



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE BIOLOGIA
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
AREA TEMATICA: SALUD Y PRODUCCIÓN ANIMAL

Evaluación de la calidad de agua y el estado
trófico de la presa de Zicuirán, Michoacán,
México

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias Biológicas

Presenta
Miguel Ángel Hernández Acuayte

DIRECTOR DE TESIS:

Doctor en Acuicultura
Antonio Campos Mendoza

CODIRECTOR DE TESIS

Maestro en Ciencias Biológicas
Rubén Hernández Morales



Enero 2021

*"A tí pequeña Ixtapíta"
Aquel embalse profundo
Donde mí corazón cálido
Encontró el arcoíris mágico
De un gozo paradisiaco
Cual en aguas tranquilas
Estremecen mí alma cautívada
Ruborizada por tu belleza inmaculada
Hecha de lágrimas celestiales
que albergan vida eterna, una propuesta cálida y tierna
A mí razón confundida y varada
Por entender tu misterio terrenal y el sacrificio pagado por mí corazón
A la orilla de tu calma llena de riqueza inmensa
Donde mí llanto y alegría
Bañaron tus aguas fértiles del color turquesa,
De aquel sentimiento dado por tí alma mía*

Hernández-Acuayte (2021)



DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico infinitamente a **Dios**, ya que él me ha dado la calma, la paciencia y la sabiduría para hacer este trabajo. A través del tiempo he sentido su compañía y su apoyo incondicional en mi corazón, he recordado que la ciencia es la forma en la que el hombre entiende y comprende las maravillas que él ha creado a través de la naturaleza y al gran maestro **Siddhartha Gautama**, ya que al seguir su filosofía de vida he tenido un crecimiento espiritual y como persona me ha ayudado a conocerme en cada amanecer, al viaje que se recorre para algún día llegar al nirvana o continuar en el bello giro de la rueda del Samsara.

A la **Lic. Yvonne Palacios Rangel**, porque desde que te conocí me hiciste creer que el amor verdadero existe y después de los momentos difíciles que he pasado, tú has llenado de alegría mi vida, te has convertido en el ángel más bello e importante que Dios me mandó para alegrar mi vida y seguir aprendiendo en la rueda del Samsara. Mil gracias por todo el apoyo brindado en los momentos buenos y malos, no tengo con que agradecerte todo lo que has hecho por mí. *Te amo pequeña por todo lo que me has dado y lo feliz que soy a tu lado.*

A mis padres **Lic. Miguel Ángel Hernández Larrinua y Martha Acuayte Hernández** ya que este logro es parte de ustedes; además por su motivación día tras día, quienes con su entusiasmo, dedicación y esfuerzo me apoyaron incondicionalmente. Gracias por todo su apoyo y cariño he logrado concluir una etapa muy importante en mi vida. Y sobre todo por su confianza depositada en mí para estudiar un posgrado el cual estoy en proceso de concluir.

A mis hermanas **la L. en Enf. Martha Alejandra Hernández Acuayte y a la Biól. Ángeles Georgina Hernández Acuayte** por su cariño, confianza y todos los momentos felices que compartimos y a mi sobrina Sofía, ya que soy como un padre para ella y sabe que tienen mi cariño incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** y a la **Facultad de Biología** por darme la oportunidad de realizarme profesionalmente y a todos los maestros que intervinieron en mi formación académica durante mi posgrado.

Al **Laboratorio de Análisis de Aguas del Laboratorio de Biología Acuática “J. Javier Alvarado Díaz”** por permitir la realización de todas las pruebas fisicoquímicas y biológicas necesarias para la realización de este proyecto; además de facilitarme los materiales y reactivos necesarios para la elaboración de esta investigación.

A la **Coordinación de la Investigación Científica** por el apoyo económico brindado para el desarrollo del proyecto “Evaluación de la calidad del agua y estado trófico de la presa de Zicuirán y su aplicación a la acuicultura” del cual se desprende en forma inicial ésta investigación.

Al programa de becas **CONACYT**, por el apoyo económico durante la realización de este proyecto de importancia para el desarrollo de la acuicultura en el estado de Michoacán.

A mi asesor el **Dr. Antonio Campos Mendoza** por depositar su confianza en mí, agradezco su asesoría, enseñanzas y el apoyo brindado durante la realización de este proyecto, por su paciencia en el trabajo de campo. Además de su disponibilidad y generosidad para compartir sus conocimientos y experiencias, su tolerancia y paciencia durante el desarrollo de este trabajo. Al igual que el apoyo incondicional en cada uno de los congresos y exposiciones derivados de la contribución de esta tesis.

Al **M.C. Rubén Hernández Morales** por depositar su confianza y buen humor en la realización de este proyecto, por su apoyo en laboratorio y en la realización de todas las pruebas requeridas para este proyecto.

Al **Comité tutorial** integrado por: la Dra. Rebeca Aneli Rueda Jasso por dar su apoyo, sus consejos y su apoyo en la revisión y redacción de esta tesis, el Dr. Jorge Fonseca Madrigal por sus sugerencias y sus comentarios en el desarrollo de las evaluaciones tutorales, así como en el escrito final, el Dr. Lindsay G. Ross por su apoyo en la realización de este trabajo, por sus sabios consejos dados en el congreso LACQUA, realizado en Costa Rica y por ser un gran maestro y ser humano,

Al **Dr. Javier Ponce Saavedra** por haber sido mi tutor en la materia de análisis multivariado, por sus enseñanzas, su gran paciencia y por el apoyo en los análisis estadísticos de este trabajo.

A los integrantes del Programa de Servicio Social del Laboratorio de Análisis de Aguas de la Facultad de Biología, los cuales se encuentran adscritos a **la Facultad de Químico Farmacobiología y a la Licenciatura en Biotecnología**, ya que ellos fueron una parte esencial para la realización de este trabajo, por su ayuda en la realización de las pruebas fisicoquímicas y biológicas.

Agradezco a cada una de las personas que directa o indirectamente participaron en la presente investigación, ya que son parte de un logro profesional y personal, que culmina para iniciar un nuevo reto en la continuación de mi carrera, contribuir a la sociedad con el desarrollo del conocimiento aplicado y en mi futura formación como doctor en ciencias. Soy el primero de los integrantes de mi familia en tener la dicha de alcanzar el grado de maestro en ciencias y futuramente ser doctor en ciencias, un grado profesional que será de beneficio para la ciencia mexicana, las personas que me rodean y para nuestro país.

INDICE GENERAL

RESUMEN	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo general.....	6
2.2 Objetivos particulares.....	6
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	7
3.1 Ubicación geográfica	7
3.2 Fisiografía.....	7
3.3 Geología.....	7
3.4 Suelos	9
3.5 Clima	9
3.6 Hidrología.....	9
3.7 Vegetación	10
3.8 Fauna.....	10
3.8.1. Fauna íctica endémica	11
4. RESULTADOS.....	12
4.1. Capítulo I. Calidad del agua de la presa de Zicuirán, Michoacán México.....	12
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
4.1.1 INTRODUCCIÓN.....	14
4.1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
4.1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1.4 LITERATURA CITADA	35
4.2 Capítulo II. Dinámica de nutrientes, variación nutrimental y estado trófico de la presa de Zicuirán, Michoacán, México	44
RESUMEN.....	44
ABSTRACT.....	45
4.2.1 INTRODUCCION.....	46

4.2.2 MATERIALES Y METODOS.	47
4.2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.2.5 LITERATURA CITADA.....	77
4.3. CONCLUSIONES	86
5. RECOMENDACIONES.....	88

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de la Presa de Zicuirán, Michoacán, México y los sitios de muestreo S1, S2 y S3. 8

Figura 2. Variación temporal de la temperatura del agua en los sitios de muestreo de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 20

Figura 3. Distribución vertical de la temperatura en la columna de agua en la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 21

Figura 4. Valores de distribución de la temperatura (°C) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 22

Figura 5. Variación espacial del oxígeno disuelto en los sitios de muestreo de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 23

Figura 6. Distribución vertical del oxígeno disuelto en la columna de agua en la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 25

Figura 7. Valores de distribución del oxígeno disuelto (mg L^{-1}) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 25

Figura 8. Variación temporal del pH en el sitio S1 en la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 26

Figura 9. Valores de distribución del pH presente durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 27

Figura 10. Variación temporal de la alcalinidad total en los sitios de muestreo de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 28

Figura 11. Valores de distribución de la alcalinidad total (mg L^{-1}) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 29

Figura 12. Análisis de componentes principales (ACP) entre sitios y variables fisicoquímicas y biológicas en la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 30

Figura 13. Variación temporal del Índice de calidad de agua en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 32

Figura 14. Valores temporales de distribución del índice de calidad de agua presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 33

Figura 15. Variación temporal de la transparencia en la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 54

Figura 16. Valores temporales de distribución de transparencia (m) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México. 54

Figura 17. Variación espacial de los nitratos en los sitios de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México 57

Figura 18. Valores temporales de distribución de nitratos ($\mu\text{g L}^{-1}$) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.....	57
Figura 19. Variación temporal de los nitritos en los sitios de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	58
Figura 20. Valores temporales de distribución de nitritos ($\mu\text{g L}^{-1}$) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.....	59
Figura 21. Variación temporal de la concentración de amonio en el sitio S1 en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	60
Figura 22. Valores temporales de distribución de nitritos (mg/m^3) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.....	61
Figura 23. Variación temporal de las formas de fosforo total en los sitios de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	62
Figura 24. Valores temporales de distribución de las formas de fosforo total ($\mu\text{g L}^{-1}$) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	63
Figura 25. Variación temporal de la clorofila “a” en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	64
Figura 26. Valores temporales de distribución de la clorofila “a” ($\mu\text{g L}^{-1}$) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	65
Figura 27. Distribución vertical de la clorofila “a” presente en la columna de agua en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	66
Figura 28. Resultados del análisis de correspondencia canónica basado en las variables fisicoquímicas y biológicas, representadas con puntos y las variables con flechas respectivamente, en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.....	70
Figura 29. Valores temporales del Índice de estado trófico (IET) presentes durante el periodo de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.....	72
Figura 30. Valores temporales de distribución del índice de estado trófico (IET) presentes durante el periodo de muestreo en tres sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	72
Figura 31. Variación estacional de la Limitación Nutricional en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	73
Figura 32. Relación del cociente de Redfield y la clorofila “a” en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorización del Índice de Calidad de Agua canadiense.....	18
Tabla 2. Intervalos óptimos de variables fisicoquímicas para el cultivo de tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	19
Tabla 3. Análisis de Componentes Principales post hoc.....	30
Tabla 4. Cálculos para la determinación de la calidad del agua, en la presa Zicuirán, Michoacán ..	34
Tabla 5. Categorización del Índice de estado trófico de Carlson y Simpson	49
Tabla 6. Valores temporales del Índice de estado trófico de Carlson y Simpson (1996), presentes durante el periodo de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.....	50
Tabla 7. Cociente de Redfield. Relación nitrógeno- fósforo, y limitación nutrimental en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.....	74

