la salud humana y animal. Actualmente las cianobacterias tóxicas han comenzado a representar un grave riesgo para el uso humano del agua en los diferentes embalses y lagos. Si bien se dispone de importantes resultados de estudios realizados en algunos ambientes acuáticos de México, aún hoy no se tiene un amplio y claro panorama de la presencia y abundancia de las cianobacterias en lagos y embalses del país.

Muchas especies de cianobacterias han sido encontradas en aguas eutrofizadas y parece ser que dichos organismos son más abundantes en este tipo de aguas que en aguas oligotróficas (Shapiro, 1973; Cood *et al.*, 1989; González y Ortaz, 1998). Esta mayor abundancia de cianobacterias en aguas eutrofizadas puede deberse a uno o varios factores, dentro de los cuales cabe mencionar la capacidad que tienen, las cianobacterias en general, para desarrollarse en ambientes con bajas concentraciones de dióxido de carbono; condiciones que se dan en aguas que poseen altas densidades de algas producto del enriquecimiento de nutrientes (Shapiro, 1973; Dávalos *et al.*, 1989; Manahan, 2001); además de poder desarrollarse con concentraciones de dióxido de carbono relativamente bajas, la cubierta mucilaginosa de las cianobacterias les ayuda a retenerlo.

Otro factor que influye para que algunos géneros de cianobacterias, como *Microcystis*, sean muy numerosos en este tipo de aguas es que, por su forma de vida y por los pigmentos fotosintéticos que poseen, aprovechan mejor la luz e impiden el paso de la misma a los estratos inferiores de la masa de agua impidiendo el desarrollo masivo de muchas clorofíceas (Beyruth, 1993).

Además de los factores ya mencionados Fredrickson y Stephanopoulos (1981) mencionan la posibilidad de que las sustancias alelopáticas, que segregan muchas cianobacterias, favorezcan su desarrollo en este tipo de aguas, al eliminar la competencia de muchos organismos y al evitar ser depredadas por otros. Amplias discusiones sobre este tópico se dan en Shapiro (1973) y Schindler (1974).

Las investigaciones sobre cianobacterias tienen un marcado enfoque interdisciplinario e intersectorial; existen hoy algunas preguntas claves a responder por los científicos involucrados en esta temática: ¿cuáles son las cianotoxinas que más afectan?, ¿cómo analizarlas?, ¿qué efectos producen?, ¿cuáles son los organismos productores y los vectores?, ¿qué factores endógenos y ambientales propician su síntesis y acumulación?, ¿qué factores propios de la biología de las especies están involucrados en la producción de las toxinas?; así como ¿cuáles son las interacciones tanto con el medio como con otros organismos que facilitan o propician la producción de toxinas?, ¿qué sistemas de monitoreo y de tratamiento del agua serían adecuados para evitar riesgos a la salud humana y ambiental?, ¿cómo informar y establecer sistemas de alerta temprana?, ¿qué medidas legales adoptar?, entre otras; pero sin dudas, un tema relevante y de gran impacto es el conocimiento de la distribución de sus especies (las más tóxicas) en el medio acuático.

Con el objetivo de proponer un método de búsqueda de contaminación se ha propuesto utilizar el modelo de nicho ecológico para predecir la distribución potencial de las cianobacterias en la presa de Aguamilpa, Nayarit, México.

## *2. Distribución potencial de *Microcystis* sp. en la presa de Aguamilpa, Nayarit.*

El modelado de nicho ecológico (MNE) es probablemente el método más adecuado que actualmente existe para estimar la distribución geográfica real y potencial de las especies (Guisan y Thuiller, 2005). Este enfoque se utiliza cada vez más en la toma de decisiones en materia de conservación, restauración y contaminación ambiental (Pearce y Lindenmayer, 1998; Ferrier, 2002).

A pesar de la probada eficacia de este método para la delimitación de las distribuciones geográficas de las especies terrestres, su aplicabilidad en el ámbito acuático ha sido poco explorada (Wiley *et al.*, 2003). Esto es particularmente

cierto para los ecosistemas de agua dulce, donde la escala geográfica es grande, y la información de los datos ambientales, para la mayor parte del mundo, no es de calidad, esta información es necesaria para la generación de los modelos de nicho (Iguchi *et al.*, 2004; McNyset, 2005). Tal es el caso de los ecosistemas limnológicos en México, donde los datos normalmente están incompletos y no se cuenta con bases de datos geográficos, regionales o nacionales, de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas continentales.

Y como se explicó en el capítulo IV, la presa de Aguamilpa, se ubica en el borde sureste de la Sierra Madre Occidental, con la presencia de terrenos con relieves accidentados de origen volcánico. Sus características principales son dos sistemas de topoformas: la sierra alta, ubicada en la subcuenca del río Huaynamota, formada por altas mesetas interrumpidas de manera abrupta por cañadas; y la del tipo cañón, en la subcuenca Santiago-Aguamilpa, donde el relieve se conforma de cadenas montañosas de formas volcánicas escarpadas y cañones con perfiles en “V”, que llegan a alcanzar una altura por arriba de los 1,000 m en algunos sitios (INEGI, 2006a).

En el embalse de Aguamilpa se ha registrado una gran diversidad de especies de fitoplancton, que incluyen a *Microcystis*, *Anabaena* y *Aulacoseira* como los géneros más abundantes durante el estiaje cálido; y a algunas especies dominantes de Clorofitas y Cianofitas durante el estiaje frío (Zamudio y González-Farías, 2009). Uno de los grupos más representativos de la comunidad de fitoplancton en el embalse de Aguamilpa es el de las cianobacterias, principalmente *Microcystis* sp. que es una especie que puede producir microcistinas<sup>1</sup> (Martín *et al.*, 2004).

A nivel mundial se tiene interés en el estudio de las cianobacterias, debido a las numerosas intoxicaciones letales ocurridas en diversas especies de la fauna silvestre y doméstica, y en el número de casos de enfermedades en humanos, causadas por la exposición prolongada a las toxinas que genera esta especie de alga, situación que ha llamado la atención de la Organización Mundial de la Salud (OMS), de la sociedad en general y de la comunidad científica en particular para estudiar tanto a las cianobacterias como a sus toxinas (Chorus, 2001).

*Microcystis* sp. crece preferentemente en ambientes de aguas alcalinas o neutras con pH entre 6 y 9, y temperaturas entre 15° y 30 °C, prefiere una alta concentración de nutrientes, nitrógeno y fósforo (Lampert y Sommer, 1997; Bernal-Brooks *et*

<sup>1</sup> Bacterias capaces de producir sustancias de carácter tóxicas

al., 2003; Dávalos *et al.*, 1989), por lo que se encuentra, principalmente, en cuerpos de agua eutrofizados (Roset *et al.*, 2001).

Si bien los ambientes eutrofizados favorecen las floraciones fitoplanctónicas, particularmente de cianobacterias, también se han observado floraciones altamente tóxicas en aguas oligotróficas de algunos lagos templados (Mez *et al.*, 1997). Además de los efectos negativos que produce el crecimiento masivo de las cianobacterias, como son las alteraciones en la calidad del agua (en especial en el pH y oxígeno disuelto) disminuyendo con ello sus posibilidades de uso para la recreación, abastecimiento o para la producción piscícola, y la oclusión de los opérculos de peces que nadan entre las floraciones, actualmente se sabe que *Microcystis* sp. produce potentes toxinas (microcistinas), capaces de causar efectos agudos y crónicos de salud en el hombre y en diversas especies de animales (Cood *et al.*, 1999).

Dada la importancia de las cianobacterias, en particular *Microcystis* sp. y gracias a la disponibilidad de datos de las variables físico-químicas y biológicas del agua y parámetros hidrológicos obtenidos en el embalse de Aguamilpa, se considera una excelente oportunidad para establecer estrategias que permitan conocer la distribución potencial de *Microcystis* sp. en el ecosistema acuático, a través del modelado de nicho ecológico.

Este trabajo presenta una metodología para la evaluación de la presencia de *Microcystis* sp., dentro de un cuerpo de agua, con base a su distribución espacial predicha a través del modelado de nicho ecológico, uso de suelo y la información sobre las subcuencas tributarias del embalse de Aguamilpa.

### 3. Metodología

Para modelar el nicho ecológico y predecir la distribución potencial de *Microcystis* sp. se utilizó el enfoque de máxima entropía (Maxent), versión de escritorio 3.3.0. de noviembre del año 2009 (Phillips *et al.*, 2006).

Una explicación detallada del modelo Maxent se puede revisar en Phillips *et al.* (2006). El procedimiento general de Maxent aplicado para generar los modelos de nicho en la presa de Aguamilpa es el siguiente:

- 1) Se seleccionaron las estaciones de muestreo. En este trabajo se eligieron ocho



6600 V2

Multiparameter Water Quality Sonde

YSI

estaciones (Rangel-Peraza *et al.*, 2009).

- 2) Todas las estaciones fueron georeferenciadas con un geoposicionador satelital (GPS map, 178C Sounder, marca GARMIN). En cada una de las estaciones se registraron, a nivel superficial (1m), once parámetros físicos, químicos y biológicos del agua, utilizando una sonda multiparámetro YSI (Modelo 6600D), que fue calibrada *in situ* antes de cada muestreo. Los parámetros medidos fueron: temperatura, conductividad, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, pH, potencial de óxido reducción, turbidez, concentración de algas verde-azules, clorofila total, fósforo y nitrógeno.
- 3) Se colectaron muestras de los organismos y se identifican en el laboratorio. Los datos de presencia de *Microcystis* sp., en el sistema Aguamilpa, que se utilizaron fueron los que se reportan en el capítulo IX.
- 4) Se obtuvieron promedios de las épocas climáticas. Utilizando los datos de agosto de 2008 a junio de 2009 de cada parámetro, con registros cada dos meses.
- 5) Se generaron coberturas con los promedios de las épocas climáticas. Las coberturas se generaron utilizando un polígono que delimita al cuerpo de agua de la presa de Aguamilpa, el cual fue creado a una cota de 300 msnm, a partir de las Curvas de Nivel y el Modelo Digital de Elevación (escala 1:250,000) de CONAGUA (2006). Estas coberturas, mapas tipo *raster*, se generaron utilizando la técnica IDW de interpolación (Distancia Inversa Ponderada) (Delaney, 1999), en el Sistema de Información Geográfica ArcMap 9.2 (GIS, ESRI, 1999-2001), enmascarando el análisis solo para el cuerpo de agua de la presa.
- 6) Utilizando las coberturas de los parámetros y los datos de presencia de *Microcystis* sp. se llevó a cabo el modelaje con Maxent.

## 4. Resultados

En el modelo la capacidad de predicción para los datos de prueba se generó un AUC<sup>1</sup> de 0.903, lo que indica que la habilidad del modelo para clasificar las presencias fue bueno (Parolo *et al.*, 2008).

<sup>1</sup> Área bajo la curva (*area under curve*)

**TABLA X.1 VALORES PROMEDIO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS QUE SE USARON PARA GENERAR LAS COBERTURAS DEL CUERPO DE AGUA DE LOS DIFERENTES SITIOS DE MUESTREO, DURANTE EL PERIODO DE AGOSTO 2008 A JUNIO 2009.**

ESTIAJE FRÍO											
Loc	T	Cond	SDT	OD	pH	ORP	Tur	Algas	Clorofila	P	N
	(°C)	( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	( $\text{g l}^{-1}$ )	( $\text{mg l}^{-1}$ )			(NTU)	( $\text{cel ml}^{-1}$ )	( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	( $\text{mg l}^{-1}$ )	( $\text{mg l}^{-1}$ )
S1	25.06	0.259	0.168	3.92	7.6	52.43	52.72	525	5.36	2.22	0.24
S2	24.94	0.254	0.165	4.02	7.7	45.97	54.00	488	5.19	2.21	0.26
S3	25.00	0.257	0.167	4.00	7.6	40.55	54.45	558	5.23	2.24	0.20
H4	24.52	0.173	0.112	2.65	7.3	56.11	42.61	842	3.83	0.71	0.13
H5	24.96	0.168	0.110	3.20	7.3	51.08	51.22	398	4.54	0.69	0.16
P6	24.92	0.230	0.149	5.29	7.6	46.34	55.69	373	5.03	2.39	0.27
P7	24.73	0.231	0.150	6.31	7.6	55.51	46.20	757	5.39	2.43	0.28
P8	24.72	0.229	0.149	6.12	7.6	48.26	49.66	352	4.41	2.37	0.25
ESTIAJE CÁLIDO											
Loc	T	Cond	SDT	OD	pH	ORP	Tur	Algas	Clorofila	P	N
	(°C)	( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	( $\text{g l}^{-1}$ )	( $\text{mg l}^{-1}$ )			(NTU)	( $\text{cel ml}^{-1}$ )	( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	( $\text{mg l}^{-1}$ )	( $\text{mg l}^{-1}$ )
S1	27.89	0.289	0.188	7.32	8.6	91.50	27.63	1605	6.7	0.77	0.78
S2	28.81	0.280	0.182	8.06	8.7	87.65	26.79	1376	6.4	0.75	0.72
S3	28.96	0.278	0.181	8.46	8.6	88.65	27.80	1566	7.3	0.74	0.74
H4	27.47	0.288	0.187	3.73	7.5	120.82	19.46	1092	5.5	0.28	1.02
H5	27.90	0.261	0.169	7.41	8.0	54.01	21.28	1170	3.3	0.26	1.05
P6	27.74	0.261	0.167	8.58	8.3	108.49	28.28	968	6.2	0.73	0.65
P7	27.03	0.256	0.166	9.23	8.2	90.85	33.71	7416	6.7	0.71	0.63
P8	26.32	0.264	0.172	8.15	8.2	126.02	29.29	1507	7.5	0.73	0.64

Loc=localidad; T=temperatura del agua; Cond=conductividad; SDT=sólidos disueltos totales; OD=oxígeno disuelto; ORP=potencial de óxido reducción; Tur=turbidez; P=fósforo; N=nitrógeno.

Las predicciones del modelo para *Microcystis* sp. durante el estiaje frío, muestran que tiene una distribución potencial en todo el sistema de Aguamilpa (Figura X.1), aunque el modelo predice una mayor probabilidad de encontrarse en el afluente del río Huaynamota y en la cortina de la presa.

Durante el estiaje cálido esta especie tiene una mayor probabilidad de encontrarse en la cuenca alta del río Huaynamota y en la confluencia (estación P6), así mismo, aunque con menor probabilidad en la cuenca alta del río Santiago. Las zonas que el modelo predijo como más probables para la distribución de *Microcystis* sp., están asociadas con la calidad de agua, los nutrientes (fósforo y nitrógeno) y con el uso local de tierras agrícolas.

Por ejemplo, durante el estiaje frío, todo el sistema Aguamilpa tiene probabilidad de ser un nicho idóneo para la distribución de *Microcystis* sp., es muy probable

que este fenómeno se deba al aumento de flujo de agua que se da en la época de lluvias y que se mantiene hasta el estiaje frío, dicho aumento estará dado por los escurrimientos, particularmente desde las cuencas altas de los ríos Santiago y Huayanamota que traen consigo diferentes nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno al cuerpo de agua del sistema. Lo anterior ocasiona que gran parte del embalse mantenga condiciones ambientales adecuadas para el crecimiento y desarrollo de esta especie.

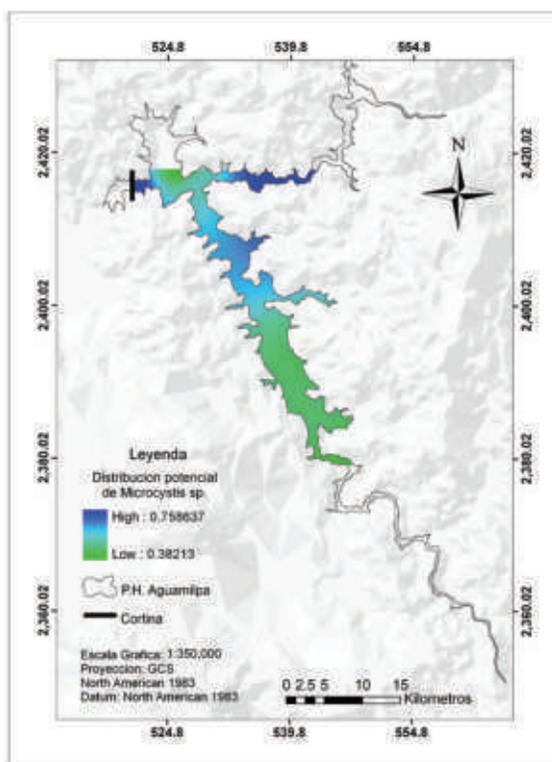


Figura X.1 Distribución potencial de *Microcystis sp.* en la presa de Aguamilpa, durante el estiaje frío. Las probabilidades fueron las predichas por el modelo de nicho ecológico.

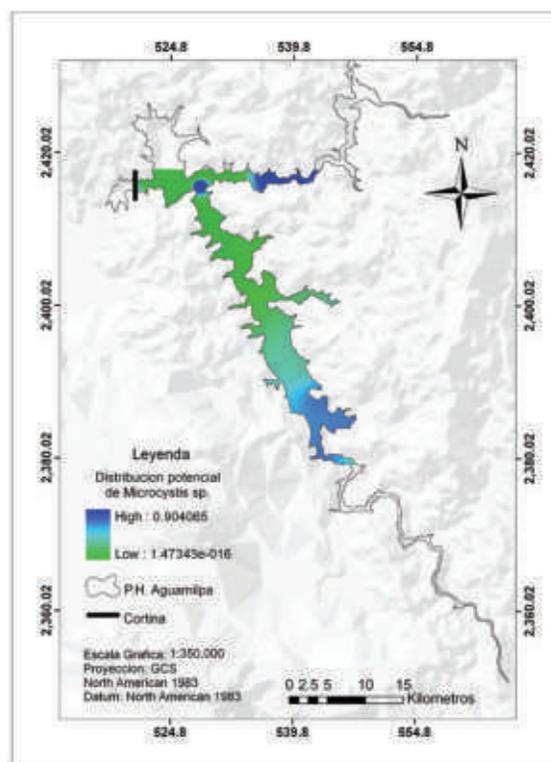


Figura X.2 Distribución potencial de *Microcystis sp.* en la presa de Aguamilpa, durante el estiaje cálido. Las probabilidades fueron las predichas por el modelo de nicho ecológico.