RESUMEN

La presa de Zicuirán se localiza dentro de la reserva de la biosfera de Zicuirán-Infiernillo. El embalse fue construido para el almacenamiento y distribución de agua para riego y posteriormente se iniciaron actividades acuícolas enfocadas al cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*). El embalse presenta aguas cálidas con deficiencia de oxígeno disuelto en el periodo de invierno, lo que provoca un evento de convección. El índice de calidad de agua canadiense (CCMEWQI) indicó que la calidad de agua durante el ciclo anual es adecuada para mantener una producción acuícola estable en la mayor parte del año. Sin embargo, solo durante el periodo de marzo a noviembre, el sitio intermedio (S2) es apto para el cultivo y de diciembre a febrero la zona de transición del embalse (S3) es apta igualmente para el cultivo de la tilapia, si bien la calidad del agua durante el año no es excelente, debido a las variaciones de las concentraciones de los carbonatos de magnesio, los sólidos disueltos totales (SDT) y a las formas oxidadas del nitrógeno (NO_2 y NO_3) presentes en la parte superficial y media de la columna de agua. El estado trófico del sistema representado por el índice de Carlson con modificación de Simpson (1996), determinó que el nivel trófico que presenta el embalse es eutrófico, ya que supera las 60 unidades y presenta una tendencia a evolucionar a través del tiempo. La limitación nutrimental del sistema se encuentra encabezada por formas de nitrógeno durante la mayor parte del año y presenta un cociente de Redfield menor a 16 unidades, lo que indica una alta productividad primaria. Las formas de fósforo total mantienen una relación proporcional con las formas de fósforo orgánico en la columna de agua. Por lo anterior y conforme a la tolerancia de *O. niloticus* se pueden tener producciones aceptables anualmente. La presente investigación aborda la aplicación de índices y herramientas estadísticas para fomentar el desarrollo del cultivo de la tilapia en la presa de Zicuirán y así mismo da las bases para futuros estudios como el de capacidad de carga que estimará la producción anual sustentable que beneficie principalmente a la comunidad.

Palabras clave: Eutrofia, Limnología Química, Zicuirán, Acuicultura Sustentable.

ABSTRACT

The Zicuirán dam is located within the Zicuirán-Infiernillo biosphere reserve. The reservoir was built for the storage and distribution of water for irrigation and subsequently aquaculture activities focused on the cultivation of tilapia (*Oreochromis niloticus*) began. The reservoir presents warm waters with a deficiency of dissolved oxygen in the winter period, which causes a convection event. The Canadian Water Quality Index (CCMEWQI) indicated that the water quality during the annual cycle is adequate to maintain stable aquaculture production for most of the year. However, only during the period from March to November, the intermediate site (S2) is suitable for cultivation and from December to February the transition zone of the reservoir (S3) is also suitable for the cultivation of tilapia, although the Water quality during the year is not excellent, due to variations in the concentrations of magnesium carbonates, total dissolved solids (TDS) and the oxidized forms of nitrogen (NO₂ and NO₃) present in the surface and middle part of the water column. The trophic state of the system represented by the Carlson index with modification of Simpson (1996), determined that the trophic level presented by the reservoir is eutrophic, since it exceeds 60 units and presents a tendency to evolve over time. The nutritional limitation of the system is led by forms of nitrogen during most of the year and presents a Redfield quotient of less than 16 units, which indicates a high primary productivity. The forms of total phosphorus maintain a proportional relationship with the forms of organic phosphorus in the water column. Due to the above and according to the tolerance of *O. niloticus*, acceptable productions can be achieved annually. This research addresses the application of indices and statistical tools to promote the development of tilapia cultivation in the Zicuirán dam and also provides the basis for future studies such as carrying capacity that will estimate sustainable annual production that mainly benefits community.

Keywords: Eutrophy, Chemical limnology, Zicuirán, Sustainable Aquaculture.

1. INTRODUCCIÓN

En México existen más de 5,000 presas. La capacidad de almacenamiento de estas es de aproximadamente 150 mil millones de metros cúbicos. De estas 180 presas al nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) pueden almacenar 127,373 hm³, es decir 82 % del almacenamiento total contabilizado de todo el país. El nivel de este volumen depende de la precipitación, los escurrimientos y el régimen de operación de las presas en las distintas cuencas y regiones del país (CONAGUA, 2016)

Acorde al concepto NAMO, los embalses más representativos de México son: la presa Plutarco Elías Calles, La boquilla, Álvaro Obregón, Binacional la Amistad, Venustiano Carranza, Binacional Falcón, Miguel Hidalgo y Costilla, Luis Donaldo Colosio correspondientes a la zona norte del país. Por su parte en la zona centro de la República se ubican: el embalse Aguamilpa Solidaridad, Ing. Alfredo Elías Ayud, Ing. Fernando Llard Balderrama, Lago de Chapala, Adolfo López Mateos “El infiernillo”. Y para la parte sur del país se ubican: La presa Nezahualcóyotl, Presidente Miguel Alemán, Miguel de la Madrid Hurtado, Ing. Carlos Ramírez Ulloa, Ángel Albino Corso, Manuel Moreno Torres y Dr. Belisario Domínguez (CONAGUA, 2016)

Para el uso y el aprovechamiento de las aguas nacionales, las personas morales requieren de títulos de autorización o partida proporcionados por CONAGUA las cuales especifican el volumen del agua y el uso que se le dará a este recurso (DOF, 2020). El volumen de las presas concesionado se puede revisar por su distribución nacional, regional y local conforme a la ubicación de los aprovechamientos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (Repda, 2020). En 2017, se reportó que los volúmenes totales de las presas se han utilizado para uso agrícola (76 %), hidroeléctrico (4.7 %), industrial (4.8 %) y abastecimiento público – privado (14.7 %). La distribución a nivel nacional de los dos principales usos consuntivos agrupados por volumen, (agrícola y abastecimiento público) usos suman 90.4 % del uso de volumen per cápita total nacional (CONAGUA, 2016).

En el estado de Michoacán acorde a los aprovechamientos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua, los principales usos que se dan a los principales embalses (Adolfo López Mateos “El Infiernillo”, Zicuirán, El Gallo y Coíntzio que cuentan con 30,812,001,325 m³ por año) son: agrícola (3,481,353,345 m³/año equivalentes al 21.9 %), doméstico (4,969,417 m³/año equivalentes al 4.3 %), acuicultura (47,515,585 m³/año equivalentes al 12.4 %), servicios industriales (210,251,730 m³/año equivalentes al 14.4 %), público urbano (198,689,540 m³/año equivalentes al 47.7 %) (Repda, 2020)

A partir de las dos últimas décadas, uno de los usos de creciente importancia en los embalses de Michoacán es el acuícola. Esto es debido a que la acuicultura es una de las principales actividades económicas dentro de la industria alimentaria mundial, su objetivo principal es el incremento en la producción de proteína de alta calidad para favorecer la seguridad alimentaria de países en desarrollo y en vías de desarrollo. Esta actividad se ha catalogado como una alternativa para la administración de los recursos acuícolas (FAO, 2016) y ha permitido convertir a numerosos embalses, en una fuente productiva de organismos acuáticos comestibles y con ello resolver un problema nutricional mundial (Saavedra, 2006).

En 2016, la producción mundial de tilapia fue de más de 5 millones de toneladas. China encabezó esta producción, mientras que en México en este mismo año generó 170 mil toneladas en peso vivo (FAO, 2016). Por su parte Michoacán aportó 25,873.21 toneladas, cultivadas principalmente en estanques y jaulas flotantes. Las especies cultivadas son: *Oreochromis niloticus*, *O. mossambicus*, *O. aureus* e híbridos. En nuestro estado, el cultivo de tilapia se produce con 562 Unidades de Producción Acuícola (UPA) que llevan a cabo producciones intensivas de trucha (225) y tilapia (309). Estas especies se han seleccionado preferentemente, por la rentabilidad en las operaciones de cultivo. Los municipios que cuentan con desarrollos acuícolas son: La Huacana, Lázaro Cárdenas e Infiernillo como productores de tilapia, mismos que van ganando posiciones en la producción de tilapia a nivel nacional (COMPESCA, 2016, SIAP-SADER, 2017).

La tilapia (*Oreochromis spp.*) cuenta con una preferencia generalizada por parte de los consumidores en el territorio de Michoacán y resulta una opción conveniente para la producción extensiva en sistemas acuáticos mayores de 100 ha. Al igual que para otras especies, uno de los factores más importantes en el cultivo de esta especie es la calidad del agua ya que es esencial para su adecuado desarrollo. Para ello se deben determinar las características físicas, químicas y microbiológicas, las cuales influyen directamente la disponibilidad del alimento natural (plancton) y la salud de los organismos acuáticos (Ross *et al.* 2013). Lo anterior es relevante ya que la calidad del agua afecta el equilibrio metabólico y de crecimiento de los organismos en cultivo, para así obtener tallas aptas para el sector comercial. Entre las variables fisicoquímicas que intervienen en la estabilidad de *Oreochromis spp* destacan: la temperatura, oxígeno, pH, salinidad, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales y nutrientes orgánicos e inorgánicos y estos deben mantenerse dentro de los intervalos óptimos para su desarrollo (Beltrán *et al.* 2015).

CONAGUA estableció cuatro parámetros principales para determinar la calidad del agua: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y coliformes fecales (CF). La ponderación propuesta por CONAGUA determina la importancia prioritaria a la DBO₅ y DQO, ya que estos son indicadores de la cantidad de materia orgánica hidrolizable y no hidrolizable presente en los cuerpos de agua superficiales, la cual proviene principalmente de las descargas de aguas residuales, tanto de origen municipal como industrial (CONAGUA, 2016).