Durante el estiaje cálido se observan dos zonas de mayor probabilidad de distribución de *Microcystis sp.*: i) en la cuenca alta del río Huaynamota; y ii) en la confluencia de ambos ríos. Este fenómeno es probable que se deba a que estas áreas mantienen altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, como una consecuencia del poco movimiento que presenta el agua en esta época. Lo anterior genera un ambiente ideal para el crecimiento y abundancia de esta especie.

Es posible que dichos nutrientes sean producto de las actividades antropogénicas, agrícolas, industriales y urbanas, principalmente en la cuenca del río Santiago, y las actividades de tala y la creciente deforestación en la cuenca alta del río Huaynamota, lo cual induce erosión de suelos, transporte de nutrientes y desestabilizar los ciclos biogeoquímicos naturales de la cuenca. Durante la época de lluvias dichos nutrientes llegan a los arroyos y ríos que forman la red hidrográfica del sistema Aguamilpa.

## 5. *Discusión*

El modelado de nicho ecológico (junto con otras herramientas de análisis espacial, sobre todo los SIG (Sistemas de Información Geográfica) es un enfoque útil para futuros estudios en los sistemas terrestres (Chen y Peterson, 2002; Anderson y Martínez-Meyer, 2004; Chefaouri *et al.*, 2005). Sin embargo, este enfoque ha sido poco utilizado en los sistemas acuáticos (Wiley *et al.*, 2003; McNyset, 2005; Ibarra-Montoya *et al.*, 2010), en gran parte, debido a la falta de información ambiental que existe en este tipo de ecosistemas (Iguchi *et al.*, 2004).

A pesar de esta limitación, la predicción de ocurrencia de la especie con base en las localidades incluidas para la construcción de este modelo, fue bastante bueno. El análisis del AUC obtuvo una predicción del 90%, lo que sugiere que Maxent generó un buen desempeño en la predicción de la distribución potencial de *Microcystis* sp.

En otros estudios donde se utilizan modelos de nicho ecológico es frecuente que se presenten sobrepredicciones, éstas pueden tener varias causas, algunas son algorítmicas y otras son conceptuales y metodológicas:

(1) Estudios recientes de la comparación de modelos con Maxent y GARP (*Genetic Algorithm for Rule-set Prediction*) muestran una frecuente sobrepredicción (clasificar erróneamente las ausencias) con respecto a otros métodos (Elith, 2006; Pearson *et al.*, 2006). Sin embargo, estos análisis se centraron en la capacidad de los algoritmos para interpolar (en vez de extrapolar) analizando los modelos construidos con puntos de presencia-ausencia seleccionados al azar de un conjunto de datos más grande. En los estudios diseñados explícitamente para poner a prueba la capacidad de extrapolación (predicción de presencia en las zonas donde no





hay datos de muestreo) Maxent ha funcionado bien (Peterson, 2001, Benítez-Gutiérrez, 2010).

(2) La sobrepredicción también se debe a la naturaleza del enfoque en relación con la historia natural del grupo. El enfoque del modelado de nicho ecológico se centra en las condiciones ambientales donde una especie puede persistir (es decir, su nicho ecológico) y no incluye los factores históricos y ecológicos que causan que las especies ocupen en su totalidad la extensión espacial de sus nichos ecológicos (por ejemplo, las barreras biogeográficas y las interacciones) (Soberon y Peterson, 2005).

Por lo tanto, la ausencia de una especie de un lugar determinado no significa necesariamente la ausencia de su nicho ecológico. Esto es particularmente importante para *Microcystis* sp. porque el elevado número de individuos en general, indica una historia muy dinámica de aislamiento y su posterior abundancia bajo condiciones físico-químicas, biológicas y de nutrientes del agua.

(3) Por último, la falta de información ambiental de cuerpos de agua representa una importante limitación metodológica que pudiera influir en los resultados. Para este estudio se consideraron parámetros físicos, químicos y biológicos del agua para modelar el nicho ecológico de la especie. Claramente, la producción y la incorporación de la información ambiental específicamente en relación con los sistemas de agua (por ejemplo, profundidad, pH, nutrientes y contenido de oxígeno) mejoran en gran medida la calidad de los modelos.

Dentro del grupo de cianobacterias la especie *Microcystis* sp. es de las más distintivas en los cuerpos de agua dulce. Varias poblaciones de esta especie poseen rasgos biológicos y ecológicos únicos, como la producción de sustancias alelopáticas, para eliminar la competencia de otros organismos del medio, y para evitar ser depredadas por otros organismos (Shapiro, 1973).

Al igual que los demás miembros de las cianobacterias, requieren de la energía luminosa para realizar la fotosíntesis, sin embargo, *Microcystis* sp. tiene la capacidad de sintetizar diversos pigmentos que le permiten capturar la luz de manera muy eficiente, captando longitudes de onda de 500 hasta 600 nm, que difícilmente son empleadas por otros organismos del fitoplancton, incluso pueden vivir en

ambientes con solo luz verde (Mur *et al.*, 1978). *Microcystis* sp. presenta vesículas de gas, las cuales le permiten migrar y posicionarse verticalmente en la columna de agua (Walsby, 1987). De acuerdo a Reynolds (1987) la tasa de crecimiento de las cianobacterias, particularmente de la *Microcystis* sp. es mucho menor que la de microalgas, debido a esto, se requiere de tiempos de retención del agua prolongados para permitir así las floraciones algales.

Se pensaba que esta especie al igual que otras cianobacterias dependían del nitrógeno y fósforo en altas concentraciones, sin embargo, se ha visto que pueden crecer incluso cuando estos dos elementos están en condiciones limitantes; ya que esta especie tienen la capacidad de almacenar fósforo, lo cual le permite hasta cuatro divisiones celulares, produciendo un incremento sustancial en su biomasa (Downing *et al.*, 2005). Además presentan una estabilidad poblacional, que les permite prevalecer por más tiempo una vez establecidas (Chorus y Bartram, 1999). Las cianobacterias pueden crecer a temperaturas templadas y cálidas, lo cual explica porque en cuerpos de agua templados y boreales se presentan floraciones durante el verano, mientras que en un sistema tropical, como el caso de Aguamilpa, se pueden presentar floraciones tanto en el estiaje frío como en el cálido.

Por otro lado, *Microcystis* sp. forma colonias de células cocoides o filamentos, lo que le proporciona la capacidad de flotar y posicionarse en la parte más alta de la columna de agua, hasta hallar la intensidad luminosa favorable para su crecimiento. Esto significa que la presencia de esta especie no está relacionada solo al nivel de eutrofización del medio, por lo que puede encontrarse en aguas mesotróficas, eutróficas e hipertróficas, pero la cantidad de biomasa estará relacionada con la cantidad de nutrientes disponibles (Mur *et al.*, 1999).

Además de sus diferentes estrategias ecofisiológicas, su diversidad poblacional y dominancia en el sistema Aguamilpa, tiene un papel de importancia ecológica para las demás especies del fitoplancton. Sin embargo, y a pesar de su importancia, se ha hecho poco para evaluar su presencia en el sistema y evaluar el riesgo de que esta especie provoque floraciones y daños a la biota.

## 6. Presencia de *Microcystis* sp. en la presa de Aguamilpa

En el modelo se identificaron zonas muy extensas en donde es probable que se distribuya *Microcystis* sp. diferentes revisiones sobre el terreno apoyan en gran medida estos resultados. Tanto en la cuenca del río Huaynamota como en la del río Santiago, se predice una distribución continua durante el estiaje frío, mientras que durante el estiaje cálido la zona de distribución potencial se reduce a tres áreas dentro del sistema Aguamilpa. Estos resultados pueden deberse a dos factores: (1) una sobrepredicción del modelo, y (2) a que en ambos estiajes, el nicho ecológico de *Microcystis* sp. es todo el sistema Aguamilpa.

Estas situaciones son posibles y como ya se mencionó anteriormente, la sobrepredicción (es decir, error de omisión) es común en modelos de nicho ecológico. Por otra parte, y aunque se hizo el esfuerzo por contar con los estudios de campo (colectas en más estaciones), todavía siguen siendo incompletos, por lo que varias estaciones aún pueden producir nuevos registros de esta especie. Este fenómeno podría ser la respuesta al hecho de que en la época de lluvias no se encontraran registros de esta especie.

## 7. Uso de suelo

*Microcystis* sp. es sensible a los cambios en la calidad de agua (Chorus, 2001). Por lo tanto, para mantener sus poblaciones bajo un esquema “normal” (es decir, sin producir toxinas), es importante tener en cuenta la calidad de agua. Sin embargo, las zonas con mayor probabilidad de presencia de la especie, como el río Santiago y la cuenca alta del río Huaynamota, han sufrido durante el siglo pasado, importantes transformaciones de la cubierta vegetal, utilizando el suelo para terrenos agrícolas, para las actividades de pastoreo, urbanas e industriales (Mercado-Silva *et al.*, 2002).

Estos usos de la tierra modifican directamente la calidad de agua e incrementan los nutrientes a través de la contaminación, la eutrofización (por la entrada de fertilizantes), y la erosión del suelo. De acuerdo con los análisis, la mayoría de las áreas en donde habita *Microcystis* sp. son zonas continuas dentro del cuerpo de agua donde se mantienen las poblaciones de esta especie (Figuras X.2 y X.3).



Vegetación natural e inducida en las márgenes del río Santiago.

Por el contrario, las áreas en donde el modelo predice una mayor probabilidad en la presencia de la especie han sido transformadas drásticamente por la actividad humana. En estas áreas *Microcystis* sp. sobrevive principalmente, donde las tasas de renovación de agua son altas y la contaminación y otros factores de perturbación se amortiguan. El uso de suelo, en torno a la transformación de los cuerpos de agua con certeza han afectado directa o indirectamente a la biota acuática, probablemente incluso causando que otras especies de fitoplancton sean eliminadas del cuerpo de agua en Aguamilpa.

Por último, con estos análisis se argumenta que el nitrógeno y el fósforo son los elementos limitantes para el crecimiento de las cianobacterias, en especial para *Microcystis* sp. en ambientes acuáticos tropicales, (Henry *et al.*, 1985; Dávalos *et al.*, 1989). Con esto, se tiene información de que en los cuerpos de agua dulce ubicados

en zonas tropicales son ambos nutrientes los que en gran medida determinan la distribución de las cianobacterias, y no solo el nitrógeno como se pensaba por algunos autores (Phillips *et al.*, 1993).

## 8. Conclusiones

El modelo de nicho ecológico demostró ser una metodología confiable para la predicción de la distribución potencial de *Microcystis* sp. en el cuerpo de agua de la presa de Aguamilpa. El estudio se caracterizó por presentar áreas aisladas de mayor probabilidad de presencia de esta especie durante el estiaje cálido, mientras que en el estiaje frío, *Microcystis* sp. se puede encontrar en casi todo el sistema Aguamilpa.

Se sugiere que la presencia de esta especie se encuentra asociada al uso de suelo y vegetación y a los procesos tróficos derivados de las actividades antropogénicas que se llevan a cabo en la cuenca del sistema. Por ejemplo, en la cuenca alta del río Huaynamota principalmente los cambios en el uso de suelo en favor de la agricultura y la ganadería, y por el río Santiago las descargas urbanas, agrícolas e industriales. Por otro lado, el estudio documenta que existe una dinámica entre los nutrientes (fósforo y nitrógeno) que en gran medida determina la distribución de *Microcystis* sp.

Esta metodología se recomienda para aplicarse tanto en este tipo de sistemas como en ecosistemas lacustres y fluviales, para ayudar a identificar las zonas potenciales de distribución de *Microcystis* sp. y con esto localizar a lo largo de la cuenca las áreas geográficas donde se recomiende realizar acciones de restauración y conservación, principalmente del control en el uso de suelo y vegetación, y que tales esfuerzos puedan orientarse en una estrecha coordinación con las poblaciones locales, autoridades y la academia. ☀

## Referencias

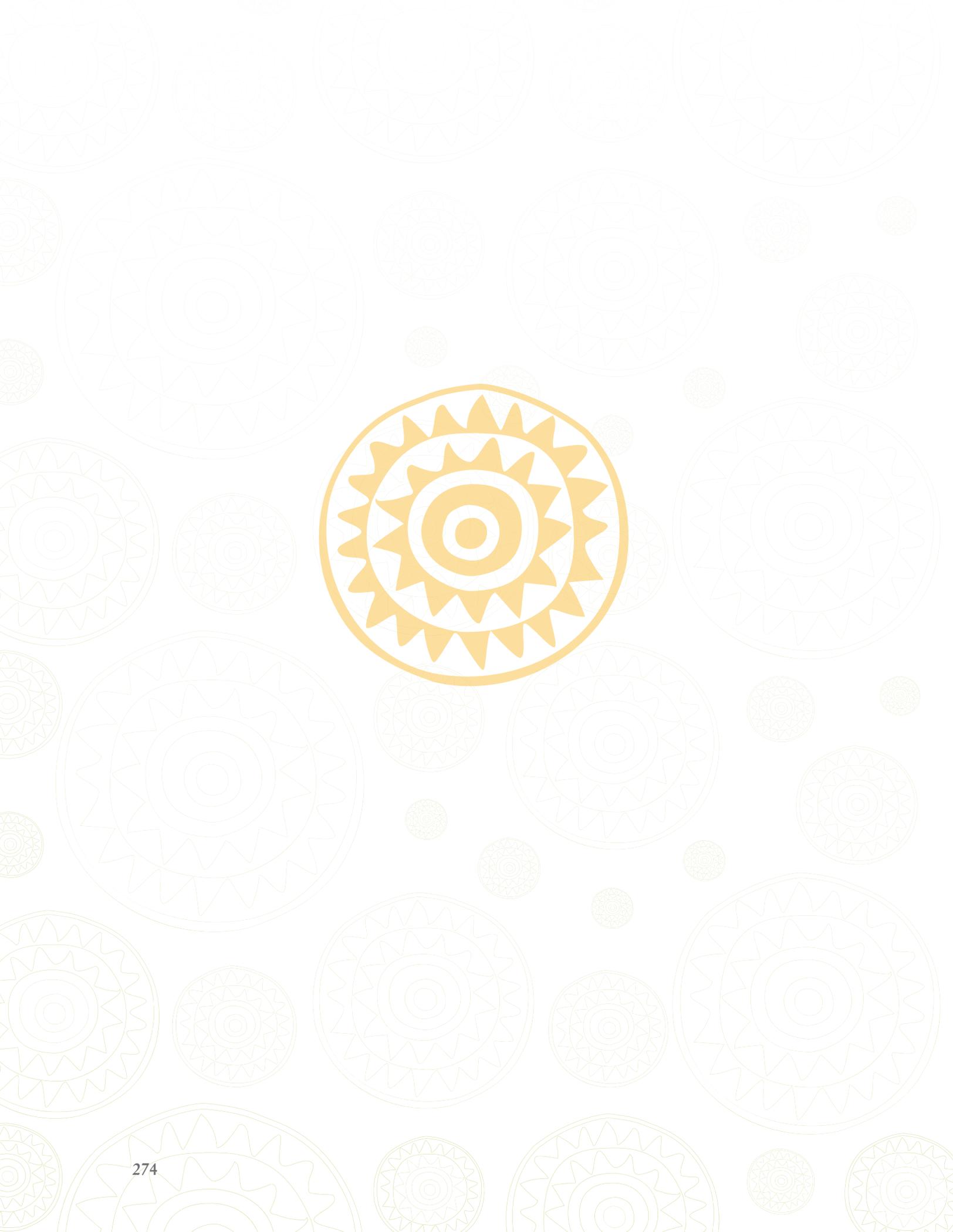
- Anderson, RP, Lew, D, Peterson, A (2003). Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*. 162: 211-232.
- Anderson, RP, Peterson, AT, Gómez-Laverde, M (2002). Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in south american pocket mice. *Oikos*. 98: 3-16.
- Anderson, RP, Martínez-Meyer, E (2004). Modeling species geographic distributions for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (*Heteromys*) of Ecuador. *Biological Conservation*. 116: 167-176.
- Benitez-Gutiérrez, A (2010). Detección de cianobacterias toxigénicas pertenecientes al género *Microcystis* mediante marcadores moleculares y ensayos biológicos. Tesis de Maestría. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. IPN.
- Bernal-Brooks, F, Dávalos-Lind, L, Lind, OT (2003). Seasonal and spatial variations in algal growth potential and growth-limiting nutrients in a shallow endorheic lake: Lake Pátzcuaro (México). *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 8: 83-93.
- Beyruth, Z (1993). Fitoplancton em lagos do Parque Ecológico do Tiete, São Paulo, 1986-1987. Estudo para rehabilitação. *Dae*, 170: 5-10.
- Cood, GA, Bell SG, Kaya, K, Ward, C, Beattie, K, Metcalf, S (1999). Cyanobacterial toxins, exposure routes and human health, *European Journal of Phycology*. 34: 405-415.
- CONAGUA (2006). Modelo Digital de Elevación, Escala 1:250,000. Departamento de Sistemas de Información Geográfica del Agua. México.
- Chefauri, RM, Hortal J, Lobo, M (2005). Potential distribution modeling, niche characterization and conservation status assessment using GIS tools: a case study of Iberian Copris species. *Biological Conservation*. 122: 27-338.
- Chen, G, Peterson, AT (2002). Prioritization of areas in China for biodiversity conservation based on the distribution of endangered bird species. *Bird Conservation International*, 12: 197-209.
- Chorus, I (2001). Cyanotoxins. Occurrence Causes Consequences. Heidelberg New York. Germany. 357 p.
- Chorus, I, Bartram, J (1999). Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, Monitoring and management. Spon, London, United

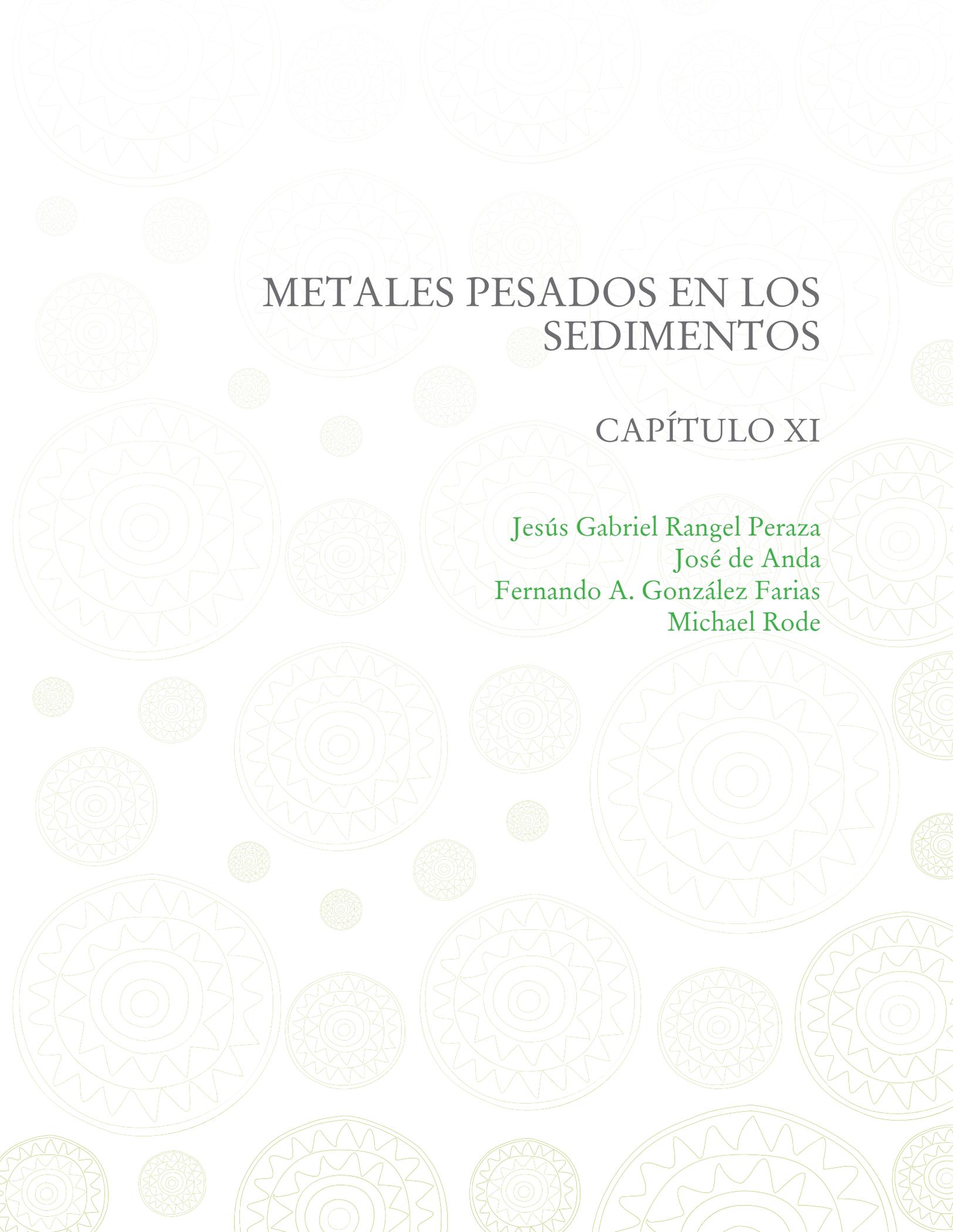
- Kingdom, p 1-14.
- Dávalos, L, Lin, OT, Doyle, R (1989). Evaluation of phytoplankton limiting factors in Lake Chapala, Mexico: turbidity and spatial and temporal variations in algal assay response. *Lake Reservoir Management*. 5: 99-104.
- Delaney, J (1999). *Geographical information systems an introduction*. Oxford. University press. 194 p.
- Downing, TG, Meyer, C, Gehringer, M, Van de Venter, M (2005). Microcystin content of *Microcystis aeruginosa* is modulated by nitrogen uptake rate relative to specific growth rate or carbon fixation rate. *Environ Toxicol*. 3: 257-262.
- Elith, J (2006). Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography*. 29: 129-151.
- Fredrickson, AG, Stephanopoulos, G (1981). Microbial competition. *Science*. 213: 972-979.
- Ferrier, S (2002). Mapping spatial pattern in biodiversity for regional conservation planning: where to from here?. *Systematic Biology*. 51: 331-363.
- García, E (1973). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. México. 246 p.
- González, EJ, Ortas, M (1998). Efectos del enriquecimiento con N y P sobre la comunidad del fitoplancton en microcosmos de un embalse tropical (La Mariposa, Venezuela). *Rev. Biol. Trop.* 46: 27-34.
- Guisan, A, Thullier, W (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*. 8: 993-1009.
- Henry, R, Hino, K, Tundisi, J, Ribeiro, J (1985). Responses of phytoplankton in lake Jacaretinga to enrichment with nitrogen and phosphorus in concentrations similar to those of the River Solimoes (Amazon, Brazil). *Arch. Hydrobiol*. 103: 453-477.
- Ibarra-Montoya, J, Rangel-Peraza, G, González-Farías, F, De Anda, J, Zamudio-Resendiz, M, Martínez-Meyer, E, Macias-Cuellar, H (2010). Ecological niche model to predict the potential distribution of phytoplankton in the Aguamilpa Dam, Nayarit. México. *Ambiente e Agua- An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. 5: 65-78.
- Iguchi, K, Matsuura, K, McNyset, K, Peterson, A, Scachetti-Pereira, R, Powers, K, Vieglais, D, Wiley, E, Yodo, T (2004). Predicting invasions of North American basses in Japan using native range data and a genetic algorithm. *Transactions of the American Fisheries Society*. 133: 845-854.

- INEGI (2006a). Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Topográfica, 1:250 000, serie II. Aguascalientes, México.
- INEGI. (2006a). Conjunto Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas, 1:1 000 000, serie I. Aguascalientes, México.
- Lampert, E, Sommer, U (1997). Limnoecology. The ecology of lakes and streams. Oxford University Press, Oxford. 382 p.
- MAXENT. (2009). Disponible en <<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>>. Acceso en Noviembre.
- Mercado-Sila, N, Lyons D, Salgado, G, Medina, M (2002). Validation of a fish-based index of biotic integrity of streams and rivers of central Mexico. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 12: 179-191.
- Mez, K, Beattie, K, Cood, G, Hanselmann, K, Hauser, B, Naegeli, H, Preisig, H (1997). Identification of a microcystin in benthic cyanobacteria linked to cattle deaths on alpine pastures in Switzerland. *European Journal of Phycology*. 32: 111-117.
- McNyset, K (2005). Use of ecological niche modeling to predict distributions of freshwater fish species in Kansas. *Ecology of Freshwater Fish*, 14: 243-255.
- Mru, L, Gons, H, Liere, V (1978). Competition of the green alga *Scenedesmus* and the blue-green alga *Oscillatoria* in light limited environments. *FEMS Microbiol. Letters*. 1: 335-338.
- Mur, L, Skulberg, O, Utkilen, H (1999). Cyanobacteria in the environment, in Chorus, I., and Bartram, J. (Eds) *Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. Spon, London, United kingdom. pp. 14-40.
- Parolo, G, Rossi, G, Ferrarini A (2008). Toward improved species niche modelling: *Arnica montana* in the Alps as a case study. *Journal of Applied Ecology*. 45: 1410-1418.
- Pearce, J, Lindenmayer, D (1998). Bioclimatic analysis to enhance reintroduction biology of the endangered helmeted honeyeater (*Lichenostomus melanops cassidix*) in southeastern Australia. *Restoration Ecology*. 6: 238-243.
- Pearson, R, Thuiller, W, Araujo, M, Martinez-Meyer, E, Brotons L, McClean L, Miles, P, Segurado, T, Dawson, Lees C (2006). Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*.
- Phillips, E, Aldridge, F, Hansen, P (1993). Spatial and temporal variability of trophic state parameters in a shallow subtropical lake (Lake Okeechobee, Florida, USA). *Arch. Hydrobiol.*, 128: 437-458.

- Phillips, S, Anderson, R, Schapire, R (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231-259.
- Phillips, S, Dudik, M (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31: 161-175.
- Peterson, A (2001). Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *Condor*. 103: 599-605.
- Peterson, A, Ball G, Cohoon, K (2002a). Predicting distributions of Mexican birds using ecological niche modeling methods. *Ibis*. 144: 27-32.
- Peterson, A, Ortega-Huerta, M, Bartley, J, Sánchez-Cordero, V, Soberon, J, Buddemeier, W, Stockwell, D (2002b). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*. 416: 626-629.
- Prosperi, C (2002). Composición del fitoplancton del Embalse San Roque. *Rev. Tec. Cienc*. 13: 8-10.
- Rangel-Peraza, J, De Anda, J, González-Farías, F, Erickson, D (2009). Statistical assessment of water quality seasonality in large tropical reservoirs. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 14: 315-323.
- Reynolds, C (1999). Cyanobacterial water blooms. In: Callow P. (Ed.) *Advances in Botanical Research*, 13, Academic Press, London., p.143.
- Roset, J, Aguayo, S, Muñoz, M (2001). Detección de Cianobacterias y sus Toxinas. Una Revisión. *Toxicol.*, 18: 65-71.
- Soberon, J, Peterson, A (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*. 2: 1-10.
- Shapiro, J (1973). Blue-green algae: Why they become dominant. *Science*. 179: 82-384.
- Schindler, D (1974). Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lakes management. *Rev. Science*. 184: 897-988.
- Sokal, R, Rohlf, J (1995). *The principles and practice of statistics in biological research*. State University of New York at stony Brook. 887 p.
- Walsby, A (1997). Mechanisms of buoyancy regulation by planktonic cyanobacteria with gas vesicles. In: Fay P and Van Baalen, C. (Eds.) *The Cyanobacteria*. Elsevier. Amsterdam., 414 p.
- Weley, E, McNyset, M, Peterson, A, Robins, C, Stewart, M (2003). Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm. *Oceanography*. 16: 120-127.
- Zambrano, L, Martinez-Meyer, E, Menezes, N, Peterson, A (2006). Invasive potential of common carp (*Cyprinus carpio*) and Nile tilapia (*Oreochromis*

- niloticus*) in American freshwater systems. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 63: 1903-1910.
- Zambrano, L, Perrow, M, Aguirre-Hidalgo, V, Macias-García, C (1999). Impact of introduced carp (*Cyprinus carpio*) in subtropical shallow ponds in central Mexico. Journal of Aquatic stress Ecosystems and Recovery. 6: 281-288.
- Zamudio, R, González-Farías, FA (2009). Informe de Fitoplancton del embalse de Aguamilpa. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C. (CIATEJ).





# METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS

## CAPÍTULO XI

Jesús Gabriel Rangel Peraza  
José de Anda  
Fernando A. González Farías  
Michael Rode



## 1. Introducción

Los sedimentos que se depositan en el fondo de un cuerpo de agua son principalmente arena, arcilla, limo y partículas orgánicas, éstos provienen de la erosión del suelo y de la descomposición de plantas y animales; el viento, la lluvia y las actividades antropogénicas pueden transportar estas partículas hasta los ríos, lagos y arroyos.



Los sedimentos son considerados componentes esenciales en el ambiente, ya que proveen refugio y sustrato a muchos organismos y en él se desarrollan procesos, bióticos y abióticos, que inciden sobre los ciclos biogeoquímicos. De la misma forma, sirven como depósito para una gran cantidad de contaminantes; hoy en día se reconoce que los sedimentos absorben productos químicos persistentes y tóxicos en niveles más altos que la concentración presente en la columna de agua (Arias-Almeida y Ramírez-Restrepo, 2009). En muchas ocasiones cuando estos contaminantes se encuentran en un cuerpo de agua, son absorbidos a la materia orgánica del material suspendido, y en función de la morfología del cuerpo de agua y de sus características hidrológicas, las partículas suspendidas con contaminantes asociados pueden depositarse y pasar a formar parte de los sedimentos (Saeedi *et al.*, 2011).

En el caso particular de los metales pesados, el cambio en las condiciones de óxido-reducción del medio, provocado por el proceso de mineralización, puede generar la desorción de los metales pesados de las partículas sedimentarias y transferirlos a la columna de agua. De esta manera, los metales pesados pueden incrementar las concentraciones presentes en la columna de agua y representar un riesgo para la biota si son liberados o se encuentran disponibles para los organismos bentónicos (Ponce *et al.*, 2000). La biodisponibilidad de metales en los sedimentos tiene una acción directa sobre algunas especies acuáticas, muchas de las cuales acumulan altas concentraciones que pueden generar efectos crónicos en sus poblaciones (Wu y Yang, 2010). Por esta razón, estos contaminantes se encuentran entre los más frecuentemente monitoreados, por lo que se han establecido técnicas inequívocas para su extracción y su cuantificación.

Algunos esfuerzos han sido llevados a cabo para caracterizar el comportamiento y la distribución de los metales pesados en sedimentos (Guo *et al.*, 2010; Greenberg *et al.*, 2008). El tema de contaminación de sedimentos en cuerpos de agua tropicales debido a la presencia de metales pesados ha recibido la atención de muchos científicos. Hoy en día muchos trabajos se han enfocado regiones donde es evidente el impacto del sector industrial de México, como el río San Pedro en el estado de Aguascalientes (Guzmán-Colis *et al.*, 2011), el río Tecate en el estado de Baja California (Wakida *et al.*, 2008) y el río Coatzacoalcos en el estado de Veracruz (Rosales-Hoz y Carranza-Edwards, 1998).

En años recientes, se ha llevado a cabo un esfuerzo importante para caracterizar el actual estado ecológico y fisicoquímico del río Santiago (Rangel-Peraza *et al.*, 2009; Ibarra-Montoya *et al.*, 2010). Algunos estudios sobre la presencia de metales pesados en el sedimento y peces de la presa de Aguamilpa han sido llevados a cabo por Zambrano-Cárdenas *et al.* (2005) y Aranguré-Zúñiga *et al.* (2005), sin embargo, estas investigaciones no fueron divulgadas y sus resultados se mantuvieron a nivel de reporte técnico. Producto de las investigaciones anteriormente citadas existen evidencias de que en la zona de la presa de Aguamilpa, el río Santiago es un depósito para nutrientes y metales pesados.

En este sentido, el presente trabajo discute la distribución espacial y temporal de Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Ni, Pb y Zn en los sedimentos superficiales de la presa de Aguamilpa. El estudio se ha llevado a cabo en 10 sitios de monitoreo en el río Santiago como en el río Huaynamota, sistemas que conforman este importante embalse.

## 2. Materiales y métodos

### Área de estudio

La presa de Aguamilpa se localiza en la región central del estado de Nayarit, México, y comprende parte de los municipios del Nayar, La Yesca, Santa María del Oro y Tepic. Está localizada entre los meridianos 104° 25' y 104° 46' de longitud oeste y los paralelos 21° 23' y 21° 53' de latitud norte (Figura 1). La cortina de la presa, con una altura de 187 m, es la segunda más alta del mundo en su tipo,



Resto de las copas de los árboles que quedaron sumergidos durante la formación del embalse.

enrocamiento con cara de concreto (Mendes, 2005). Los aportes principales de agua al embalse provienen de los ríos Santiago y Huaynamota. El embalse tiene una longitud aproximada de 50 km sobre el curso del río Santiago y de 20 km a lo largo del río Huaynamota con una extensión de 109 km<sup>2</sup> y una capacidad de almacenamiento de 5,540 Mm<sup>3</sup>. Dada su capacidad, este embalse ocupa la quinta posición en relación a otras hidroeléctricas en México, después de La Angostura y Malpaso en Chiapas, Infiernillo en Michoacán y Temascal en Oaxaca (CONAGUA, 2010).

La presa de Aguamilpa se encuentra localizada en la parte suroeste de la Sierra Madre Occidental. Se estima que la cuenca hidrográfica del embalse, cuya extensión inicial fue de 73,834 km<sup>2</sup>, redujo significativamente su área de captación y por lo tanto el escurrimiento disminuyó casi a la mitad a partir del 2006, debido a la construcción y operación, aguas arriba del río Santiago, de la presa El Cajón, Nayarit. La cuenca está conformada por rocas volcánicas extrusivas (ignimbritas riodacíticas) del Mioceno, intrusionadas por diques de origen diverso (CFE, 1991). El suelo es de color ocre, constituido por limos, arcillas, fragmentos de roca y material vegetal distribuyéndose ampliamente en la zona en forma irregular con un espesor medio de tres metros.

## Muestreo y análisis

Se llevaron a cabo dos campañas de muestreo de sedimentos en la presa de Aguamilpa, en octubre de 2009 y en febrero de 2010. Muestras de sedimento superficial del litoral del embalse fueron recolectadas en octubre de 2009 en todas las estaciones de muestreo con una pala plástica, con excepción de las estaciones P8, S0 y H0 (Fig. XI.1) las que se muestrearon con una draga Van Veen colectando únicamente la fracción superior. En febrero de 2010 se muestreó únicamente en las estaciones S00, H0 y P8.

Las muestras fueron colocadas en bolsas de plástico y refrigeradas a 4 °C para su posterior análisis en el laboratorio. El sedimento fue secado a 50 °C, homogenizado y cribado, y se tomó, para análisis, únicamente el tamaño de partícula menor a 250  $\mu\text{m}$ , fracción constituida principalmente por limos y arcilla y que por consiguiente adsorbe la mayor concentración de metales pesados.