La calidad de agua presente en la cuenca del Balsas con respecto a estos parámetros presenta la siguiente ponderación: 45.2 % de los sitios presenta un índice de calidad de agua excelente, 9.4 % cuentan con buena calidad, 23.6 % tiene una calidad de agua aceptable, 13.9 % se encuentra contaminado y 7.9 % de las estaciones se encuentra fuertemente contaminada. Otro factor importante que determina la salud de un cuerpo de agua es el estado trófico, el cual define el fenómeno de eutrofización, que es el rompimiento del equilibrio de nutrientes en el cuerpo del agua que provoca el crecimiento desmedido de la producción de algas y macrófitas, la escorrentía de

nutrientes a las vías fluviales y la eutrofización de agua dulce, además de que conducen a un mayor crecimiento de la producción algal (Azapagic y Perdan, 2005).

Dicho crecimiento de los organismos aurotrófos bloquea la luz solar y al no poder realizar la actividad fotosintética genera la disminución y el agotamiento de oxígeno; lo que finalmente conduce a la anoxia, mortalidad y reducción de la biodiversidad acuática (Jeswani *et al.* 2015). La disminución paulatina de la calidad del agua conlleva a la inhabilitación de varios usos que se le pueden dar al cuerpo de agua (OCDE, 2006).

Entre los principales factores a considerar están las concentraciones de nutrientes como son: las formas de fósforo y nitrógeno total, ya que son vitales para el desarrollo de los organismos vivos y su concentración en el agua es la causa principal del estado trófico. Este estado se determina mediante el análisis de otros parámetros como la transparencia del agua y la concentración de clorofila "a" (Wetzel 2001, Kalff 2002). Concentraciones bajas de fósforo y nitrógeno determinan ambientes oligotróficos, normalmente denominados como embalses con agua de buena calidad, que se caracterizan por ser poco productivos ya que albergan bajas densidades de fito y zooplancton y por ende presentan alta transparencia. Al contrario, cantidades grandes de nutrientes, particularmente de fósforo, están presentes en ambientes eutróficos donde su agua es de baja calidad, pero existe una alta productividad biológica, sobre todo de fitoplancton, lo cual representa una reducida transparencia (Wetzel 2001, Kalff 2002 y OCDE 2006). El proceso de incorporación de concentraciones excesivas de nutrientes a un cuerpo de agua (que lleva a su enriquecimiento), frecuentemente ocasiona efectos indeseables. El conocimiento de las concentraciones de las formas totales de fósforo y nitrógeno presente en un cuerpo de agua y su dinámica (entradas, salidas y almacenamiento) son de suma importancia, a fin de evitar el ascenso del nivel trófico y el consecuente descenso de la calidad del agua (Wetzel, 2001). Los impactos que afectan a los ecosistemas acuáticos son la calidad del agua, estado trófico, contaminantes de origen municipal e industrial, estos factores tienen peso hacia el fenómeno del agotamiento del agua y esto da un impacto en la seguridad del suministro de agua (OCDE-JRC, 2008). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que una de nueve muertes es atribuible a problemas de salud relacionados con la

contaminación del recurso hídrico, lo que representa aproximadamente tres millones (5 %) de muertes anuales a nivel mundial.

El nexo de una calidad del agua y un estado trófico óptimo ejerce influencia en el proceso alimentos-energía-agua, se ha propuesto que los responsables de la formulación de políticas públicas deberían utilizar un enfoque para ayudar al avance en los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (Boas *et al.* 2016). Un marco para definir este nexo de tres pilares: que se centran en lograr la protección del agua y con esto asegurar su acceso para la producción de alimentos de alta proteína y energía para todos, al tiempo que se fomenta el crecimiento sostenible de una economía verde en una rápida urbanización mundial (Hoff 2011). Por lo anterior, la presente investigación determinó las condiciones fisicoquímicas y biológicas de la columna de agua para establecer la calidad del agua, la limitación nutrimental y el estado trófico de la presa Zicuirán. Los resultados del presente estudio son información base para establecer un ordenamiento acuícola, que establezca la capacidad de carga del sistema y los lineamientos para una acuicultura sostenible.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar de forma espacial la calidad del agua y el estado trófico del embalse Zicuirán, con base en una caracterización fisicoquímica, para establecer sitios propicios para el cultivo de tilapia, en las épocas de estiaje y lluvias, durante un ciclo anual.

2.2 Objetivos particulares

- Obtener una caracterización fisicoquímica de la sección alta, media y baja de la presa de Zicuirán en un ciclo anual.
- Determinar la calidad del agua del embalse con base en los parámetros físicos y químicos idóneos para el cultivo de tilapia, durante un ciclo anual.
- Establecer la variación nutrimental y el estado trófico del embalse, para determinar los sitios con mayor potencial para el cultivo de tilapia durante un ciclo anual.

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación geográfica

La presa de Zicuirán (figura 1), se localiza en las coordenadas, 18° 55' 59" norte y 101° 54' 30" oeste, dentro de la Reserva de la biósfera de Zicuirán-Infiernillo en el municipio de La Huacana, Michoacán. Este embalse se ubica en la porción suroeste del Estado de Michoacán, a sólo 6 km de la población de Zicuirán; a 20 km de la cabecera municipal de La Huacana y a 103 km de la ciudad de Morelia, a una altura de 300 msnm (INEGI, 2009).

3.2 Fisiografía

El área de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica de la Depresión del Balsas (Rzedowski, 1978), que en Michoacán se ubica como un gran valle en el que las altitudes sobre el nivel del mar fluctúan desde cerca de 200 msnm en las partes más bajas hasta casi 1600 msnm en las zonas altas que delimitan la provincia del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur (INEGI, 2009).

3.3 Geología

Las rocas que conforman el marco geológico de la región se caracteriza por presentar rocas ígneas extrusivas andesítica-basáltica las cuales pertenecen a la unidad litoestadigrafica conocida como basalto (QhoB). Su edad se ha determinado del Plioceno - Holoceno, se correlaciona con la Faja Volcánica Transmexicana. Adicionalmente se encuentran rocas ígneas intrusivas, las cuales dominan el componente lítico en la porción norte del cuerpo de agua (INEGI, 2009).

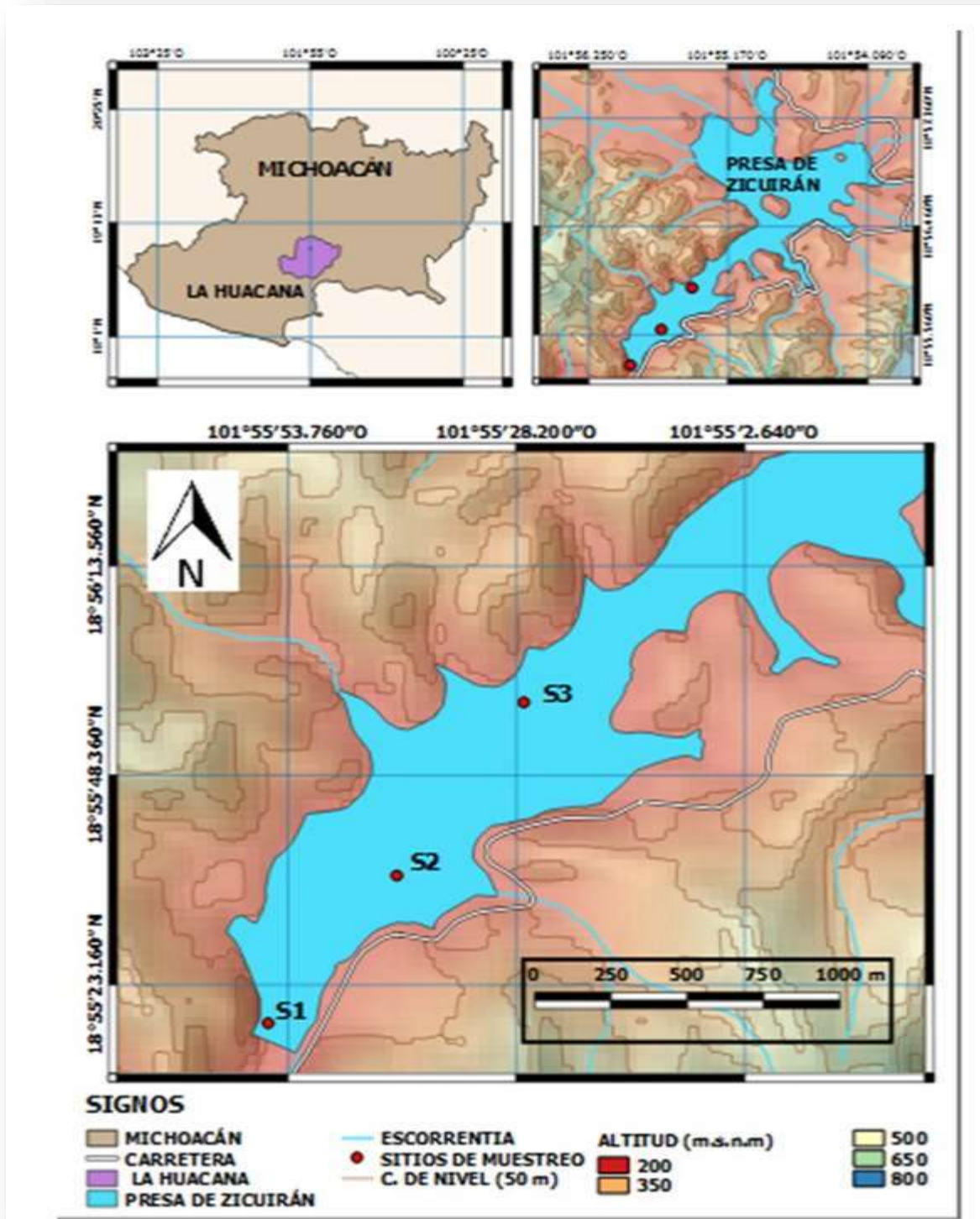


Figura 1. Localización geográfica de la Presa de Zicuirán, Michoacán, México y los sitios de muestreo S1, S2 y S3.