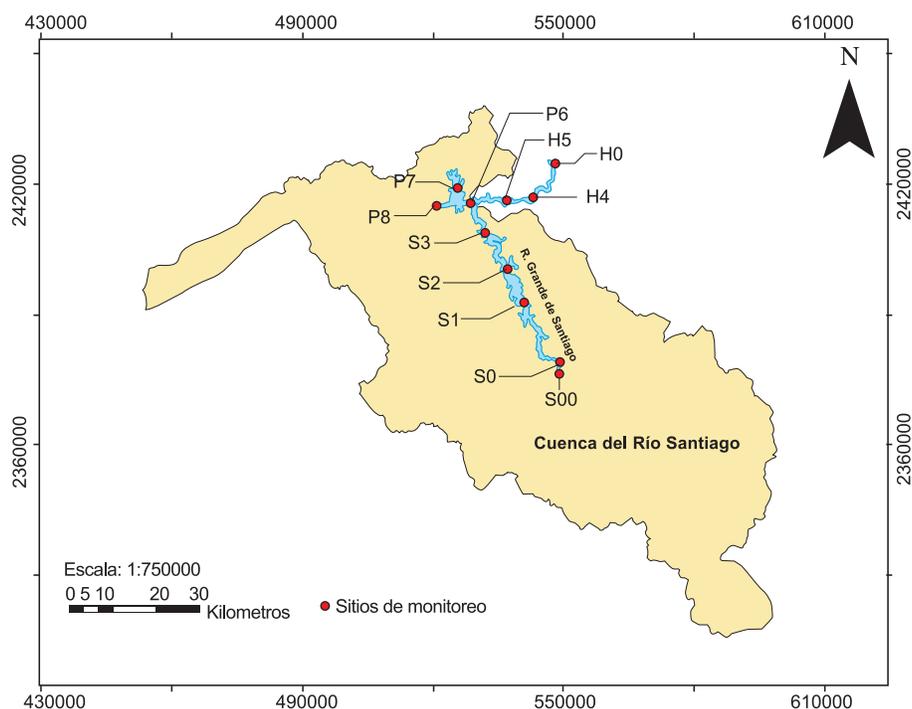


Figura XI.1. Localización geográfica de la presa de Aguamilpa y de los sitios de muestreo para los sedimentos.



Enrocamiento de la presa de Aguamilpa.

La extracción de los metales se realizó en alícuotas de 10 g, añadiendo una solución 3:1 de HNO<sub>3</sub>-HCl, para digerir las muestras durante 3 h a 120 °C. En cada una de las muestras se determinaron las concentraciones de Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Ni, Pb y Zn por medio de un espectrómetro de emisión por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) de acuerdo a lo establecido en la NOM-117-SSA1-1994. La posición geográfica de todos los sitios de muestreo se determinó con un GPS (GARMIN modelo GPS MAP 60C). En la Figura XI.1 se muestra la localización de los sitios de muestreo seleccionados.

A fin de facilitar el análisis de la información obtenida, el embalse fue dividido en cuatro bloques tomando como base el criterio de Chapman (1996), el cual establece que la morfología del embalse contribuye de manera significativa a la acumulación de los metales pesados en una presa. Por tal motivo, se reconoce a la zona lótica del río Santiago como bloque Santiago, y la conforman los sitios S00,

S0 y S1, mientras que la zona lítica del río Huaynamota fue identificada como bloque Huaynamota y comprende de los sitios H0 y H4; la zona de transición o donde confluyen ambos ríos se le llamó bloque Confluencia, constituida por los sitios S2, S3, H5 y P6, y finalmente la zona lítica de la presa fue nombrada como bloque Presa, integrada por los sitios P7 y P8.

TABLA XI.1. METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA DE AGUAMILPA PARA OCTUBRE DE 2009 Y FEBRERO DE 2010.												
OCTUBRE DE 2009												
Bloque	Sitio	Al mg kg <sup>-1</sup>	Ba mg kg <sup>-1</sup>	Cd mg kg <sup>-1</sup>	Cr mg kg <sup>-1</sup>	Cu mg kg <sup>-1</sup>	Fe mg kg <sup>-1</sup>	Hg mg kg <sup>-1</sup>	Mg mg kg <sup>-1</sup>	Ni mg kg <sup>-1</sup>	Pb mg kg <sup>-1</sup>	Zn mg kg <sup>-1</sup>
Santiago	S00	15900	136.0	0.27	4.27	3.89	11100	0.04	2910	3.94	11.70	33.30
	S0	14700	114.0	0.15	4.70	4.53	10100	0.04	3140	4.28	10.10	35.20
	S1	10100	27.4	0.17	7.79	60.80	14700	ND	3780	189.0	9.74	51.80
Huaynamota	H0	11000	111.0	0.12	6.45	2.46	12500	0.02	2230	3.11	7.06	33.70
	H4	7760	50.8	ND	0.42	1.17	10500	ND	1570	0.28	13.60	45.10
Confluencia	S2	21000	49.4	0.25	4.24	3.65	15100	0.02	7590	1.77	3.50	51.40
	S3	19600	85.50	ND	18.30	4.94	11300	ND	2120	7.96	3.01	14.80
	H5	22100	105.0	ND	0.22	1.73	15900	ND	4530	0.24	1.64	19.70
	P6	12100	34.5	ND	0.71	0.79	6590	ND	791	0.53	6.34	17.30
Presa	P7	27600	190.0	ND	5.22	7.50	14200	0.01	6810	7.69	ND	24.20
	P8	12600	48.0	ND	3.37	2.42	NR	0.01	1320	2.52	3.25	17.00
DE FEBRERO DE 2010												
Bloque	Sitio	Al mg kg <sup>-1</sup>	Ba mg kg <sup>-1</sup>	Cd mg kg <sup>-1</sup>	Cr mg kg <sup>-1</sup>	Cu mg kg <sup>-1</sup>	Fe mg kg <sup>-1</sup>	Hg mg kg <sup>-1</sup>	Mg mg kg <sup>-1</sup>	Ni mg kg <sup>-1</sup>	Pb mg kg <sup>-1</sup>	Zn mg kg <sup>-1</sup>
Santiago	S00	14500	90.1	0.13	4.92	6.01	9080	NR	2530	3.75	10.70	37.70
Huaynamota	H0	8970	15.9	0.02	10.20	0.85	12100	NR	8.05	2.57	4.01	25.60
Presa	P8	8010	64.2	ND	2.17	1.21	4740	NR	1200	1.61	4.64	15.70

ND. Por debajo del límite de detección. NR. Determinación no realizada.

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial a fin de conocer si existen diferencias entre las concentraciones medidas por cada bloque y en cada época de estudio. Los análisis estadísticos fueron realizados con el paquete estadístico Statgraphics Plus 7.1 (Statgraphics, 1994).



Vista del embalse de Aguamilpa.

### *3. Resultados y discusión*

La Tabla XI.1 muestra las concentraciones de metales pesados en los sedimentos de la presa de Aguamilpa, colectados en octubre de 2009 y febrero de 2010. De acuerdo con el análisis estadístico realizado, la concentración promedio de metales en los sedimentos de la presa de Aguamilpa mostró la secuencia siguiente: Al > Fe > Mg > Ba > Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > Cd > Hg.

El elemento que presentó las concentraciones más altas fue el Al, con una máxima de  $27,600 \text{ mg kg}^{-1}$ , valores que coinciden con lo señalado por Campy y Meybeck (1995), quienes sugieren que estas concentraciones son resultado de la composición química natural del material suspendido en los cuerpos de agua donde la cuenca es de origen basáltico.



Vertedero hidráulico de la presa

De la misma forma, Chapman (1996) reconoce altos niveles de Al, Fe, Mg, Mn en cuerpos de agua localizados en regiones tropicales con cuencas ubicadas en regiones áridas, los cuales presentan valores de hasta  $114,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $61,700 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $9,600 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $890 \text{ mg kg}^{-1}$  para cada uno de estos metales, respectivamente.

En el caso particular de México, existen referencias con respecto a la concentración de metales pesados en sedimentos del río San Pedro en Aguascalientes, donde Guzmán-Colis *et al.* (2011) reportan una concentración máxima de Al de  $45,000 \text{ mg kg}^{-1}$ , valor que es considerado inferior al criterio señalado por Feria *et al.* (2010) de  $71,000 \text{ mg kg}^{-1}$  para considerar a los sedimentos contaminados por este metal.

Tabla XI.2. Concentración típica de metales pesados en sedimentos de cuerpos de agua tropicales (Rosales-Hoz <i>et al.</i> , 2000; Wang <i>et al.</i> , 2011).							
METAL	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Concentración (mg kg <sup>-1</sup> )	600	0.3	120	50	80	40	110

Con base en los trabajos de Rosales-Hoz *et al.* (2000) y Wang *et al.* (2011) que reportan las concentraciones de metales pesados en algunos cuerpos de agua tropicales no contaminados (Tabla XI.2), se considera que los sedimentos de la presa de Aguamilpa no están contaminados por elementos traza, como el Ba, Cr, Cu, Ni y Zn, dado que la concentración promedio de éstos se encuentra por debajo de las concentraciones reportadas.

Se ha reconocido que existe contaminación antropogénica en las cuencas de los ríos que descargan en la presa de Aguamilpa, particularmente en el Santiago (Rangel-Peraza *et al.*, 2009; Ibarra-Montoya *et al.*, 2010); sin embargo, en el caso de los metales pesados, es factible que muchos de los contaminantes se acumulen en las presas aguas arriba.

Es complicado, entonces, determinar si alguno de estos ríos está sujeto a un impacto por actividades antropogénicas ya que, además de lo citado anteriormente, se encuentra implícita la naturaleza de los sedimentos presentes en el área de estudio, la cual contribuye de manera importante en la concentración de estos metales. Por lo tanto, la comparación entre la concentración de metales pesados para los sitios de monitoreo estudiados, permitirá argumentar si algún metal analizado puede tener un origen antropogénico.

Tabla XI.3. Valores F calculados mediante un ANOVA para la concentración de metales pesados en los diferentes sitios de muestreo de la presa.											
Elemento	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mg	Ni	Pb	Zn
Valor F	11.67*	0.73	2.06	0.43	0.96	17.88*	1.21	3.61	0.88	10.64*	1.78
<b>*Presenta diferencia significativa (p &lt; 0.05)</b>											

La Tabla XI.3 presenta los valores F calculados mediante un ANOVA para la concentración de metales pesados en los diferentes sitios de muestreo de la presa. De esta tabla, se identifica que únicamente el Al, Fe y Pb presentaron diferencias desde el punto de vista espacial. Para el resto de los metales analizados, la concentración media entre los sitios de muestreo es similar.

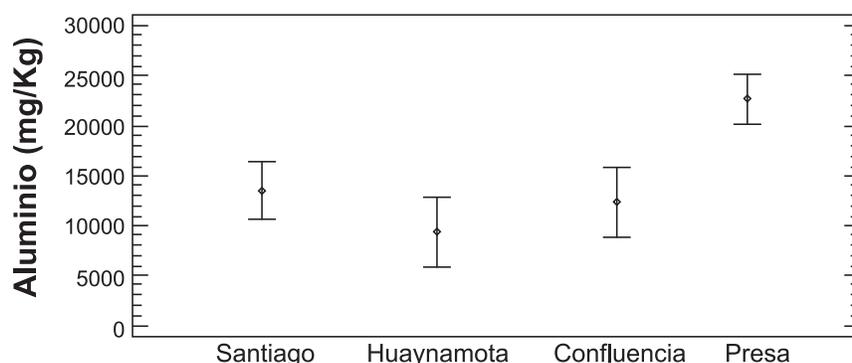


Figura XI.2. Prueba LSD de comparación de medias de la concentración de aluminio en sedimentos de la presa de Aguamilpa.

El análisis de la prueba de LSD realizado para el aluminio refleja una notable asociación entre los altos valores de concentraciones de metales y el tipo de sedimento, con una afinidad hacia el sedimento fino que se presenta en el bloque Presa (Figura XI.2). Dicha situación coincide con lo señalado por Abudalo *et al.* (2010) quienes sugieren que la presencia de altas concentraciones de Al en los sedimentos se debe a la presencia de aluminosilicatos en la arcilla de la cuenca. No existe diferencia significativa en la concentración de Al en los sedimentos de los bloques Santiago, Huaynamota y Confluencia.

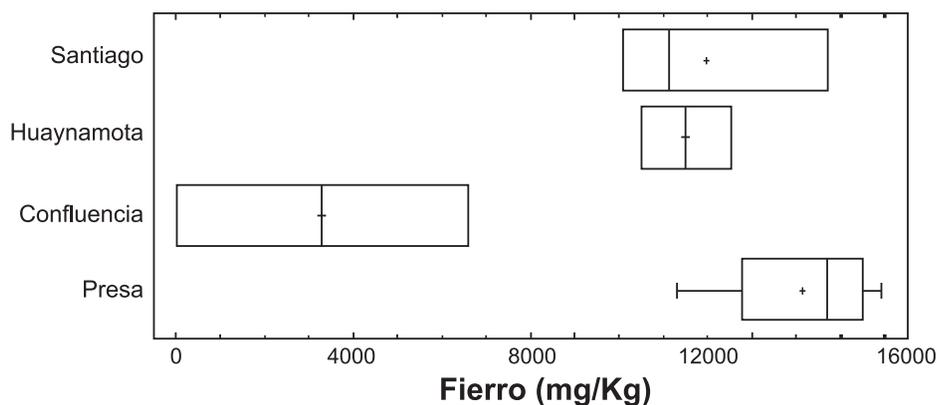


Figura XI.3. Gráfico de caja y bigotes para la distribución espacial de hierro en los sedimentos de la presa de Aguamilpa.

Los valores de hierro fueron bastantes altos por ser un macro elemento. Se encontraron variaciones significativas de las concentraciones de este elemento entre las estaciones estudiadas, principalmente en la confluencia de los ríos que forman parte de la presa. Los niveles de hierro determinados en este bloque varían desde  $6,590 \text{ mg kg}^{-1}$  hasta los  $15,900 \text{ mg kg}^{-1}$ .

**TABLA XI.4. LÍMITES MÁXIMOS SUGERIDOS PARA METALES PESADOS EN SEDIMENTOS Y CONCENTRACIONES MÁXIMAS DETECTADAS EN ESTE TRABAJO EN SEDIMENTOS DE LA PRESA DE AGUAMILPA.**

<b>Metal</b>	<b>Barceló <i>et al.</i> (2002)</b>	<b>Rivaro <i>et al.</i> (2011)</b>	<b>EPA (1999)</b>	<b>Este trabajo mg/kg</b>
Cd	1.5	1.2	6	0.27
Cu	45	34	50	60.80
Fe	45,500	-	25,000	15,900
Pb	50	46.7	60	13.60
Zn	105	150	2,000	51.80

El hierro se encuentra entre los metales esenciales para los seres vivos debido a que intervienen en una gran variedad de funciones biológicas y bioquímicas (García-Céspedes *et al.*, 2004), sin embargo, en altas concentraciones, puede ser tóxico. Aunque los valores observados para el hierro en esta investigación son un tanto superior a los reportados por Barceló *et al.* (2002), para los sedimentos de la presa José Antonio Alzate en el Estado de México ( $8,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ), las concentraciones observadas en la presa de Aguamilpa no sobrepasan los valores señalados por EPA (1999) para sedimentos contaminados (Tabla XI.4).

Con respecto al Pb, se observa claramente un decremento en la concentración de este elemento a lo largo de la presa de Aguamilpa, de la entrada de los ríos hacia la cortina. La concentración más alta de Pb se observó en la entrada del río Huaynamota hacia el embalse, con un valor de  $13.6 \text{ mg kg}^{-1}$ , disminuyendo conforme se tiende a aproximar a la zona léntica del embalse (Figura XI.4).

Dicha situación es similar a la reportada por Toufeek (2011) quien sugiere que este comportamiento, a lo largo de un embalse, suele estar asociado a una fuente antropogénica debido a la baja movilidad de este elemento en un medio acuoso.

La mayoría de los compuestos de plomo son insolubles en agua, por lo que su movilidad está limitada a su adsorción a materiales orgánicos, hierro hidratado y óxido de manganeso (Zarcinas y Rogers, 2002). En este sentido, este elemento tiende a acumularse cerca de la fuente de emisión y la caracterización de la misma puede inferirse en función a las concentraciones espaciales, tal y como se realizó en el presente estudio.





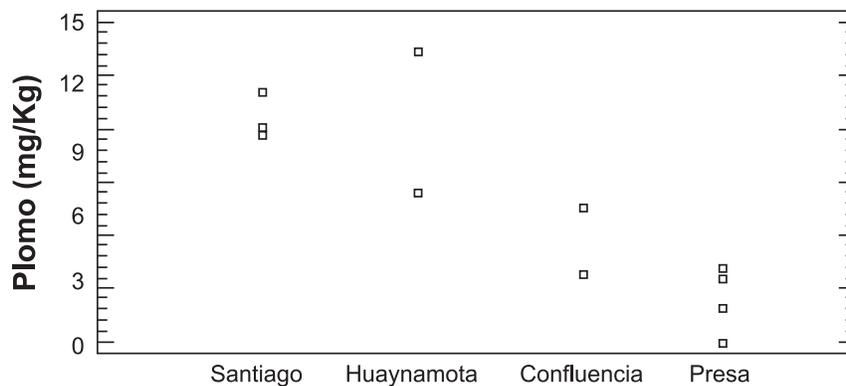


Figura XI.4. Comportamiento de la concentración de plomo en la presa de Aguamilpa.

Existen muchas discrepancias en cuanto a la concentración considerada como contaminante de plomo en sedimentos; concentraciones de 4 a 12 mg kg<sup>-1</sup> han sido señaladas como sedimentos no contaminados en la literatura internacional (Doruibe *et al.*, 2007), mientras que la EPA (1999) sugiere una concentración no mayor de 60 mg kg<sup>-1</sup> de plomo en sedimentos, valor que es superior a la concentración más alta registrada en la presa de Aguamilpa de 13.60 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla XI.4). El Cu fue el único metal cuya concentración en sedimentos excedió los niveles considerados como no contaminantes (Tabla XI.4), aunque fue únicamente en una de las muestras (Sitio S1, octubre del 2009).

**TABLA XI.5. VALORES F CALCULADOS MEDIANTE UN ANOVA PARA LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE MUESTREO REALIZADAS.**

Elemento	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Ni	Pb	Zn
Valor F	0.55	13.5	65.31*	3.1	3.02	0.25	3.96	0.6	4.07	8.23

\*Presenta diferencia significativa (p < 0.05)

La Tabla XI.5 muestra el análisis de varianza realizado para los sitios S00, H0 y P8. Este análisis demostró que únicamente el Cd registró una variación en la concentración media de los sedimentos de la presa durante los meses de octubre de 2009 y febrero de 2010. A pesar que se demostró estadísticamente que la concentración de cadmio disminuyó de lo registrado en octubre de 2009 con lo observado en febrero de 2010, desde el punto de vista práctico no se pudo demostrar una variación significativa de la concentración de este elemento durante el período de estudio, ya que el valor máximo registrado para este metal no rebasó



Erosión y formación de escalones en las laderas del embalse debidas a cambios del nivel del agua.

el límite establecido por la Directiva de la Comunidad Europea (Rivaro *et al.*, 2011) la cual establece una concentración máxima de Cd en sedimentos de  $1.2 \text{ mg kg}^{-1}$ , encontrándose además dentro de los niveles considerados normales en los cuerpos de agua tropicales.

Un caso aparte es el del mercurio, el cual puede estar disponible para los microorganismos que llevan a cabo el proceso de metilación, generando el metilmercurio que es tóxico para la fauna, o bien puede ser incorporado por los organismos bentónicos, tendiendo a acumularse en sus tejidos (Torres y Gutiérrez, 2001). El proceso de metilación se favorece cuando existen condiciones reductoras en los estratos inferiores de los cuerpos de agua, como es el caso de la presa de Aguamilpa (Rangel-Peraza *et al.*, 2009).

La concentración máxima de mercurio en los sedimentos de la presa fue de  $0.04 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona lótica del río Santiago. Hernández-Peñalver *et al.* (1999) reporta un intervalo de concentración de  $0.03$  a  $0.14 \text{ mg kg}^{-1}$  de mercurio en Cuba, mientras que Ruelas-Inzunza *et al.* (2011) encontraron un intervalo de concentración de mercurio en sedimentos que va desde los  $0.07$  hasta  $1.06 \text{ mg kg}^{-1}$  en una zona



Prismas basálticos en una ladera del embalse.

altamente influenciada por las actividades industriales. La normatividad vigente en México en materia de metales pesados señala una concentración máxima de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  para el mercurio, por lo que la presa de Aguamilpa no presenta ningún problema en este sentido.

#### 4. Conclusiones

La presencia de metales pesados en los sedimentos superficiales de la presa de Aguamilpa es el resultado de la naturaleza geoquímica del arrastre de suelo proveniente de la cuenca y de aportes antropogénicos vertidos en las cuencas de los afluentes. Elementos de la importancia como el Pb, Hg, Cr, Zn y Cd no excedieron los límites máximos permisibles en México, ni según lo recomendado a nivel internacional.

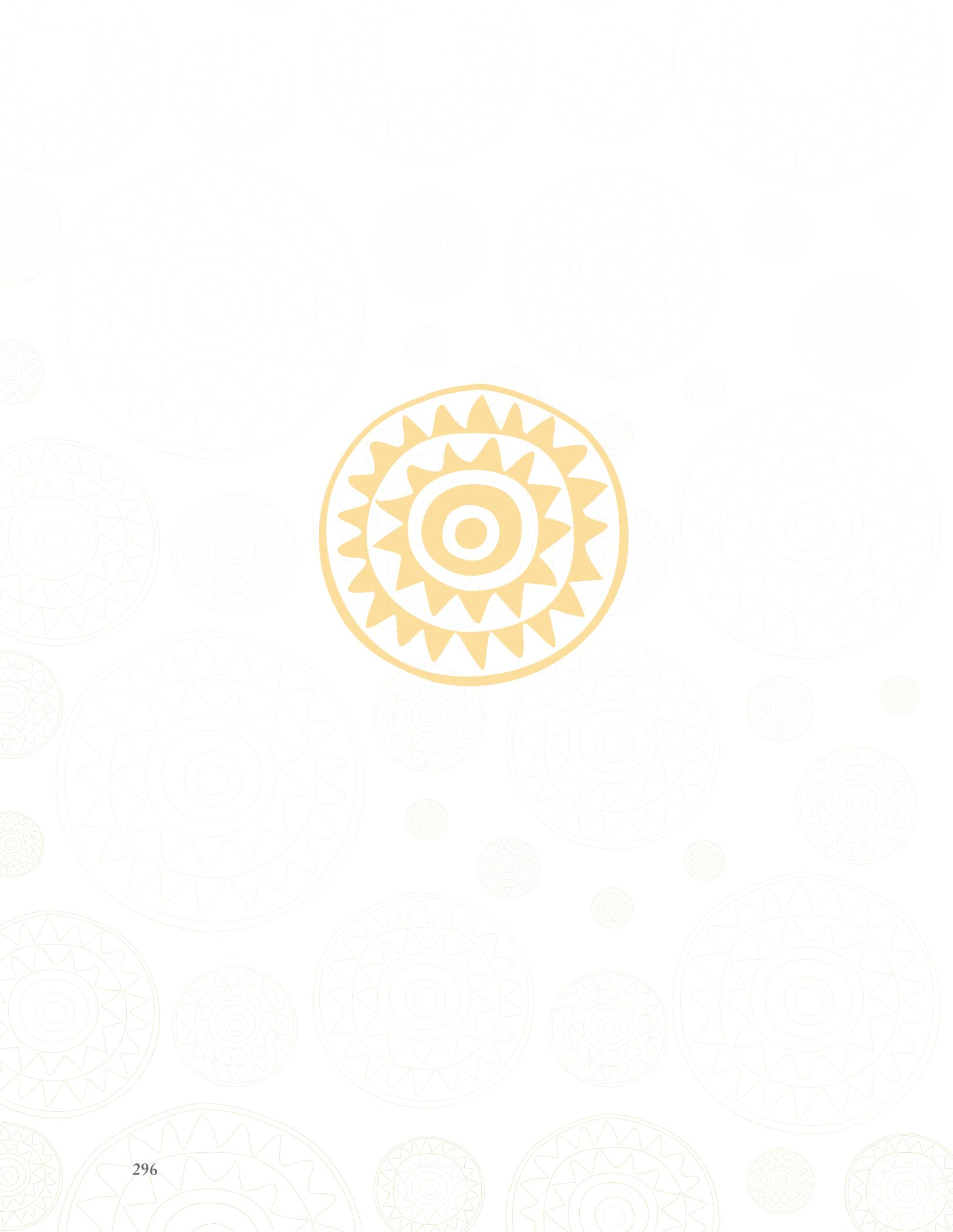
A pesar de no haber detectado concentraciones elevadas de metales en sedimentos en el presente estudio, no se debe excluir el riesgo que presentan las actuales condiciones reductoras en los estratos inferiores del embalse, de manera tal que en un futuro dichas condiciones permitan la liberación de estos elementos y contaminen la columna de agua.☀

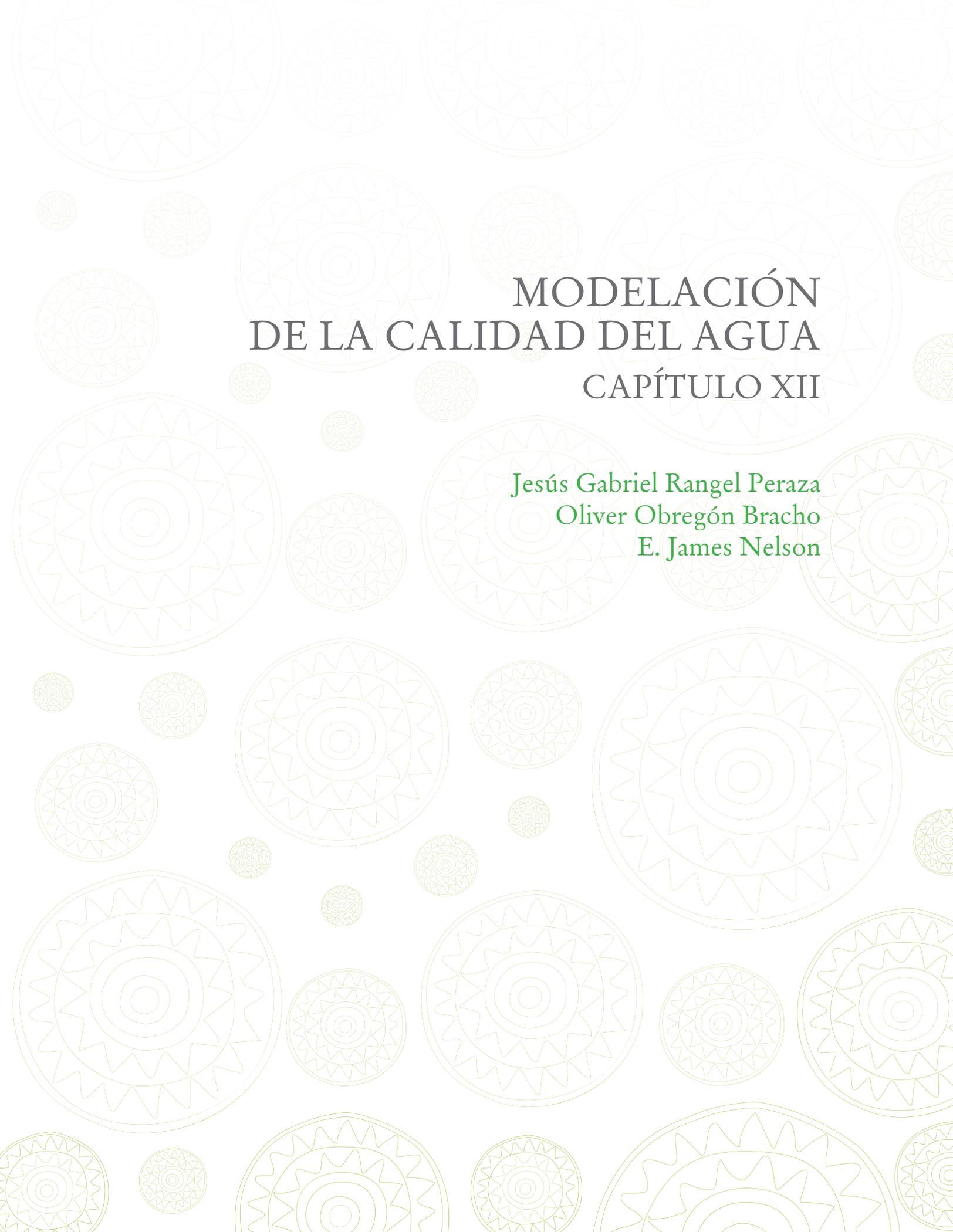
## Bibliografía

- Abudalo, R.A., J.N. Ryan, R.W. Harvey, D.W. Metge, L. Landkamer (2010). Influence of organic matter on the transport of *Cryptosporidium parvum* oocysts in a ferric oxyhydroxide-coated quartz sand saturated porous medium. *Water Research*. 44: 1104-1113.
- Arangur -Zu niga, FJ (2005). Contaminación por residuos de Plaguicidas Organoclorados en Sedimentos y Peces de la Presa Hidroeléctrica Aguamilpa, Nayarit, México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias por el Instituto Tecnológico de Tepic, México. 113 pp.
- Arias-Almeida, JC, Ramirez-Restrepo, JJ (2009). Caracterización preliminar de los sedimentos de un embalse tropical: represa La Fe (El Retiro, Antioquia, Colombia. *Limnetica*. 28(1): 65-78.
- Barceló ID, Bussy AL, Solís HE, Ávila, P, Carapia, L, Barrios-Sánchez LA (2002). Evaluación de los contaminantes met licos de los sedimentos de la presa J.A. Alzate en el Estado de México. Congreso Interamericano de Ingenier  Sanitaria y Ambiental. Cancún, México. Octubre de 2002. 8 p.
- Campy, M, Meybeck, M (1995). Les s diments lacustres. En: Pourriot R y M Meybeck [Eds.] *Limnologie Générale*. 185-226.
- Chapman DV (1996). *Water Quality Assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. E&FN Spon., World Health Organization, Cambridge, United Kingdom. 609 pp.
- Duruibe, JO, Ogwuegbu, MOC, Egwurugwu, JN (2007). Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *Int. J. Phys. Sci.* 2(5): 112-118.
- CFE (1991). Proyecto Hidroeléctrico Aguamilpa, Nayarit. México. Reporte de Comisión Federal de Electricidad. México. 36 pp.
- CONAGUA (2010). Estadísticas del agua en México. Edición 2010. Secretar  de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. 249 pp.
- EPA (1999). National Recommended Water Quality Criteria Correction Office of Water. EPA 822- Z-99-001, United States Environmental Protection Agency. United States. 25 pp.
- Feria, JJ, Marrugo, JL, Gonzalez, H (2010) Heavy metals in Sin  river, department of Córdoba, Colombia, South America. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. 55: 35-44.
- García-C spedes, J, Acu a-González, J, Vargas-Zamora, JA (2004). Metales traza en sedimentos costeros de Costa Rica. *Revista de Biolog  Tropical*. 52(2):

- 51-60.
- Greenberg, T, Shear, H, de Anda J, Ortiz-Jiménez, M (2008). Preliminary Analysis of Water Pollution in a Small Lake in Western Mexico. WIT Transactions on Ecology and the Environment. Water Pollution IX: 13-21.
- Guo, W, Liu, X, Liu, Z, Li, G (2010). Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin. *Procedia Environmental Sciences*. 2: 729-736.
- Guzmán-Colis, G, Ramírez-López, EM, Thalasso, F, Rodríguez-Narciso, S, Guerrero-Barrera, AL, Avelar-González, FJ (2011). Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río San Pedro en el estado de Zacatecas. *Universidad y Ciencia*. 27(1): 17-32.
- Hernández-Peñalver, MT, García-Melián, M, Cañas-Pérez, R, Sardiñas-Peña, O (1999). Fracciones biodisponibles de arsénico, plomo, cadmio y mercurio en sedimentos de corrientes superficiales seleccionadas. *Rev. Cubana Hig. Epidemiol.* 37(3): 132-135.
- Ibarra-Montoya, JL, Rangel-Peraza, G, González-Farias, FA, de Anda, J, Zamudio-Reséndiz, ME, Martínez-Meyer, E, Macias-Cuellar, H (2010). Modelo de nicho ecológico para predecir la distribución potencial de fitoplancton en la Presa Hidroeléctrica Aguamilpa, Nayarit. México. *Ambi- Agua*. 5(3): 60-75.
- Mendes, F (2005). Rapid construction of the El Cajon CFRD, Mexico. *International Journal on Hydropower and Dams*. 12(1): 67-71.
- NOM-117-SSA1-1994. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. Secretaría de Salud. Norma Oficial Mexicana.
- Ponce, R, Forja, JM, A. Gómez-Parra, A (2000). Influencia de la actividad antropogénica en la distribución vertical de Zn, Cd, Pb y Cu en agua intersticial y sedimentos marinos costeros (Bahía de Cádiz, SW de España). *Ciencias Marinas*. 26(3): 479-502.
- Rangel-Peraza, JG, de Anda, J, González-Farias, FA, Erickson, DE (2009) Statistical assessment of water quality seasonality in large tropical reservoirs. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. 14(4): 315-323.
- Rivaro, P, Çullaj, A, Frache, R, Lagomarsino, C, Massolo, S, De Mattia, MC, Ungaro, N(2011). Heavy metals distribution in suspended particulate matter and sediment collected from Vlora Bay (Albania): A methodological approach for metal pollution evaluation. *Journal of Coastal Research*. 58: 54-66.

- Rosales-Hoz, L, Carranza-Edwards, A (1998). Heavy metals in sediments from Coatzacoalcos River, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 60: 553-561.
- Rosales-Hoz, L, Carranza-Edwards, A, López-Hernández, M (2000). Heavy metals in sediments of a large, turbid tropical lake affected by anthropogenic discharges. *Environmental Geology.* 39 (3-4): 378-383.
- Ruelas-Inzunza, J, Páez-Osuna, F, Ruiz-Fernández, AC, Zamora-Arellano, N (2011). Health risk associated to dietary intake of mercury in selected coastal areas of Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 86: 180-188.
- Saeedi, M, Hosseinzadeh, M, Rajabzadeh, M (2011). Competitive heavy metals adsorption on natural bed sediments of Jajrood River, Iran. *Environ. Earth Sci.* 62: 519-527.
- Statgraphics Plus Version 7.1. (1994). Users guide reference. Statistical graphics, México D.F. pp: 63-73.
- Torres, R, Gutiérrez, F (2001). La metilación en sedimentos anaerobios, su importancia en el ciclo del mercurio y la salud humana. *Contactos.* 40: 21-32.
- Toufeek, MEF, (2011). Distribution of Cadmium and Lead in Aswan Reservoir and River Nile Water at Aswan. *World Applied Sciences Journal.* 13(2): 369-375.
- Wakida, FT, Lara-Ruiz, D, Temores-Peña, J, Rodríguez-Ventura, JG, Díaz C, García-Flores, E (2008). Heavy metals in sediments of the Tecate River, Mexico. *Environ. Geol.* 58: 637-642.
- Wang, Y, Yang, Z, Shen, Z, Tang, Z, Niu, J, Gao, F (2011). Assessment of heavy metals in sediments from a typical catchment of the Yangtze River, China. *Environ. Monit. Assess.* 172: 407-417.
- Wu, X-Y, Yang, YF (2010). Accumulation of heavy metals and total phosphorus in intensive aquatic farm sediments: comparison of tilapia *Oreochromis niloticus*, *Oreochromis aureus*, Asian seabass *Lateolabrax niloticus* and white shrimp *Litopenaeus vannamei* farms. *Aquaculture Research.* 41: 1377-1386.
- Zambrano-Cárdenas, RM (2005). Niveles de Contaminación por Metales Pesados en Sedimentos y Peces de la Presa Aguamilpa, Nayarit. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias por el Instituto Tecnológico de Tepic, México. 96 pp.
- Zarcinas, BA, Rogers SL (2002). Copper, Lead and Zinc Mobility and Bioavailability in a River Sediment Contaminated with Paint Stripping Residue. *Environmental Geochemistry and Health.* 24(3): 191-203.