3.4 Suelos

Los suelos son de tipo andosol y leptosol. El primero se caracteriza por ser un suelo de origen volcánico, constituido principalmente de ceniza, la cual contiene alto contenido de alófono, lo que le confiere ligereza y untuosidad al suelo y son generalmente de colores oscuros, con alta capacidad de retención de humedad este tipo de suelos se presentan asociados a vegetación de bosque o selva. Por lo regular tienen bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo y éste no puede ser absorbido por las plantas. El leptosol presenta un espesor reducido y el material del que se compone puede ser tanto rocas como materiales no consolidados con menos de 10 % de tierra fina y aparece en zonas altas o medias con una topografía escarpada y elevadas pendientes. Este se encuentra en todas las zonas climáticas y particularmente, en áreas fuertemente erosionadas, por ello son suelos poco o nada atractivos para cultivos ya que presentan una potencialidad muy limitada para el cultivo (INEGI, 2009).

3.5 Clima

El clima se determina en la estación meteorológica llamada “La Huacana” perteneciente al Sistema Meteorológico Nacional (2018). El clima de la zona según la clasificación de Köppen modificada por García (1989), es Awo(w)(i)gw” definido como clima de tipo semiseco muy cálido y cálido, por lo cual la región presenta un intervalo de temperatura que varía entre 20 a 30°C y un intervalo de precipitación en verano con una tasa de 400 a 1000 mm³ (SARH *et al.* 1992).

3.6 Hidrología

Con relación al marco hidrológico documentado por INEGI (2009), el área está situada en la Región Hidrológica número 18 (RH 18), denominada Depresión del Balsas, la cual alberga a las cuencas Río Balsas-Infiernillo y Río Tepalcatepec-Infiernillo, se abastece principalmente de dos afluentes, el Río Huámito y el Río Conguripo, así como de diversas corrientes intermitentes (Hurtado, 1997).

3.7 Vegetación

La vegetación con mayor presencia en el área de estudio corresponde a plantaciones agrícolas de temporal, así como a la selva baja caducifolia y subcaducifolia, con poco grado de perturbación (INEGI, 2009). Para la Reserva de la Biósfera Zicuirán-Infiernillo, se han reportado las siguientes asociaciones vegetales: bosque espinoso, bosque de encino, palmar y bosque de galería. En conjunto existen aproximadamente 756 especies vegetales, algunas de las especies de relevancia en la región son el cuachalalate (*Amphipterygium adstringens*), la panicua (*Cochlospermum vitifolium*), el ciruelo (*Spondiaspurpurea*), la pitaya (*Backebergia militaris*), el pellejudo (*Jatropha stephaniai*), el papelillo (*Euphorbia schlechtendalii*), la hierba del coyote (*Euphorbia colletioides*), el palo verde (*Apoplanesia paniculada*), la palma real (*Sabal pumos*), el barbasco (*Piscidia carthagenensis*), la *Bursera* spp. y la *Trichilia* spp. (SEMARNAT y CONANP 2014).

3.8 Fauna

La fauna de la Reserva cuenta con 544 especies. Los vertebrados tienen una importante presencia en la región. De las 161 especies de mamíferos descritos para Michoacán, 86 se han registrado en el área, lo cual implica que Zicuirán-Infiernillo es refugio de más de 53 % de estas especies. Por otra parte, se han registrado 253 especies de aves, grupo particularmente importante pues representa casi 47 % de las 539 especies del estado, y cerca de 25 % de las especies que se registran para todo México, de las cuales 101 especies son migratorias. En cuanto a la herpetofauna, se han registrado 69 especies, que representan 37 % de las especies de anfibios y reptiles de la entidad. Por último, se han registrado 58 especies de peces en los ecosistemas presentes en la región (SEMARNAT y CONANP, 2014).

3.8.1. Fauna íctica endémica

La ictiofauna de la reserva es rica, desde los puntos de vista biológico y biogeográfico, pues se pueden encontrar especies de origen neártico y neotropical, caracterizadas por elementos: a) de origen primario, como son las familias Characinidae, Cyprinidae e Ictaluridae, así como b) peces secundarios caracterizados por las familias Goodeidae, Poeciliidae y Cichlidae, y c) peces vicarios, que están representadas por las familias Atherinopsidae y Salmonidae y también han sido introducidas numerosas especies, como las carpas de origen asiático, los cíclidos de origen africano y los salmónidos, como la trucha arcoíris, e inclusive especies endémicas de la Cuenca del Lerma como la acúmara (*Algansea lacustris*), el pescado blanco (*Chirostoma estor*) y más recientemente el pez diablo (*Pterygoplichthys multiradiatus*). Este último ha elevado de manera importante sus poblaciones. Al igual que en otras zonas, no se ha evaluado el impacto al medio que causa la introducción de estas especies (Álvarez y Díaz Pardo, 1983).

4. RESULTADOS

4.1. Capítulo I. Calidad del agua de la presa de Zicuirán, Michoacán México

RESUMEN.

La presa de Zicuirán se localiza en el Área Natural Protegida de la Reserva de la Biosfera de Zicuirán-Infiernillo y presenta un alto potencial acuícola. En la presente investigación se dan a conocer los resultados del monitoreo de la calidad del agua aplicada al cultivo de tilapia, como una estrategia para detonar la acuicultura de la tilapia en jaulas flotantes, en dos zonas del embalse que corresponde al sector intermedio (parte media) del embalse y la sección de transición del embalse (parte alta). Por ello, se evaluaron parámetros fisicoquímicos y biológicos durante un ciclo anual, tomando en cuenta las épocas de estiaje y de precipitación. La colecta de las muestras se realizó en tres sitios ubicados a lo largo de la presa, tomando como referencia la zona de la cortina (parte baja), zona central (parte media) y la zona de cruce de estas (parte alta). Las muestras se obtuvieron de la superficie, la base de la zona trofogenica y el fondo. En el laboratorio se determinaron dieciséis parámetros fisicoquímicos y biológicos. Se estableció que la presa presenta una columna de agua cálida, con aguas neutras a ligeramente alcalinas, bien oxigenadas con formas nitrogenadas abundantes. El Índice de Calidad de Agua Canadiense (CCME WQI), mostró que la presa en general tiene una calidad de agua buena y que es apta para el cultivo de tilapia, el comportamiento fisicoquímico del embalse lo determinaron las concentraciones de fósforo total (PT), conductividad eléctrica (CE), nitritos (NO_2^-), potencial de hidrogeno (pH), temperatura del agua (Tagua), nitratos (NO_3^-) y los tipos de clorofilas.

Palabras Clave: Acuicultura, Zicuirán, Fisicoquímica, Variación estacional.

ABSTRACT.

The Zicuirán Dam is located in the Protected Natural Area of the Zicuirán-Infiernillo Biosphere Reserve and has a high aquaculture potential. This research discloses the results of water quality monitoring applied to tilapia cultivation, as a strategy to detonate tilapia aquaculture in floating cages, in two areas of the reservoir corresponding to the intermediate sector (middle part) of the reservoir and the transition section of the reservoir (upper part). Therefore, physicochemical and biological parameters were evaluated during an annual cycle, taking into account the dry and rainy seasons. times of sthiathiazing and precipitation. The collection of the samples were carried out in three sites located along the dam, taking as reference the curtain area (lower part), the central area (middle part) and the crossing area of both (upper part). The samples were obtained from the surface, the base of the trophogenic zone and the bottom. Sixteen physicochemical and biological parameters were determined in the laboratory. It was established that the dam has a warm water column, with neutral to slightly alkaline waters, well oxygenated with abundant nitrogen forms. The Canadian Water Quality Index (CCME WQI) showed that the dam in general has good water quality and is suitable for the cultivation of tilapia, the physicochemical behavior of the reservoir was determined per the concentrations of total phosphorus (PT), electrical conductivity (EC), nitrites (NO₂-), hydrogen potential (pH), water temperature (Tagua), nitrates (NO₃⁻) and types of chlorophylls.

Keywords: Aquaculture, Zicuirán, Physicochemistry, Seasonal Variation.

4.1.1 INTRODUCCIÓN.

La presa de Zicuirán está ubicada en el Área Natural Protegida de la reserva de la Biosfera de Zicuirán-Infiernillo es uno de los embalses más importantes de Michoacán en el cultivo de tilapia (CONAPESCA, 2006). Las características fisicoquímicas actuales del embalse presentan diferencias en cuanto a los cambios que ha tenido el embalse en la calidad del agua de acuerdo a lo descrito por Romero (1991) y Hurtado (1997) y que son muy próximas a embalses en donde se realizan actividades acuícolas. Las características descritas en la presa derivadora de San Rafael, aguas debajo de la presa de Aguamilpa (Nayarit) (Alvarado et al. 2013); en el embalse la Boquilla (Chihuahua) (Rubio et al. 2014); en Infiernillo (Michoacán) (Rosales, 2015) permitieron establecer que el embalse de Zicuirán es cálido, con una concentración de oxígeno disuelto cercana a 7 mg L^{-1} , aunque destaca un descenso de la concentración conforme aumenta la profundidad. El pH mantiene valores neutros a ligeramente alcalinos. El embalse presenta aguas con una buena concentración de metales alcalinotérreos debido a la geología presente. No obstante, se observó que era necesario analizar variables físicas, químicas y biológicas, que permitieran evaluar la calidad del agua almacenada en el embalse, así como su uso en actividades acuícolas, con base en el Índice de Calidad de Agua (ICA) propuesto por Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME-WQI 2001). Lo anterior con la finalidad de explicar cómo las fluctuaciones de los parámetros fisicoquímicos y biológicos modifican la calidad del agua en los meses de muestreo. Por lo cual el presente estudio aporta información temporal de las variables fisicoquímicas y biológicas, para la determinación de la calidad de agua y su aplicación para establecer sitios de cultivo idóneos para la tilapia *O. niloticus*, en la Presa de Zicuirán, Michoacán. Por lo tanto, se describe la variación de los parámetros en dos periodos: el primero comprende los meses de octubre (2018) a abril (2019) considerado la época de estiaje y el segundo integra los meses de mayo a julio (2019) señalado como época de lluvias.

4.1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1.2.1 Registro de parámetros de campo

Los sitios de muestreo se seleccionaron de la siguiente forma: la estación S1 se localizó en la zona de la compuerta; este sitio se eligió por tener la mayor profundidad. El sitio S2 se ubicó en la zona central del embalse y en las cercanías se localizan jaulas de cultivo de tilapia y el último sitio (S3) se eligió por ser la zona de transición del embalse. En la selección de los sitios de muestreo se consideró la dirección compuerta – Zona de transición y siguió los criterios de Ross *et al.* (2013), se ubicaron tres sitios de referencia a diferentes profundidades, tomando en cuenta los siguientes criterios: a) cantidad de agua en el sitio de muestreo, b) uso de suelo, c) ubicación de zonas con actividad acuícola en el embalse y d) crecimiento algal evidente.