MODELACIÓN  
DE LA CALIDAD DEL AGUA  
CAPÍTULO XII

Jesús Gabriel Rangel Peraza  
Oliver Obregón Bracho  
E. James Nelson



## 1. Introducción

Muchos países en el mundo se enfrentan al desafío que implica la creciente demanda de agua y la contaminación que están sufriendo las fuentes de agua; el aumento poblacional y su continua necesidad de desarrollo imponen progresivamente mayores exigencias a los sistemas hídricos (Watson y Davies, 2009).



Dicha situación se ha traducido en estudiar los sistemas hídricos desde una perspectiva amplia que permita un manejo consecuente sobre las cuencas hidrológicas, dando especial significado a los aspectos concernientes a la calidad del agua (Pennington *et al.*, 2003). Es indispensable, entonces, contar con herramientas que aporten información objetiva a fin de facilitar la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos.

Un modelo de calidad del agua permite interpretar, simular y predecir las respuestas de un cuerpo de agua ante distintas condiciones ambientales, a través de la resolución de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de las variables que reflejan cuantitativamente sus características físicas, químicas, biológicas (Chapra, 1996). Estos modelos permiten que las personas que están directamente relacionadas con la toma de decisiones visualicen el problema en términos objetivos, reduciendo las discrepancias en la discusión sobre la gestión ambiental del recurso hídrico (Ji, 2008).

El desarrollo de los modelos de calidad del agua en cuencas hidrológicas ha sido uno de los temas que ha atraído la atención de una gran cantidad de expertos de diferentes disciplinas dado que los ríos, lagos y presas con frecuencia constituyen la fuente de abastecimiento de agua potable para las zonas urbanas (McKinney *et al.*, 1999; Cai *et al.*, 2003). Por otra parte se sabe que el manejo no sustentable de las cuencas hidrológicas a escala local puede tener implicaciones importantes sobre el ciclo hidrológico a escala mundial en los próximos años (GLOWA, 2006).

Los esfuerzos hasta ahora realizados para comprender el comportamiento de los cuerpos de agua dulce superficiales en México, para situaciones particulares de manejo, han sido muy limitados, siendo la cuenca Lerma-Chapala la que ha captado la mayoría de las contribuciones en este campo en México (León y Escalante, 1993; Fedra, 1996; de Anda *et al.* 2001, 2004, 2007; Martínez-Austria y Hansen, 2004; Fall *et al.*, 2006).

Se reportan algunas investigaciones sobre la simulación de la calidad del agua en algunos proyectos hidráulicos en México, como la presa de Aguamilpa en Nayarit (de Victorica-Almeida, 1996) y la presa de Zimapán en Hidalgo (Palacio *et al.*, 1994, 2000; García *et al.*, 2001), y en algunas corrientes superficiales, como el río Atoyac en Guerrero (Puente-Luévano, 2001) y el río Blanco en Veracruz (Hernández-Mercado, 2006); sin embargo, los resultados de dichos estudios no fueron publicados y se conservan aún a nivel de reporte técnico.

Con el fin de evaluar los planes de manejo y control para estos sistemas, el presente capítulo propone la generación de un modelo de calidad de agua calibrado para la temperatura y el oxígeno disuelto en la presa de Aguamilpa, cuyas características de localización geográfica y condiciones de manejo permitirán ampliar los conocimientos que se tienen sobre los procesos biogeoquímicos que se presentan en un cuerpo de agua localizado en una zona tropical.

## 2. Metodología

### *Selección del modelo*

Existen muchos modelos disponibles que simulan la hidrodinámica y las interacciones de varios parámetros fisicoquímicos y biológicos en ríos, lagos, presas y otros cuerpos de agua (Martin y McCutcheon, 1999; Deas y Lowney, 2000; Reichert *et al.*, 2001; Nielsen, 2005; SMS, 2006; Obregón, 2008). Cada modelo de calidad del agua tiene sus características, limitaciones y requerimientos particulares. La selección del mismo depende principalmente de las características del cuerpo de agua en estudio y de los objetivos que se pretendan lograr.



### Actividad pesquera en la presa de Aguamilpa

La presa de Aguamilpa, como caso de estudio, presenta una forma alargada y estrecha, con un perfil batimétrico característico de las presas construidas para el aprovechamiento de los cauces de los ríos, y muestra una variación longitudinal y vertical en sus características fisicoquímicas y biológicas (Rangel-Peraza *et al.*, 2009a).

Dadas las características geomorfológicas del embalse Aguamilpa, se seleccionó el modelo CE-QUAL-W2 para simular la calidad del agua del embalse. CE-QUAL-W2 es uno de los modelos más conocidos y utilizados en la simulación de la calidad del agua de las presas. Permite la modelación bidimensional de los embalses estrechos, con lo que se puede simular longitudinal y verticalmente las características fisicoquímicas, biológicas y de calidad de agua bajo un régimen no estacionario (Cole y Wells, 2005).

## Desarrollo del modelo batimétrico

Previo a la construcción de la presa de Aguamilpa, la Comisión Federal de Electricidad llevó a cabo un estudio para conocer la batimetría del sistema; a partir de la información sobre los valores batimétricos reportados por Rangel-Peraza *et al.* (2009b) y de la información obtenida por parte del Instituto Nacional de Estadística y Geografía con relación a los modelos digitales de elevación (MDE's) (INEGI, 2006), se desarrolló el modelo batimétrico de la presa de Aguamilpa soportado en el software *Watershed Modeling System* (WMS, 2006).

El WMS se define como un ambiente gráfico integral de modelado para todas las fases de hidrología de la cuenca. WMS provee una colección variada de capacidades que incluye la delimitación de la cuenca en estudio, de sus características morfométricas, entre otras. De acuerdo con lo propuesto por Obregon (2008), los MDEs fueron convertidos en Redes Irregulares Trianguladas (TINs) y posteriormente en polígonos que permitieron definir las condiciones frontera y la capacidad de almacenamiento del embalse (Figura XII.1).

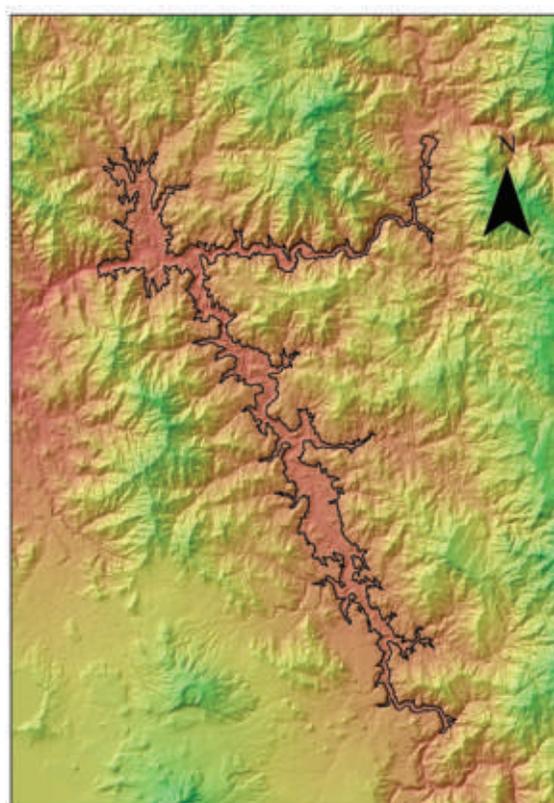


Figura XII.1 Delimitación de la presa de Aguamilpa en los MDEs.

Para propósitos del desarrollo del modelo, el trabajo se centró en desarrollar un modelo hidrodinámico bidimensional considerando la batimetría, el volumen de llenado de la presa, la velocidad del flujo de entrada de los ríos tributarios principales, el caudal de descarga, así como las velocidades y direcciones de viento. Debido a la irregularidad del embalse, éste se subdividió en tres ramas principales y se generaron celdas en cada uno de ellos las cuales se encuentran ligadas entre sí a través de condiciones que se definen en el modelo. La metodología utilizada



Aguas turbias en el embalse al inicio de las lluvias.

para el desarrollo del modelo batimétrico es similar en su aplicación para cualquier software que simule el comportamiento hidrodinámico de embalses (Kennedy, *et al.*, 2006).

### *Desarrollo del modelo de balance hídrico*

El balance hídrico de la presa de Aguamilpa se llevó a cabo de acuerdo a la metodología establecida en el capítulo IV durante el período de enero de 2007 a junio de 2009. Con los datos observados en las estaciones hidrométricas sobre el curso de los ríos Santiago y Huaynamota, e igualmente con los niveles diarios registrados en la presa de Aguamilpa, se llevó a cabo el proceso de calibración del modelo de balance hídrico. La calibración del modelo se refiere al ajuste de los parámetros del modelo de balance con los datos observados de flujo en los ríos tributarios de la presa de Aguamilpa. Este proceso se llevó a cabo directamente en el software CE-QUAL-W2. Una vez calibrado el modelo de balance hídrico fue posible simular el funcionamiento hidráulico del sistema.



Vista panorámica del río Santiago aguas abajo de la presa de Aguamilpa.

### *Desarrollo del modelo de calidad de agua*

Para el desarrollo del modelo, es necesario establecer la información sobre las características hidrometeorológicas y climáticas del área de estudio, así como la generación de las condiciones frontera de la presa de Aguamilpa con respecto a los parámetros a modelar.

Las siguientes condiciones iniciales fueron establecidas para el modelo de calidad del agua: 3 ríos tributarios, 103 segmentos longitudinales, 169 capas verticales, 64 m de profundidad del embalse, 210 m la elevación máxima de llenado del embalse y 180 msnm la elevación donde se extrae el agua para de generación de energía eléctrica.

La simulación del modelo fue establecida para el período del 1° de enero de 2007 hasta el 31 de julio de 2009. Estas fechas fueron convertidas a días Julianos (JDAYS) que es el formato requerido para el CEQUALW2. La elevación inicial de la superficie de agua el 1 de enero de 2007, fue de 210.2 m de acuerdo a la información obtenida por la CFE.

El archivo meteorológico del modelo Aguamilpa fue creado usando datos climatológicos históricos de la estación Aguamilpa localizada en las siguientes coordenadas geográficas: 21°50'33.8"N, 104°48'10.3"W; esta estación climatológica proporcionó datos por cada hora sobre la temperatura de aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y radiación solar durante el período de simulación. La temperatura de punto de rocío fue estimada a partir de la humedad relativa y de la temperatura del aire según la ecuación propuesta por Wanielista *et al.* (1997).

Las condiciones frontera de la temperatura y el oxígeno disuelto en la presa de Aguamilpa fueron estimadas utilizando los datos meteorológicos de las estaciones climatológicas Cerro Blanco y Bolaños, la primera ubicada dentro de la cuenca del río Santiago - Aguamilpa y la segunda en la cuenca del río Bolaños, y con ayuda de la ecuación descrita por Groeger y Bass (2005).

Con la finalidad de calibrar el modelo de calidad de agua, se realizaron bimestralmente seis campañas de monitoreo en ocho sitios ubicados a lo largo de la presa de Aguamilpa de acuerdo al protocolo establecido en el capítulo VII. En cada una de las estaciones al interior del embalse se realizaron muestreos a diferentes profundidades para la temperatura y el oxígeno disuelto con la ayuda de una sonda multiparamétrica (Sonda YSI 6600D).

Asímismo, se realizó una comparación entre los datos medidos en campo con los resultados de simulación del modelo con el objetivo de ajustar los resultados del modelo con los datos que se consideran como referencia.



Preparación de sonda multiparamétrica para toma de lecturas de datos físicoquímicos y microbiológicos *in situ* en el embalse de Aguamilpa.

### *3. Resultados*

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el modelo desarrollado, el cual comprende el modelo de balance de agua, el comportamiento hidrodinámico de la presa, la calibración del oxígeno disuelto y la simulación de dichas variables para un período de estudio posterior a la calibración. Asimismo se presenta un análisis para establecer una línea base en el desarrollo de modelo de calidad de agua en la presa de Aguamilpa para su potencial utilización en otras presas localizadas en la región.

#### *Modelo batimétrico de la presa de Aguamilpa*

Los datos de batimetría fueron el punto de partida para el modelo de CEQUAL-W2. El modelo batimétrico permitió definir las profundidades de toda la extensión de la presa y describe su forma y volumen. La generación y verificación de dicho modelo fue realizada exhaustivamente utilizando el programa Watershed Management System (WMS) desarrollado por el Laboratorio de Investigación en Modelos Ambientales (EMRL) en el departamento de Ingeniería del Civil y Ambiental de la Universidad de Brigham Young.

Los datos espaciales de los MDE's fueron leídos en WMS de manera similar a lo realizado en un formato para un Sistema de Información Geográfico y se definieron los límites de la presa con una altitud máxima de elevación de 235 msnm. Asimismo, la presa de Aguamilpa fue segmentada longitudinalmente cada 500 m y verticalmente cada metro de profundidad.

La curva de capacidad de almacenamiento creada fue comparada con la curva de capacidad de almacenamiento proporcionada por la CFE con el fin de calibrar el modelo batimétrico. La Figura XII.2 muestra el modelo batimétrico desarrollado para el río Santiago.

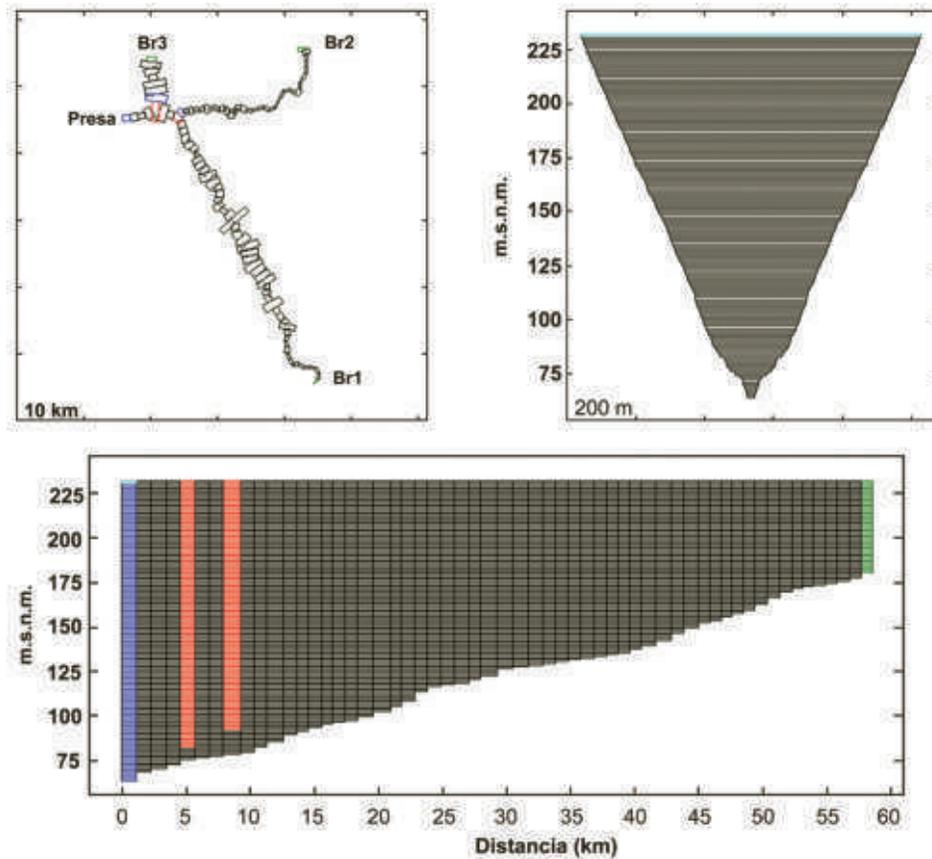


Figura XII.2 Segmentos de la presa de Aguamilpa y modelo batimétrico para el río Santiago.

### *Calibración del modelo de balance hídrico*

La calibración del modelo de balance hídrico se realizó mediante una comparación entre el volumen obtenido a partir del modelo de balance hídrico de la presa de Aguamilpa, con el volumen registrado por la CFE durante el período de enero del año 2007 a julio del año 2009, ajustando los flujos de entrada a fin de minimizar la diferencia observada.

La diferencia máxima entre el volumen real registrado con respecto al modelado fue de aproximadamente 1.5%, lo que refiere que la mayor parte de los flujos no medidos fueron por entradas de agua, a pesar de que algunos días presentaron un déficit en el balance, lo que representa una estimación errónea probablemente por salidas de agua no contabilizada por procesos de infiltración.

Se reconoce, además, que el grado de error en el modelo de balance pudo estar asociado a la forma en la cual fue estimado el volumen del embalse, el cual estuvo basado en el cambio en la elevación del nivel del agua en la presa. Por otro lado, los flujos del río Huaynamota y las aportaciones por la ensenada fueron estimados en función al porcentaje de contribución estimado por diferencia en el balance. La Figura XII.3 muestra la calibración del modelo de balance hídrico en la presa durante el período de estudio.

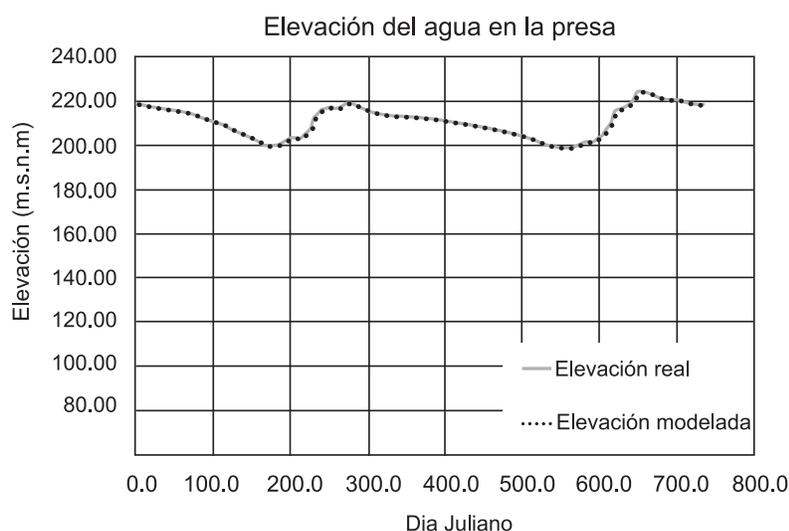


Figura XII.3 Calibración del modelo de balance hídrico para el período de enero de 2007 a julio del 2009.