En campo se determinaron 18 parámetros fisicoquímicos y ambientales, entre los cuales destacan la temperatura ambiente (°C), profundidad del cuerpo de agua (m), profundidad a disco de Secchi o transparencia (m), nubosidad (%). La temperatura del agua (°C), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), oxígeno disuelto (mg/L), pH y sólidos disueltos totales (mg/L) fueron determinados con el multiparamétrico, Yellow Springs Instrument (YSI) modelo 6820V2 profesional plus.

4.1.2.2 Toma de muestras para análisis fisicoquímicos y microbiológicos

Para las determinaciones fisicoquímicas y microbiológicas, se tomaron muestras en la columna de agua (superficie, base de la media trofogénica y fondo) a lo largo de un ciclo anual (octubre 2018 – septiembre 2019). Para ello se usó la botella Van Dorn (2 L de capacidad). Las muestras fueron depositadas en garrafas de plástico de alta densidad con sus respectivos datos de campo y se transportaron en obscuridad a 4°C (DOF, 2005) al área de Análisis de Aguas del Laboratorio de Biología Acuática “J. Javier Alvarado Díaz” de la Facultad de Biología de la UMSNH para su respectivo análisis.

4.1.2.3 Determinación de parámetros fisicoquímicos y biológicos

Se determinaron en laboratorio 16 parámetros fisicoquímicos de las 28 variables analizadas, con base en los métodos propuestos en APHA-AWWA-WPCF (1992); entre los cuales destacan: alcalinidad total (mg/L), pH, nitritos (mg/L), demanda bioquímica de oxígeno DBO5 (mg/L), dureza de calcio (mg/L), dureza total (mg/L), dureza de magnesio (mg/L), sulfatos (mg/L), sólidos disueltos totales (mg/L), fósforo total (mg/L), fósforo reactivo (mg/L), sólidos totales (mg/L). Para la determinación de los tipos de clorofila se siguieron los métodos propuestos por Lind (1971) y Contreras (1984). Para definir el uso potencial del agua para el cultivo de tilapia, se utilizaron los límites permisibles para las variables fisicoquímicas, indicadas por los estándares establecidos por el índice de calidad de agua canadiense *CCME-WQI (2001)*

4.1.2.4 Índice de calidad de agua

Para determinar la calidad del agua se empleó el Índice de Calidad de Agua Canadiense (CCME WQI), propuesto por el Canadian Council of Ministers of the Environment (2001). Este índice permite comparar los valores obtenidos de las variables tomadas en cuenta con una referencia determinada, ya que este índice está en función del uso que se le designe al agua del embalse (Valcarcel et al. 2009). Este trabajo se enfoca a las variables fisicoquímicas necesarias para el cultivo de tilapia. El índice se forma de cuatro partes fundamentales: Alcance (1), Frecuencia (2), Amplitud (3) y Excursión (4). El **Alcance** es el número de variables que no cumplen con los estándares propuestos para la calidad de agua y el uso que a esta se le quiera dar.

$$F1 = \left(\frac{\text{No de variables fallidas}}{\text{total de variables}} \right) * 100 \quad (1)$$

La **Frecuencia** es el número de veces que todos los ensayos realizados en laboratorio o en campo no cumplen con los límites establecidos.

$$F2 = \left(\frac{\text{No de pruebas fallidas}}{\text{total de pruebas}} \right) * 100 \quad (2)$$

Excursión es el número de ocasiones que una prueba determinada, tomada por el índice es mayor o menor que el límite establecido para dicho parámetro.

Cuando el valor es mayor al límite establecido:

$$Excursión = \left(\frac{\text{valor límite o especificado}}{\text{valor de la prueba fallida}} \right) - 1 \quad (3)$$

Cuando el valor no debe ser más alto que el límite establecido:

$$Excursión = \left(\frac{\text{valor de la prueba fallida}}{\text{valor límite o especificado}} \right) - 1 \quad (4)$$

Se realiza la sumatoria de las excursiones que están fuera de los límites establecidos y se divide entre el total de todas las pruebas realizadas.

$$NSE = \left(\frac{\sum Excursiones}{\text{total de pruebas}} \right) \quad (5)$$

Amplitud es el número de veces que una prueba determinada no cumple con los estándares establecidos o permisibles, se calculó como una función asintótica, con un rango establecido entre 0 y 100.

$$F3 = \left(\frac{NSE}{0.01NSE + 0.01} \right) \quad (6)$$

El Índice de Calidad de Agua canadiense se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CCMEWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1.732} \right) \quad (7)$$

El divisor 1.732 permite normalizar los valores en un intervalo entre 0 a 100 (Tabla 1), lo cual evita la ponderación entre los valores de las variables y mediante una escala se indican los valores de la calidad del agua:

Tabla 1. Categorización del Índice de Calidad de Agua canadiense

Rango	CCMEWQI
100 a 95	Excelente
94 a 80	Buena
79 a 65	Razonable
64 a 45	Marginal
44 a 0	Pobre

Con base en los requerimientos de la tilapia, se tomaron dieciséis variables físicas y químicas de importancia para establecer y mantener un cultivo óptimo de esta especie (Tabla 2). Estos parámetros se seleccionaron ya que afectan principalmente las funciones metabólicas de la especie y las cuales, si no se encuentran en los intervalos establecidos afectan las funciones fisiológicas, aumentar la sensibilidad a enfermedades, lo que disminuye la tasa de crecimiento (Baltazar y Palomino, 2002). Dado que las jaulas de cultivo de la tilapia se colocan a una profundidad máxima de 5 metros (Rosales, 2015), en la determinación de la calidad del agua solo se consideraron los valores obtenidos de superficie y la base de la zona trofogenica (\pm de 4 a 6 metros). La referencia para establecer los criterios de máximos y mínimos permisibles de cada variable se tomaron de Rosales (2015), los cuales se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Intervalos óptimos de variables fisicoquímicas para el cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*).

Variable	Intervalo optimo
Temperatura °C	22 a 38 °C
Salinidad ‰	0 a 10 ‰
pH	6.5 a 9.0 mg L ⁻¹
Oxígeno disuelto	4 a 7 mg L ⁻¹
Dureza total	20 a 350 mg L ⁻¹
Dureza de calcio	5 a 350 mg L ⁻¹
Dureza de magnesio	0 a 36 mg L ⁻¹
Alcalinidad total	54 a 200 mg L ⁻¹
Fósforo reactivo	0.5 a 1.5 mg L ⁻¹
Fosforo total	0.01 a 3.0 mg L ⁻¹
N-Nitritos	> 0.45 mg L ⁻¹
N-Nitratos	> 400 mg L ⁻¹
N-Amonio	0.015 a 5.0 mg L ⁻¹
Sulfatos	0 a 500 mg L ⁻¹
Solidos Disueltos Totales	0 a 400 mg L ⁻¹

4.1.2.5 Análisis de datos

La información se trató con estadística descriptiva, análisis de varianza y pruebas de hipótesis (análisis de Ji cuadrada (X^2) y prueba t de Student), a través del programa Microsoft Excel y JMP versión 11 Statistical Discovery. Para identificar el comportamiento de las variables fisicoquímicas y biológicas que presentan los meses de muestreo, se efectuó un análisis de componentes principales (ACP) con el programa JMP 11 Statistical Discovery

4.1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.3.1 Indicadores fisicoquímicos de importancia para el desarrollo de la tilapia (*Oreochromis niloticus*)

En los tres sitios de muestreo del embalse presentaron una temperatura máxima de 31.6 °C en junio (verano), mientras que la temperatura mínima registrada fue de 23.6 °C en el mes de enero (invierno), con un promedio general de superficie a fondo de 28.4 °C (Figura 2).

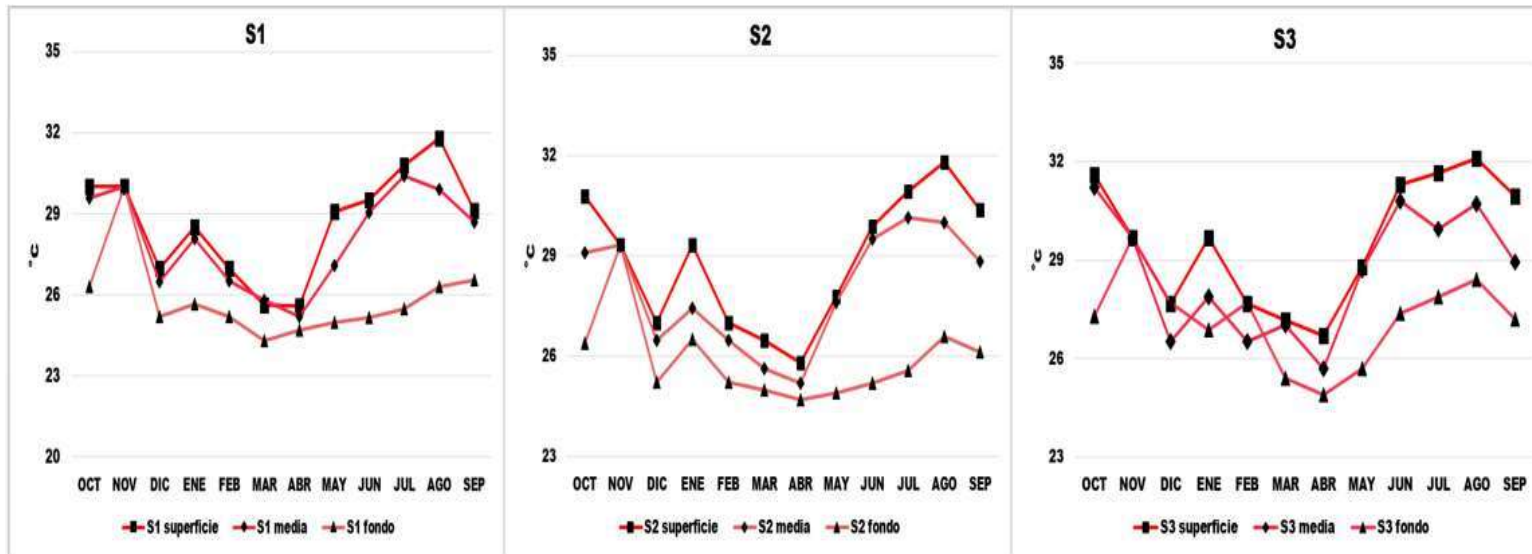


Figura 2. Variación temporal de la temperatura del agua en los sitios de muestreo de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

El intervalo térmico reportado por Romero (1991) y Hurtado (1997), presentó una temperatura promedio menor a 30°C y coincidió en que el embalse presenta un solo movimiento de convección durante todo el año, el cual ocurre de noviembre a mayo (figura 3). Este comportamiento de la temperatura del agua es similar a otros cuerpos de agua cálidos como lo reportado en la presa derivadora San Rafael (Alvarado *et al*, 2013), en la presa la Boquilla (Rubio *et al*, 2014) y en el “Infiernillo” (Rosales 2015). Los embalses Infiernillo y la son aptos para el cultivo de tilapia.

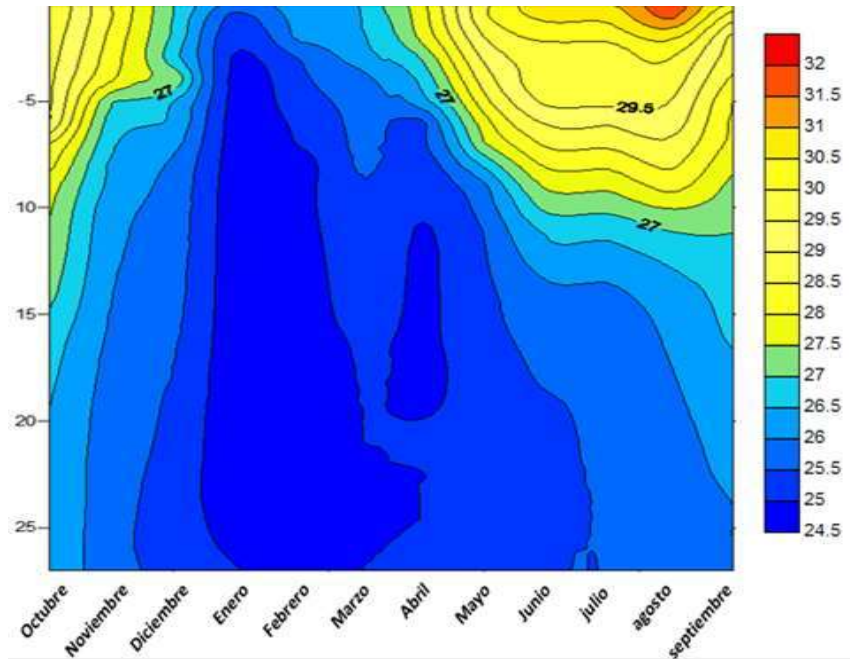


Figura 3. Distribución vertical de la temperatura en la columna de agua en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

En cuanto al análisis estadístico para la temperatura se presentan diferencias estadísticas significativas entre los sitios S1 y S2 del embalse durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 40.0331$, $gdl= 8$, $P > \chi^2= 0.0001$) y entre la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) durante los meses de noviembre a abril (Figura 4).

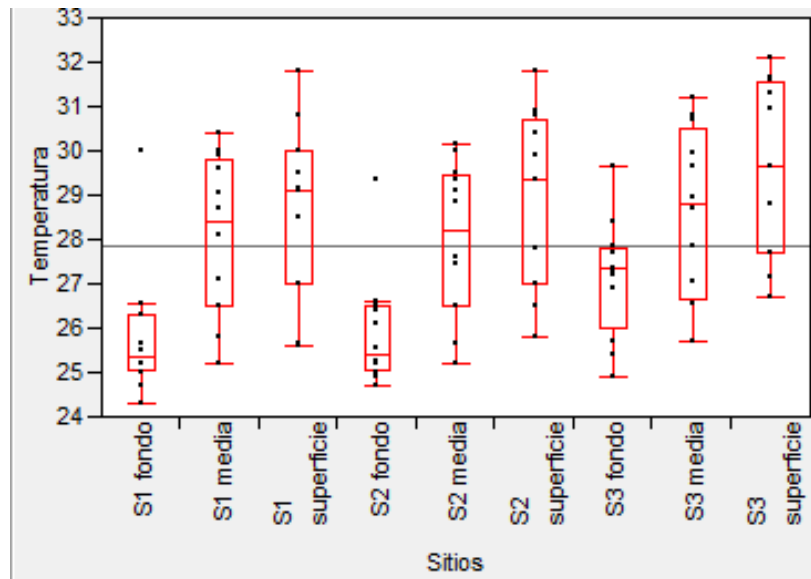


Figura 4. Valores de distribución de la temperatura (°C) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

El embalse presenta concentraciones de oxígeno que llegan a 8.5 mg L⁻¹ en la superficie y con un hipolimnion hipóxico con concentraciones menores a los 2 mg L⁻¹ durante el periodo de muestreo. La presa de Zicuirán en los tres sitios estudiados presenta una concentración de oxígeno máxima de 10.0 mg L⁻¹ en la superficie en agosto (verano), mientras que la concentración mínima registrada es fue 2.5 mg L⁻¹ en noviembre (invierno) con un promedio general de 5.6 mg L⁻¹ (Figura 5).

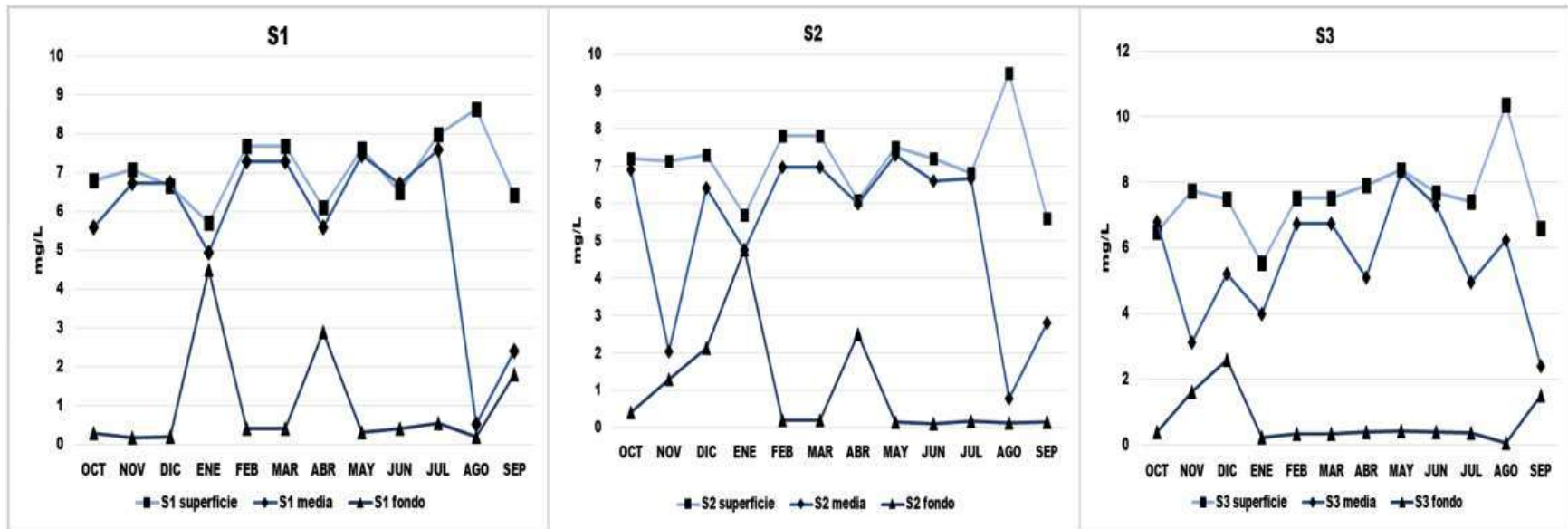


Figura 5. Variación espacial del oxígeno disuelto en los sitios de muestreo de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

En general el embalse presenta una buena concentración de oxígeno tanto en el epilimnion como en la zona trofogénica, sin embargo, es notable el registro de hipoxia y anoxia en el fondo del embalse. Trabajos previos observaron que en la zona transicional y lacustre (sitios S2 y S3) se presenta una mínima variación de oxígeno disuelto entre la superficie y el fondo (Romero 1991 y Hurtado 1997), no obstante, en la presente investigación se reportó una marcada variación en la distribución del oxígeno, debido a la época de lluvias y al proceso de fotosíntesis. Así mismo se documenta que el déficit de oxígeno (figura 10), se incrementó debido al aumento de material orgánico e inorgánico en el sedimento, donde la comunidad bacteriana lo oxida y genera condiciones hipóxicas (Margalef, 1983). Lo que coincide con Rubio *et al.* (2014) y Rosales (2015), quienes reportaron valores cercanos a cero de oxígeno disuelto (OD) en el hipolimnion de sus respectivos embalses.

En cuanto al análisis estadístico para el oxígeno disuelto, se evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre los sitios S1 y S2 del embalse durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 75.74$, gdl= 8, $P > \chi^2= 0.0002$) y entre la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) existen diferencias significativas durante los meses de noviembre a febrero (Figura 6).