### *Hidrodinámica de la presa*

Una vez que el balance hídrico fue completado y calibrado, se procedió a calibrar la temperatura modelada de la presa. El proceso de calibración de dicho parámetro permitió reconocer que el coeficiente de abrigo del viento (*wind sheltering coefficient*) fue el factor que mostró mayor efecto en el perfil hidrodinámico de la presa.

Los coeficientes de abrigo del viento mostraron un efecto significativo en el intercambio de calor en la superficie y en el proceso de evaporación de la presa. Dichos resultados coinciden con lo reportado por Cole and Wells (2005) y por la USBR (2009) donde se reconoce que la optimización de dichos coeficientes es un método comúnmente usado de calibración térmica en CEQUAL-W2.

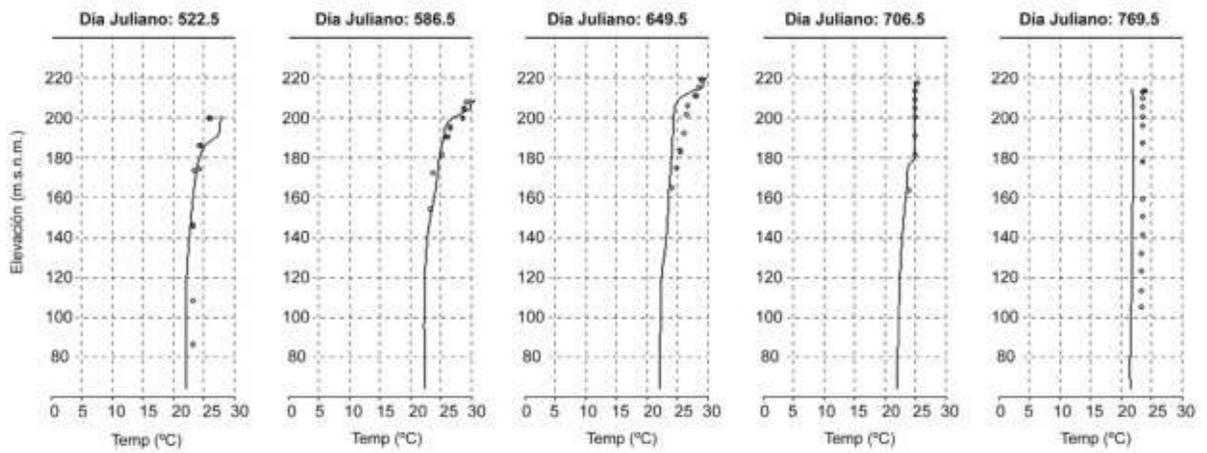


Figura XII.4 Calibración de la temperatura en la presa de Aguamilpa.

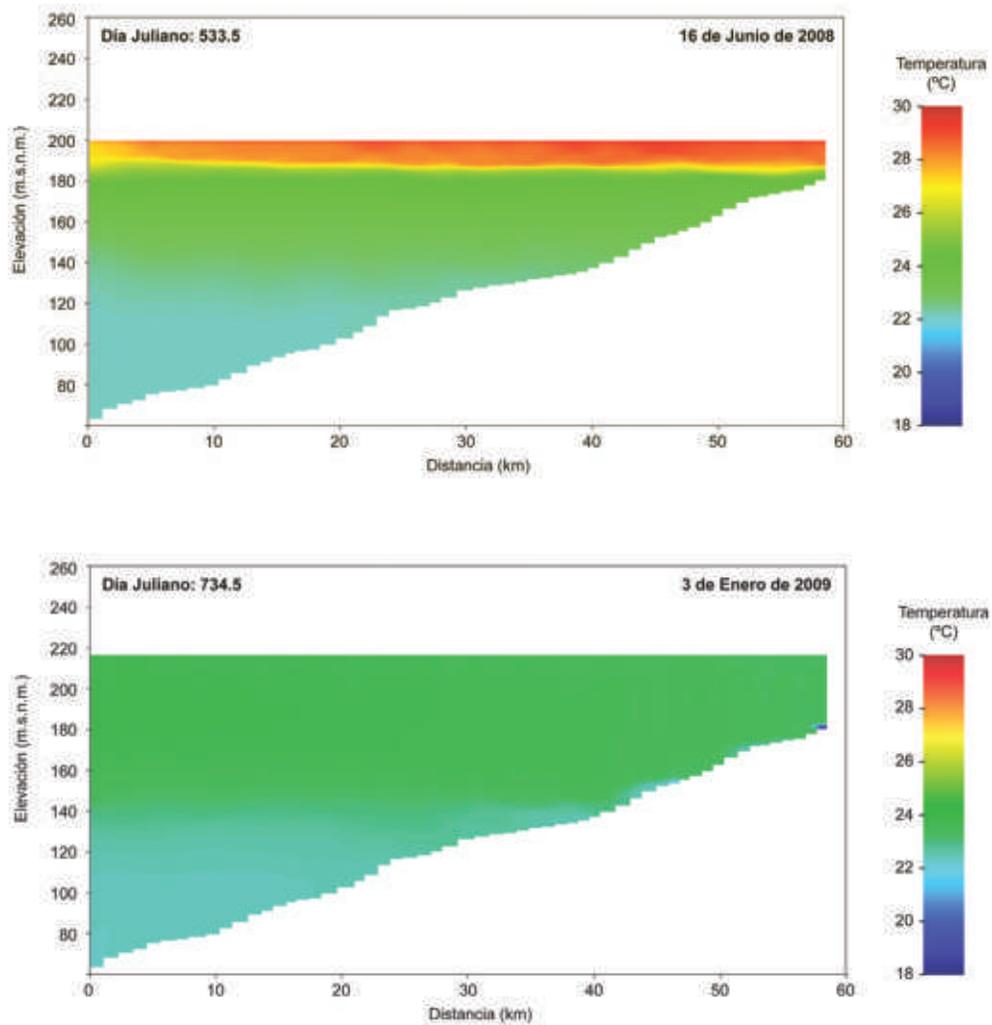


Figura XII.5 Simulación de la evolución temporal del perfil de temperatura en la presa de Aguamilpa.





Según Cole y Wells (2005), los valores utilizados para los coeficientes de abrigo del viento en las presas localizadas en terrenos accidentados con pendientes pronunciadas, como es el caso de la presa en estudio, se encuentran por arriba de 1.0. Basado en la experiencia del presente trabajo de investigación, el valor que mostró un mejor grado de ajuste a los datos obtenidos en campo para la temperatura de la presa de Aguamilpa fue de 1.45 (Figura XII.4).

La utilización del modelo desarrollado permite reconocer que el perfil hidrodinámico de la presa mostró un comportamiento estacional similar a lo reportado en otros cuerpos de agua que se encuentran localizados en regiones tropicales, registrando una estratificación térmica por debajo de los 60 m durante las épocas de estiaje cálido y de lluvias.

Además, la Figura XII.5 confirma el rompimiento de la termoclina durante la época de estiaje frío, situación que favoreció el mezclado en la columna de agua en la presa. El modelo hidrodinámico desarrollado permitió conocer los patrones de circulación, estratificación, mezcla, dispersión y las velocidades del agua en la presa de Aguamilpa. El análisis de la hidrodinámica de la presa establece las bases para posteriores estudios de calidad de agua, transporte de sedimentos y transporte de contaminantes.

## *Oxígeno disuelto*

La calibración del oxígeno disuelto fue un paso importante para comprobar que el modelo CEQUAL-W2 es útil en la descripción de las características fisicoquímicas de la presa de Aguamilpa. Dado que el oxígeno disuelto es más dinámico que la temperatura y responde rápidamente a los cambios repentinos en la hidrodinámica del embalse, la experiencia ha demostrado que este parámetro es un mejor indicador de la calibración del modelo (Cole, 2002).

La Figura XII.6 muestra la calibración del oxígeno disuelto en el modelo desarrollado para la presa de Aguamilpa. La diferencia observada en la concentración de oxígeno disuelto en la superficie del embalse puede estar asociada a la producción de oxígeno disuelto por organismos fitoplanctónicos. A pesar de esto, el comportamiento observado en el perfil de concentraciones del oxígeno disuelto fue muy similar a lo registrado durante las diferentes épocas del monitoreo.

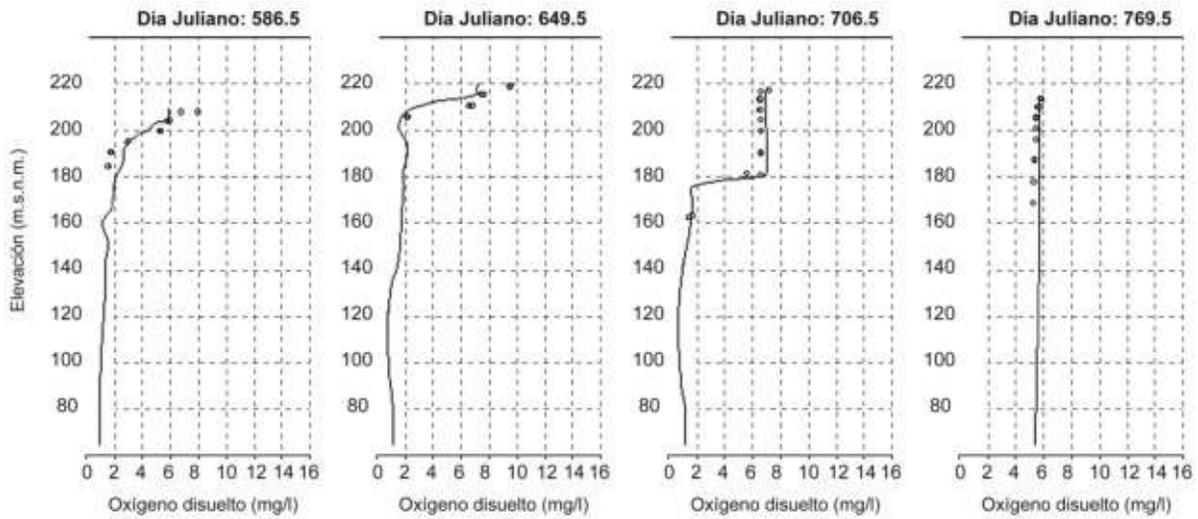


Figura XII.6 Calibración del oxígeno disuelto en el modelo de calidad de agua de la presa de Aguamilpa.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura XII.7, se establecieron tres zonas bien definidas en función a la profundidad de la presa: epilimnion, mesolimnion e hipolimnion. El epilimnion se ubicó en los primeros cinco metros de profundidad; en esta zona, el agua presenta una mayor temperatura, se encuentra bien mezclada y el transporte de masa y energía se realiza por mecanismos turbulentos. En esta región prevalecen concentraciones suficientes de oxígeno disuelto para sustentar la vida acuática. El mesolimnion se encuentra delimitado por la termoclina, misma que se extiende aproximadamente hasta los 20 m de profundidad. Esta región se caracteriza por reducir sustancialmente el transporte de masa y energía a la zona subyacente.

Por su parte, el hipolimnion se ubica justamente debajo de la termoclina y se caracteriza por presentar concentraciones menores de oxígeno disuelto conforme se avanza en la profundidad, demostrando con ello que los procesos de consumo de oxígeno predominan sobre los de producción.

Por otro lado, la tendencia hacia las condiciones anóxicas en los estratos profundos de la presa modifican las condiciones de oxidoreducción, situación que promueve la reducción química y disolución de compuestos indeseables en el agua. Se registra una temperatura más baja en esta zona y ésta es prácticamente constante durante todo el período de estudio.

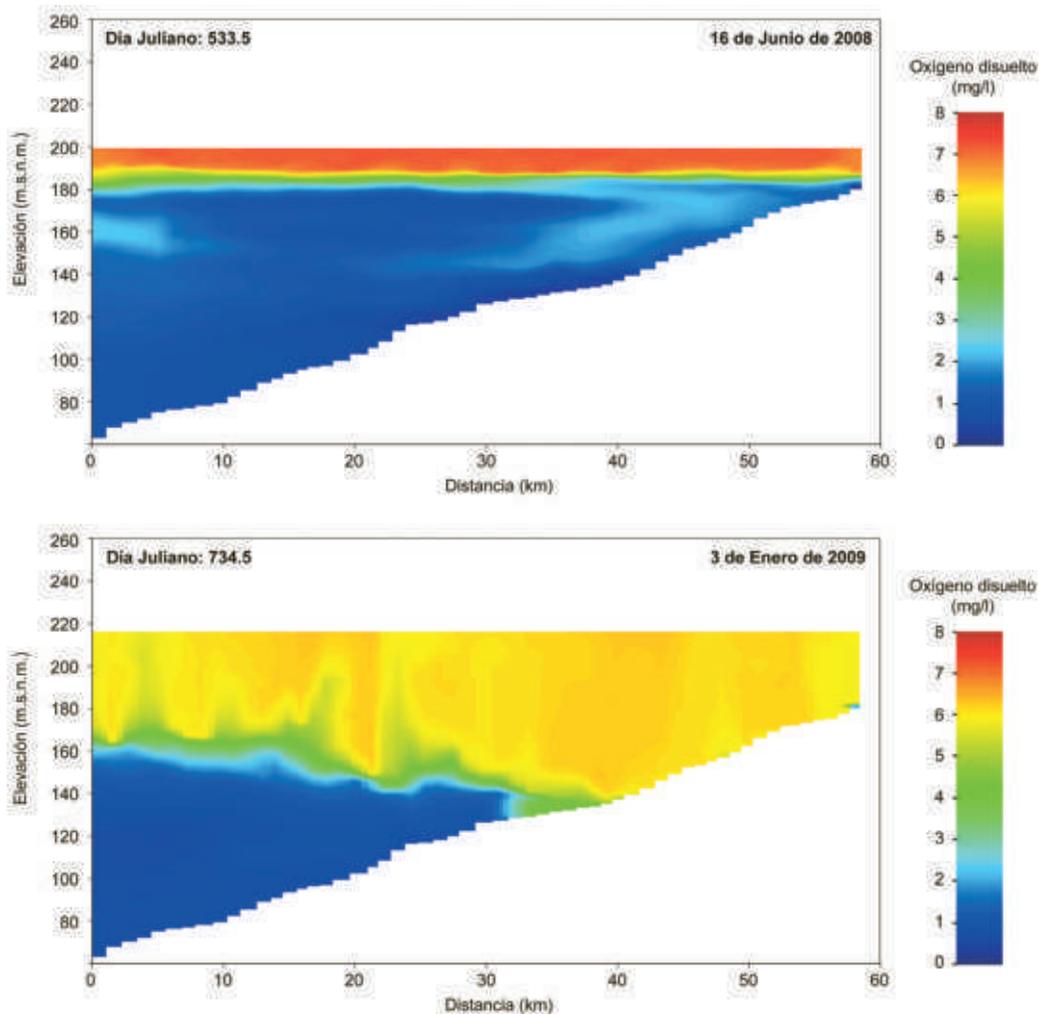


Figura XII.7 Simulación de las condiciones de oxígeno disuelto en la presa de Aguamilpa.

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos por el modelo CEQUAL-W2 representaron, de una manera confiable, el comportamiento de los dos componentes analizados en la presa de Aguamilpa; el modelo es de fácil manejo y se puede adaptar a las condiciones y características de diversas presas localizadas en la región donde se localiza el embalse, donde existen muy pocos estudios; asimismo, es posible modificar las ecuaciones que describen la cinética de otros parámetros de calidad del agua. Su utilización para otras variables permitirá conocer la dinámica de los procesos fisicoquímicos y biológicos, coadyuvando con la formulación de criterios para la protección y manejo del recurso hídrico. ⚙️

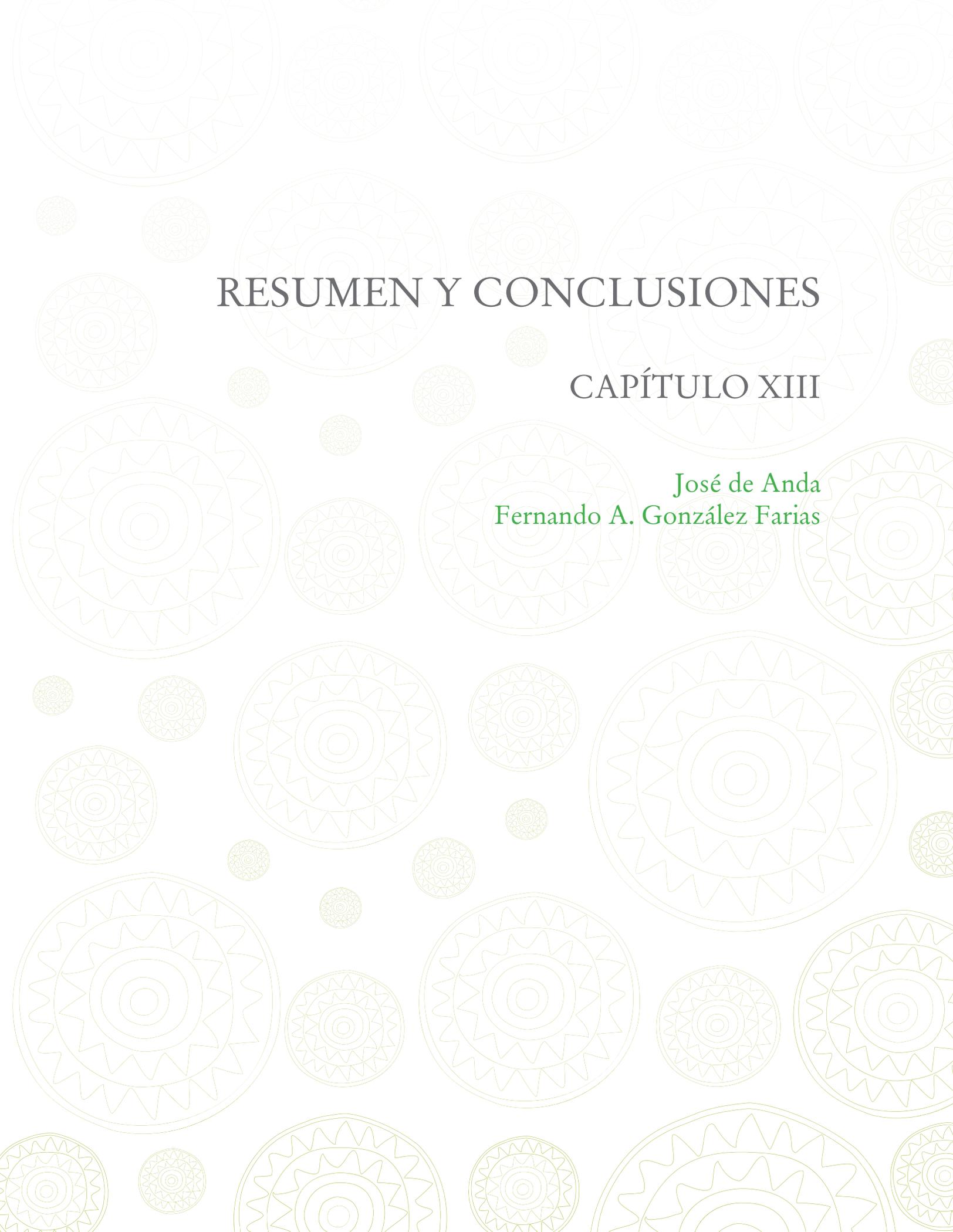
## Referencias

- Cai, X, McKinney, DC, y León, S, Lasdon, LS (2003). Integrated Hydrologic-Agronomic-Economic Model for River Basin Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 129(1): 4-17.
- Chapra, SC (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill. Nueva York. 844 p.
- Cole, TM (2004). Water Balance Utility. Descarga realizada junto con el software CE-QUAL-W2. Septiembre de 2004 en línea: <http://www.ce.pdx.edu/w2/>
- Cole, TM y Wells, SA (2005). CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2. Instruction Report EL-03-1, US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS.
- De Anda, J, Maniak, U (2007). Modificaciones en el régimen hidrológico y sus efectos en la acumulación de fósforo y fosfatos en el Lago de Chapala, México. *Interciencia*. 32(2): 100-107.
- De Anda, J, Shear, H, Maniak, U, Zárate-del Valle, PF (2004). Solids distribution in Lake Chapala, Mexico. *Journal of the American Water Resources Association*. 40(1): 97-109.
- De Anda J, Shear, H, Maniak, U, Riedel, G (2001). Phosphates in Lake Chapala, Mexico. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 6(4): 313-321.
- De Victorica-Almeida, J (1996). Modelo para simular la evolución de oxígeno disuelto en embalses. *Ingeniería del Agua*. 3(2): 63-74.
- Deas, ML y Lowney, CL (2000). Water Temperature Modeling Review. Central Valley. California Water Modeling Forum. 117 p.
- Fall, C, Hinojosa, AP, Jiménez, MCM, Carreño, MCL (2006). Wastewater discharge impact on an important river of the Lerma-Chapala watershed, Mexico. In: *Water Pollution VIII: Modelling, Monitoring and Management*. Brebbia A., Antunes do Carmo J.S. (Eds.). WIT Transactions on Ecology and the Environment. 95. 672 p.
- Fedra, K (1996). Distributed Models and Embedded GIS: Integration Strategies and Case Studies. In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. Goodchild *et al.*, Eds. GIS World Books, Fort Collins, CO, p. 413-418.
- García, A, Armienta, MA, Cruz, O (2001). Sources, distribution and fate of arsenic along the Tolimán River, Zimapán, México. *International Association of Hydrological Sciences*. IAHS 266: 57-64.

- García-Cabrera, J (2007). Plancton como indicador de calidad del agua en la presa Aguamilpa. *Ingeniería Hidráulica en México*. 22(1): 103-116.
- GLOWA (2006). Glowaler Wandel des Wasserkreislaufes. Disponible en línea en: <http://www.glowa.org/de/home/home.htm>
- Groeger, AW y Bass DA (2005). Empirical predictions of water temperatures in a subtropical reservoir. *Arch. Hydrobiol.* 162: 267-285.
- Hernández-Mercado, MA (2006). Estudio del modelo de Streeter y Phelps para determinar la capacidad de asimilación y dilución de contaminantes en corrientes superficiales. Tesis para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de México. 210 p.
- INEGI (2006b). Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Topográfica, 1:250 000, serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México.
- Ji, Z.-G. 2008. Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries. Ed. Wiley-Interscience. 676 p.
- Kennedy, MG, Ahlfeld, DP, Schmidt, DP, Tobiasson, JE (2006). Three-dimensional modeling for estimation of hydraulic retention time in a reservoir. *Journal of Environmental Engineering*. 132(9): 976-984.
- León, LF y Escalante, M (1993). Flow and Pollutant Transport in Lake Chapala, México, Proc. 2nd. Int. Conf. on Water Pollution: Modelling, Measuring and Prediction. Milan, Italy, p. 279-286.
- Martin, JL y McCutcheon, SC (1999). Hydrodynamics and Transport for Water Quality Models. Lewis Publishers, London. 192 p.
- Martinez-Austria, P y Hansen, AM (2000). The role of technology in a holistic approach for water quality conservation in basins: The Lerma-Chapala case. *Water International*. 25(2): 238-245.
- McKinney, DC, Cai, X, Rosegrant, MW, Claudia-Ringler, C, Scott, CA (1999). Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Review and Future Directions. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka. 71 p.
- Nielsen, EJ (2005). Algal Succession and Nutrient Dynamics in Elephant Butte Reservoir. MS thesis, Brigham Young University. 51 p.
- Obregón, O (2008). Assessing Water Quality Modeling in Subtropical Regions Based on a Case Study of the Aguamilpa Reservoir. MS thesis, Brigham Young University. 108 p.
- Palacio, A, Rodriguez, A, Martínez, L (2000). Assessment of the performance of

- an hypolimnetic aerator employing a water quality model. 22 p. Disponible en línea en: <http://www.cham.co.uk/website/new/newvisit/cases/aerator/aerator.doc>
- Palacio, A, Rodríguez, A, Mazari, M (1994). Evolución de la Calidad del Agua del Embalse del P.H. Zimapan, Hidalgo. Instituto de Ingeniería, UNAM, informe elaborado para la CFE, II3127.
- Pennington, SR, Kaplowitz, MD, Witter, SG (2003). Reexamining best management practices for improving water quality in urban watersheds. *JAWRA*. 39(5): 1027-1041.
- Puente-Luévano, G (2001). Saneamiento del río Atoyac. Modelo y Aplicación. Tesis para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México. 104 p.
- Rangel-Peraza, JG, de Anda, J, González-Farías, FA, Erickson, DE (2009a). Water quality assessment of Aguamilpa reservoir, Nayarit, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 117: 1-15.
- Rangel-Peraza, JG, de Anda, J, González-Farías, FA, Erickson, DE (2009b). Statistical assessment of water quality seasonality in large tropical reservoirs. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. 14(4): 15-323.
- Reichert, P, Borhardt, D, Henze, M, Rauch W, Shanahan, P, Somlyódy, L, Vanrolleghem, PA (2001). River Water Quality No. 1. Scientific and Technical Report No. 12. IWA Task Group on River Water Quality Modeling. IWA Publishing. 144 p.
- SMS (2006). Surface Water Modeling. Environmental Modeling Systems, Incorporated. En <http://www.ems-i.com>
- USBR (2009). Reclamation: managing water in the west. Quality of water Colorado River basin. Progress report No. 22. United States Bureau of Reclamation. Department of the Interior Bureau of Reclamation Upper Colorado Region. En: <http://www.usbr.gov/uc/progact/salinity/pdfs/PR22.pdf>.
- Wanielista, M, Kersten, R, Eaglin, R (1997). Hydrology Water Quantity and Quality Control. John Wiley and Sons, Inc, United States of America.
- Watson, PS y Davies, S (2009). Modeling the effects of population growth on water resources: a CGE analysis of the South Platte River Basin in Colorado. *The Annals of Regional Science*. Online First. 18 p.
- WMS. 2006. Watershed Modeling System. Environmental Modeling Systems, Incorporated. En: <http://www.ems-i.com>.





# RESUMEN Y CONCLUSIONES

## CAPÍTULO XIII

José de Anda  
Fernando A. González Farías



**E**sta obra se escribió con el interés de contribuir al conocimiento limnológico de las grandes presas de México. Este conocimiento puede ser igualmente extensivo para aquellas presas localizadas en latitudes tropicales a nivel global ya que las condiciones hidrológicas de estos ecosistemas suelen ser muy similares. Son pocas las referencias que abordan formalmente este tema y aún menos aquellas que buscan el desarrollo de modelos de calidad del agua para tener un conocimiento más amplio sobre el comportamiento de los embalses profundos localizados en ambientes tropicales.



Es por ello que desde su inicio el proyecto del estudio limnológico de la presa de Aguamilpa y el desarrollo de un modelo que permitiera conocer el comportamiento de los principales parámetros fisicoquímicos y biológicos, constituyentes de la evaluación de la calidad de agua para la misma, atrajo el interés de expertos y de las instituciones públicas y privadas relacionadas con el estudio y manejo del agua.

A través de la difusión de los primeros resultados de esta obra se han identificado una cantidad importante de grupos de interés en obtener el libro entre los que destacan tanto instituciones académicas como dependencias gubernamentales tales como la Comisión Federal de Electricidad, la Comisión Nacional del Agua, las Comisiones Estatales del Agua de diversos estados de la República Mexicana, entre las que destacan aquellas cuyo territorio forma parte de la gran Cuenca del río Santiago. También se han interesado diversos académicos estudiosos de los temas relacionados con los ecosistemas acuáticos lacustres y aquellos que estudian el comportamiento de los ecosistemas bajo condiciones de estrés climático.

Igualmente, entre los estudiantes de licenciatura y posgrado se ha manifestado un gran interés en conocer el trabajo realizado por los expertos y jóvenes estudiantes de posgrado que fueron integrándose al proyecto con el interés de profundizar en las temáticas que se abordan en el libro, y que en su momento les ha permitido ser coautores y a la vez obtener el grado académico en sus respectivas disciplinas durante su formación científica y tecnológica.

## *1. Cantidad de Agua*

A lo largo de esta obra se han tratado, con diferente grado de profundidad, temas relevantes que tienen que ver con los aspectos abióticos y bióticos del sistema Santiago-Aguamilpa, tales como la descripción fisiográfica de la cuenca del embalse, las características constructivas y de operación de la presa, el balance hídrico del sistema y el desarrollo de modelos predictivos del escurrimientos para las cuencas de interés.

En este sentido se ha propuesto una metodología novedosa que estima con mayor precisión el comportamiento de los escurrimientos en cuencas hidrográficas de topografía compleja, como es el caso de las diversas cuencas que conforman el complejo hidrológico del sistema que converge en la cuenca del río Santiago-Aguamilpa, la cual supera notablemente los modelos convencionales aplicados por hidrólogos e ingenieros hidráulicos de las dependencias gubernamentales e incluso por aquellos que trabajan en empresas de consultoría en temas ambientales. Por ejemplo, los datos de escurrimientos obtenidos en la cuenca del río Huaynamota se calibraron con datos observados en campo, obteniéndose resultados con una precisión que no es posible lograrla con los métodos convencionales como los que se obtienen con el uso del método clásico del Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos de Norteamérica.

## *2. Calidad del Agua*

Posteriormente se asumió la tarea de estudiar los datos oficiales de calidad del agua del embalse existentes en los archivos de la Comisión Nacional del Agua. Aquí se obtuvo información del monitoreo que regularmente se hace en el embalse en un solo punto de muestreo localizado geográficamente en la cercanía de la cortina de la presa y cuyos resultados son representativos de los primeros 0.80 m de profundidad del embalse.

A través del análisis de dicha información se logró tener indicios del comportamiento estacional que tienen algunas de las variables fisicoquímicas y biológicas del sistema, lo que dió la pauta para planear el trabajo de campo que

se pretendía hacer a lo largo de todo el embalse. Los resultados de este análisis permitieron clasificar la estacionalidad del clima del embalse en tres estaciones definidas como estiaje cálido, lluvias y estiaje frío; esta distinción estacional marca una pauta importante en el proceso de monitoreo del embalse ya que, a diferencia de los lagos y embalses localizados en climas templados, se cuenta con una diferencia estacional marcada en aquellos por la primavera, verano, otoño e invierno.

Posterior a este análisis de los datos oficiales de calidad del agua se desarrolló todo un plan de monitoreo de la calidad del agua, basado en ocho estaciones distribuidas a lo largo del embalse, en los cauces de los ríos Santiago y Huaynamota, y en la cercanía con la cortina de la presa. Las mediciones se realizaron haciendo uso de una sonda multiparámetro y asimismo tomando muestras para analizar en laboratorio aquellos que no fue posible determinar en campo. Las muestras se tomaron desde 0.80 m de la superficie libre del embalse hasta los 120 m de profundidad, lo cual generó una cantidad importante de datos fisicoquímicos y microbiológicos. A través del análisis de los datos de calidad del agua se comprobó que una importante parte de los procesos biológicos aerobios del embalse se dan en los primeros 15 m de profundidad ya que la mayor parte del año el embalse es anóxico por debajo de esta profundidad.

Particularmente fueron importantes los resultados que se obtuvieron en el estudio del fitoplancton en donde se comprobó la existencia de una gran cantidad de especies, con una presencia significativa de cianofitas y clorofitas. Se incluyó un capítulo novedoso que habla sobre la modelación de la distribución de las algas en el embalse y el comportamiento que tienen las cianofitas en el embalse por ser éstas motivo de estudio en diferentes cuerpos de agua dulce del mundo, dado que éstas pueden generar compuestos tóxicos que comprometen la salud de las especies a lo largo de la cadena alimenticia incluyendo al ser humano. Aún no se conoce con exactitud bajo qué condiciones se presenta la producción de estos compuestos tóxicos y aún es necesario determinar si éstos realmente se encuentran presentes en el agua y en los organismos que habitan en la presa.

Se realizó igualmente un estudio de la presencia de metales pesados en los sedimentos del embalse y su comportamiento en dos diferentes estadios climáticos, en los que se estima que la presa no recibe contaminación por metales pesados, causadas por las actividades antropogénicas a lo largo de las principales cuencas

tributarias, y que la variación en sus concentraciones responde a la naturaleza geoquímica de los sedimentos del área de estudio que es mayormente de origen volcánico.

### *3. Modelación de la calidad del agua*

El último capítulo del libro trata sobre la modelación de la calidad del agua del embalse, en él se concentró la experiencia aprendida a lo largo de los dos años de trabajo de campo y del análisis de innumerables valores de parámetros medidos en campo y observados en las estaciones hidrológicas de la Comisión Federal de Electricidad y de la Comisión Nacional del Agua.

Los conocimientos de expertos en modelación de ecosistemas acuáticos permitieron visualizar, por primera vez, el comportamiento estacional de la temperatura y del oxígeno disuelto en el embalse durante los 365 días del año. No obstante se tiene como reto avanzar en el estudio a fin de simular el comportamiento de más variables fisicoquímicas y biológicas del sistema. Continuar con el desarrollo de este modelo es importante dado que a través de este modelo calibrado y validado será posible generar predicciones sobre el comportamiento que tendrá este enorme sistema acuático bajo condiciones de estrés climático.

Existe hoy en día una gran discusión sobre la construcción o no de grandes presas, tanto en México como a nivel mundial, en



Árboles sumergidos por la inundación del embalse.

varios estudios se manifiestan los impactos que se generan sobre flora y fauna, principalmente en especies endémicas cuyos hábitats se encuentran en las zonas de inundación donde quedarán ubicados los embalses de dichas presas. Sin embargo, es notable la creciente demanda de energía en México y el rezago que existe en el país en materia de producción de energía usando fuentes alternas, por lo que la tendencia seguirá siendo el aprovechar cuencas hidrológicas con características adecuadas para enfrentar la demanda de energía eléctrica en el país. Es por ello igualmente indispensable que se genere conocimiento científicamente sólido sobre los diversos aspectos que resultan de la construcción de las grandes presas, y que se considere que este tipo de obras conlleva afectaciones de orden económico, social, ambiental, cultural, político y tecnológico.

Esta obra únicamente se dedicó al estudio de los aspectos científicos y tecnológicos de una presa en particular, a través de la cual se propusieron metodologías novedosas, explicadas en un lenguaje sencillo, que anteriormente no se habían aplicado en otros estudios, por lo que suponemos que este trabajo podrá ser consultado por diversos grupos de interés sin que necesariamente sean expertos en el tema. ⚙️





TA ZATA MATŪ TA TEI AŪMARA TUKAM  
MEMŪ TEU NETŪA, TA HŪTŪMA MEMO  
WARU REI AŪMARA IEMAKI HERŪA  
TSIE TŪ KIE MEKU TŪMŪMŪNIKE  
IEMATSĪ ŪWITATŪ IŪKU URŪATARI ME  
NŪTŪ META HUIWARI INŪANTARI.

NUESTRO DÍAS SOL Y NUESTRO DÍAS EL AGUA,  
DADORES DE LA VIDA, VIENEN A LOS  
HERMANOS VENIDOS SALIR DEL MAR PARA  
QUEDARSE ENTRE NOSOTROS Y QUEDARSE.  
CINCO SON LOS COLORES DEL MAR Y CINCO  
LOS DÍAS QUE TARDÓ EL MUNDO EN CREARSE.



“Calidad  
del Agua en la Presa de  
Aguamilpa, Nayarit, México”  
Se terminó de imprimir en el mes de  
Febrero del año 2013 en los Talleres de  
Símbolos Corporativos: Nueva Galicia  
944, Colonia Centro en Guadalajara,  
Jalisco, México. Con un tiraje de  
1,000 ejemplares.