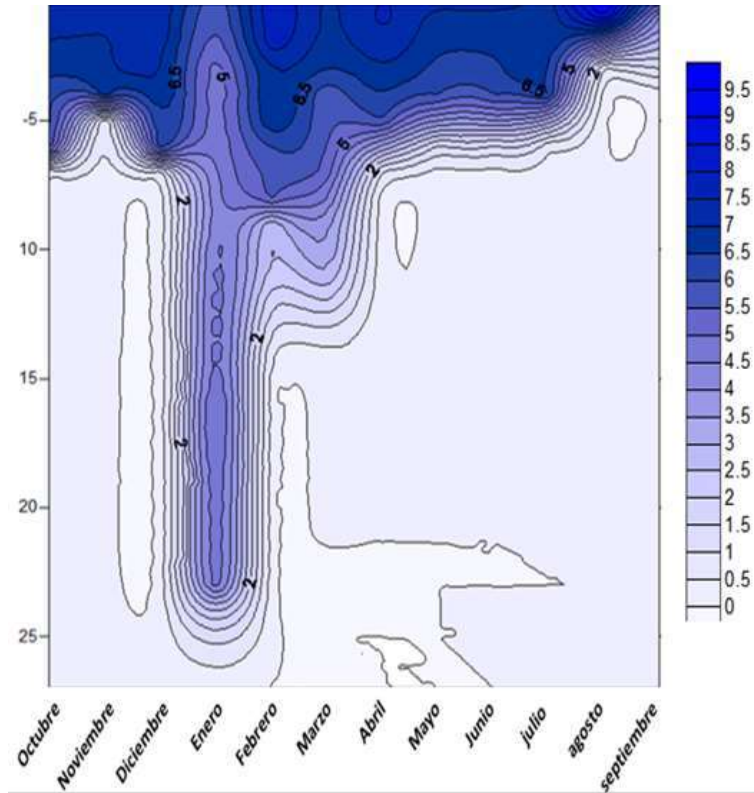


Figura 6. Distribución vertical del oxígeno disuelto en la columna de agua en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

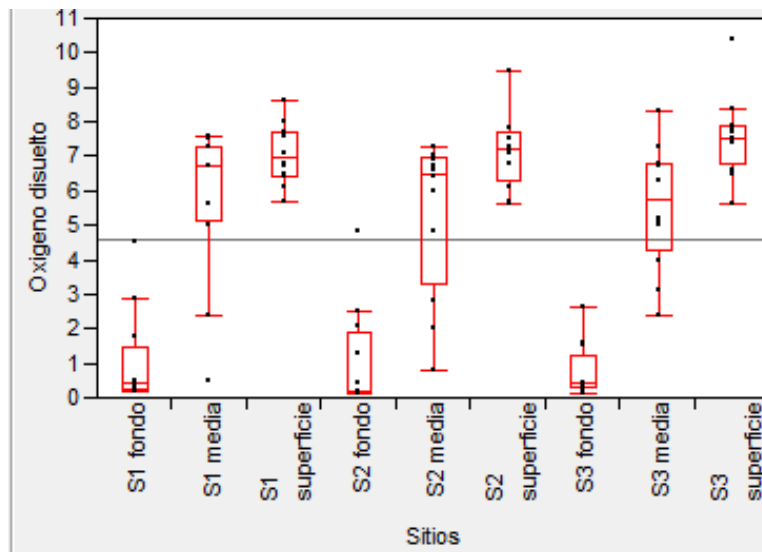


Figura 7. Valores de distribución del oxígeno disuelto (mg L^{-1}) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México

El agua de la presa Zicuirán evidenció pH de neutro a ligeramente básico. Para los tres sitios de muestreo, se presentó un pH máximo de 9.0 en mayo (verano) y un mínimo 6.5 en los meses de julio y septiembre; el promedio general fue de 7.57 (Figura 8).

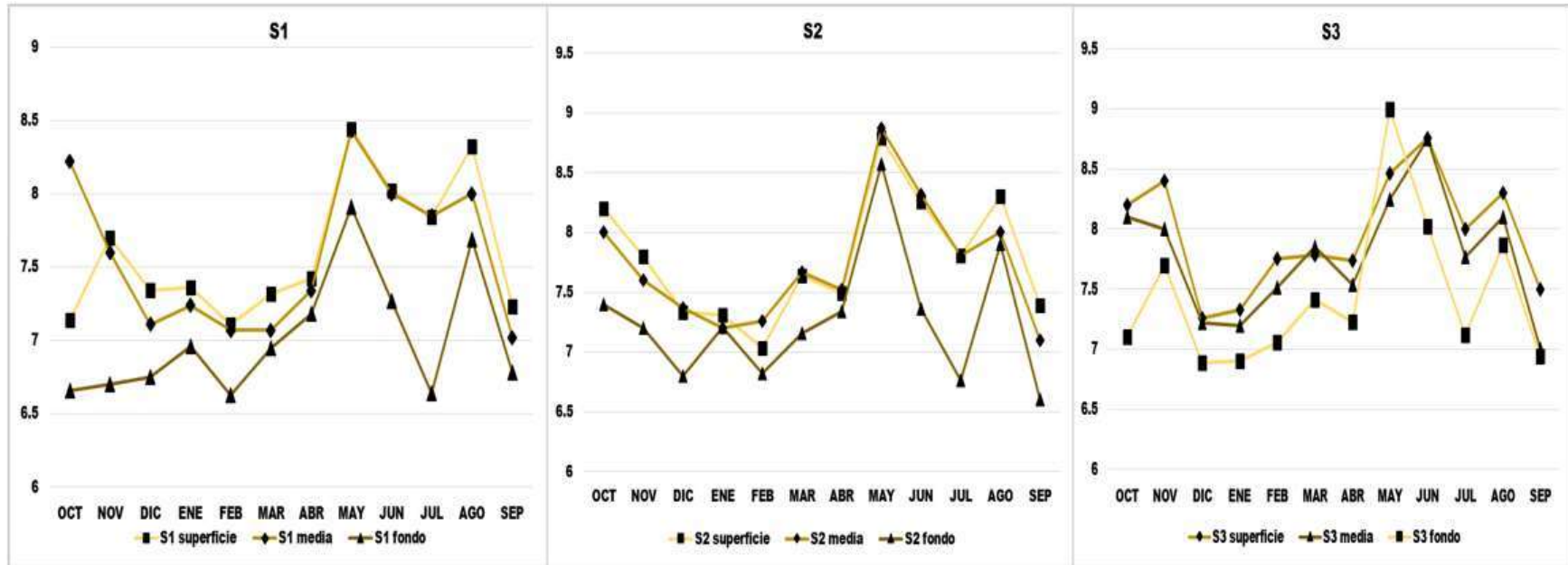


Figura 8. Variación temporal del pH en el sitio S1 en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

El desarrollo de condiciones ácidas en el fondo del embalse refleja procesos de descomposición de material orgánico, los cuales en ausencia de oxígeno indican una vía reductiva (Sardiñas *et al.* 2006; Bustamante *et al.*, 2008; Awang *et al.* 2015). En la superficie de la columna del agua, se registra un pH básico, particularmente en el mes de mayo, esto se atribuye a que ésta capa presenta una mayor reserva de bicarbonatos que permite un amortiguamiento del sistema buffer (Margalef, 1983). El análisis estadístico para pH mostró diferencias estadísticas significativas entre los sitios S1 y S2 del embalse durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 28.3079$, $gdl= 8$, $P > \chi^2= 0.0004$) y entre la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) existen diferencias significativas durante los meses de noviembre a febrero y de mayo a septiembre (Fig. 9).

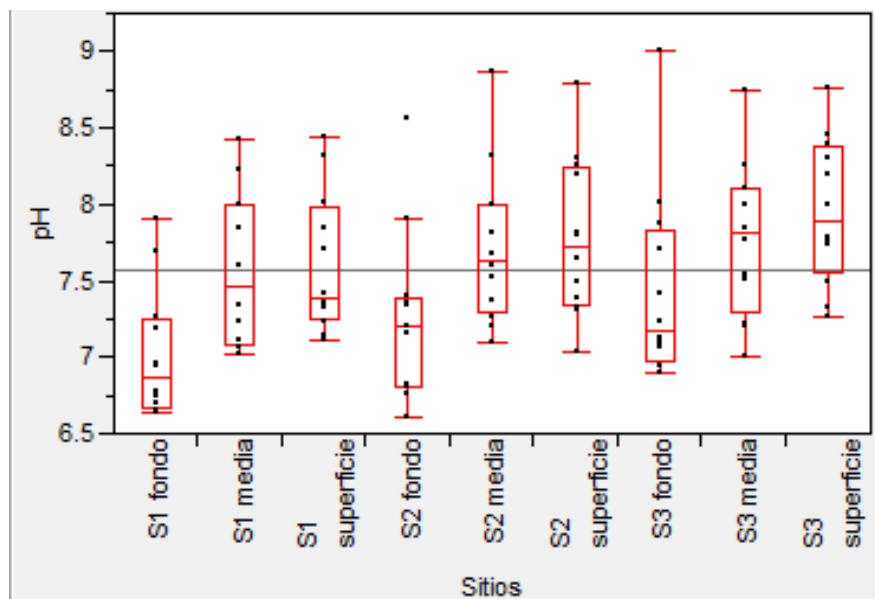


Figura 9. Valores de distribución del pH presente durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

La presa de Zicuirán, en los tres sitios de muestreo presenta una alcalinidad total máxima de 147.2 mg L⁻¹ en mayo (verano), mientras que la concentración de carbonatos mínima registrada es de 110 mg L⁻¹ de octubre, noviembre diciembre registrados en el hipolimnion (Figura 10). Esta alcalinidad total está acorde a la tabla de clasificación propuesta por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA). Menciona que las aguas naturales con buena amortiguación presentan una cantidad considerable de metales alcalinotérreos (Thi Bich *et al*, 2020). El agua presente en el embalse se considera con buena amortiguación por presentar esta característica química debido a la geología presente en el lugar (Bouaroudj *et al*, 2019). La alcalinidad total en Zicuirán alcanzó el punto más bajo en la estratificación tardía, mientras que en la estratificación temprana se midió la mayor reserva alcalina. Hurtado (1997) en la zona transicional (S3) registraron variaciones de la alcalinidad total en superficie de 15 mg L⁻¹ con respecto al fondo en el periodo de mezcla a inicios de invierno y al inicio de la estratificación en verano

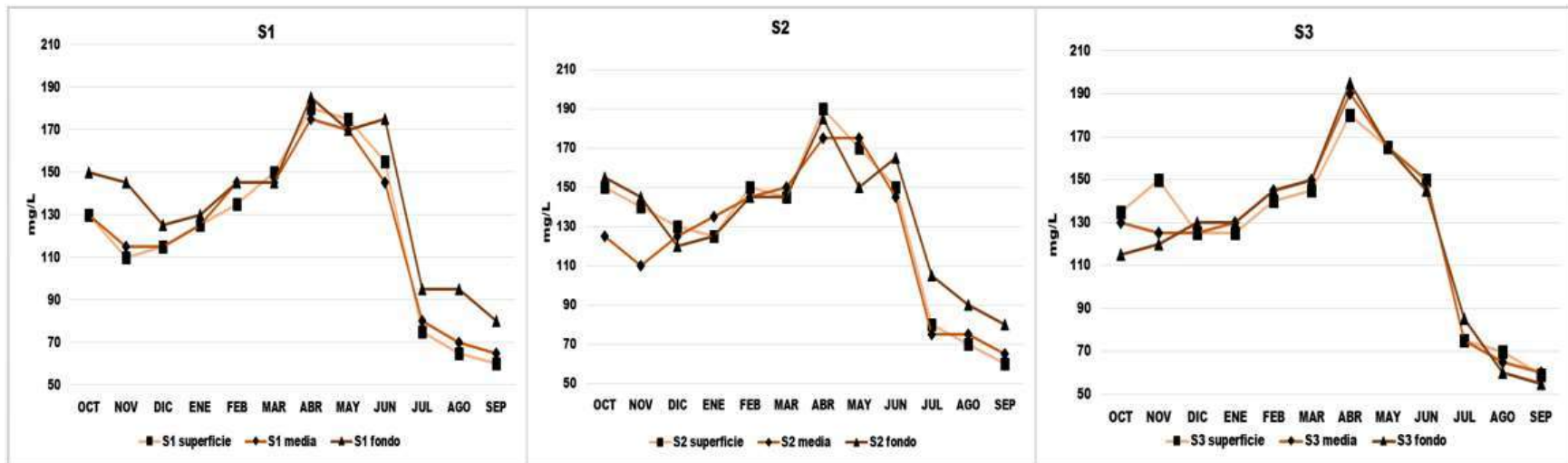


Figura 30. Variación temporal de la alcalinidad total en los sitios de muestreo de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

El análisis estadístico para la alcalinidad total resultó en homogeneidad entre los sitios S1 y S2 para el periodo de muestreo ($\chi^2 = 1.9550$, $gdl = 8$, $P > \chi^2 = 0.9812$) y así como para la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) (Figura 11).

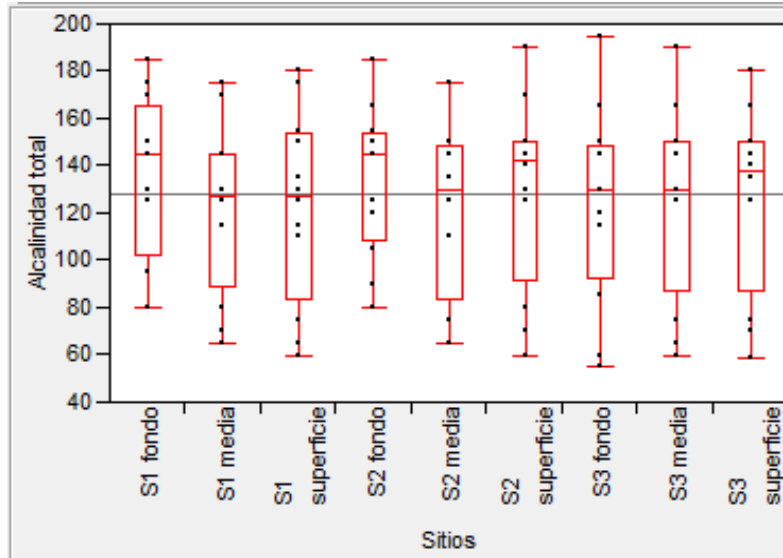


Figura 41. Valores de distribución de la alcalinidad total (mg L^{-1}) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

4.1.3.2 Comportamiento fisicoquímico y biológico en el periodo de muestreo

El embalse presentó un comportamiento distinto entre los meses de muestreo. El ACP indicó que los parámetros que explicaron esta variación fueron: Temperatura del agua (T agua), conductividad eléctrica (CE), pH, oxígeno disuelto (OD), fósforo total (FT), nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^-), dureza total (DT), dureza de magnesio (DMg), transparencia (transparencia) y salinidad (salinidad). En su conjunto la variación proporcionada por los primeros tres componentes explica 81.4 % de la variación de las muestras; el primer componente tiene un porcentaje de 46.4 % de explicación, representado por T agua, pH, DT y DMg de manera positiva, el segundo eje adiciona 20.1 %, conformado por FT, Fr, pH, ATotal de forma positiva y de manera negativa la CE y pH, mientras que el tercer componente aporta 14.99 % de la variación, integrado por pH, NO_3 los SO_3 (Tabla 3).

Principal Components / Factor Analysis			
Principal Components: on Correlations			
Eigenvalue	6.4904	2.8112	2.0989
Percent	46.3601	20.0801	14.9921
Cum Percent	46.3601	66.4402	81.4323
Eigenvectors			
transparencia	0.05854	-0.45553	-0.05092
T agua	0.18615	-0.35940	-0.32247
CE	0.32347	-0.31789	-0.00840
pH	0.32353	-0.25156	0.17189
FT	-0.33564	0.15037	0.15686
Fr	-0.19642	0.16149	0.46625
DT	0.36085	0.15654	0.18900
DMg	0.32047	0.18958	0.30926
NO3	0.09854	0.38277	-0.44071
ATotal	0.31466	0.32748	0.10076
salinidad	0.36670	0.08889	-0.01243
SO3	0.33511	0.08535	0.16488
CT	0.10274	0.32135	-0.50864
CF	-0.05148	-0.13287	-0.00424

Tabla 3. Análisis de Componentes Principales post hoc.

Los resultados obtenidos del análisis de correlación entre las variables mostraron que las variables que explican la modificación de la calidad de agua en los meses de muestreo son: PT, CE, T agua, pH, FT, Fr, DT, DMg, ATotal y la salinidad (Figura 12).

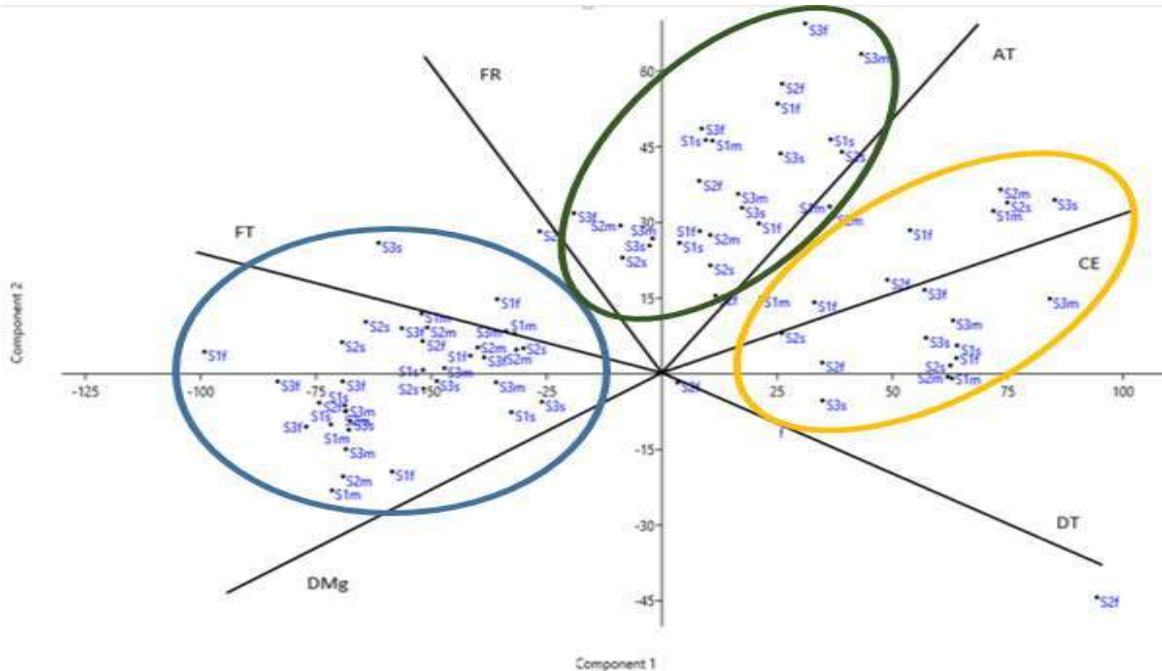


Figura 12. Análisis de componentes principales (ACP) entre sitios y variables fisicoquímicas y biológicas en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

La conductividad eléctrica tuvo una relación positiva con la temperatura del agua ($r^2=0.8844$, $P<0.0001$). Por lo que esta es directamente proporcional con la cantidad de minerales disueltos en el embalse y depende de las condiciones y factores ambientales (disolución iónica, temperatura ambiente, precipitación, entre otros). Asimismo, las actividades antropogénicas (descargas de agua residual doméstica y de riego) presentaron una correlación inversamente proporcional entre la temperatura del agua y la concentración de PT ($r^2= -0.3356$, $P<0.0001$).

Estos resultados coinciden con Rosales (2015) quien también determinó la misma relación inversa. Mientras tanto, las concentraciones de PT y PR se asocian a procesos de mezcla invernal de la columna del agua generada por eventos de convección (Lewis, 2000). Por otro lado, los nitratos presentaron valores máximos en el periodo de muestreo, debido a los procesos de descomposición de la materia orgánica (Hoy *et al*, 2008).

4.1.3.3 Índice de calidad de agua (ICA)

El ICA (CCME WQI), con base en las necesidades fisiológicas de la tilapia, los parámetros seleccionados afectan directamente el metabolismo, funciones bioquímicas y su deficiencia causa daños en estructuras fisiológicas tanto externas como internas, aumenta la vulnerabilidad a enfermedades y disminuye su tasa de crecimiento (Rosales 2015, Baltazar y Palomino, 2002). Cabe resaltar que en la determinación de la calidad del agua solo se consideraron los valores obtenidos de superficie y la base de la zona trofógena, dado que la jaula del cultivo de tilapia se encuentra a una profundidad máxima de 5 metros (Rosales, 2015).

La presa de Zicuirán presenta en general una calidad de agua considerada por la escala del índice como “buena” con un valor de ICA promedio de 89.5 durante los meses de muestreo (tabla 5). El valor mínimo fue registrado en el sitio S1 en la zona trofógena con un valor de 76.5 en el mes de noviembre, el valor máximo registrado fue de 93.2 en el sitio S2 en la zona trofógena. El sitio S1, el ICA mínimo registrado fue 76.5 en la zona intermedia de la columna (noviembre), el máximo fue 78.6 en la zona superficial (agosto), con un promedio de 88.5 (Figura 21).

En el sitio S2, durante el periodo de muestreo, el ICA mínimo fue 76.5 en la zona media de la columna en noviembre; el máximo fue 92.8 (Figura 22) en el metalimnion, en junio, con el ICA promedio de 88.5. El sitio S3 registró un ICA mínimo en la superficie de 80.5 en julio, en tanto que el máximo registrado fue 92.8 en septiembre en el metalimnion y el promedio para el periodo de muestreo fue 88.3 (Figura 13).

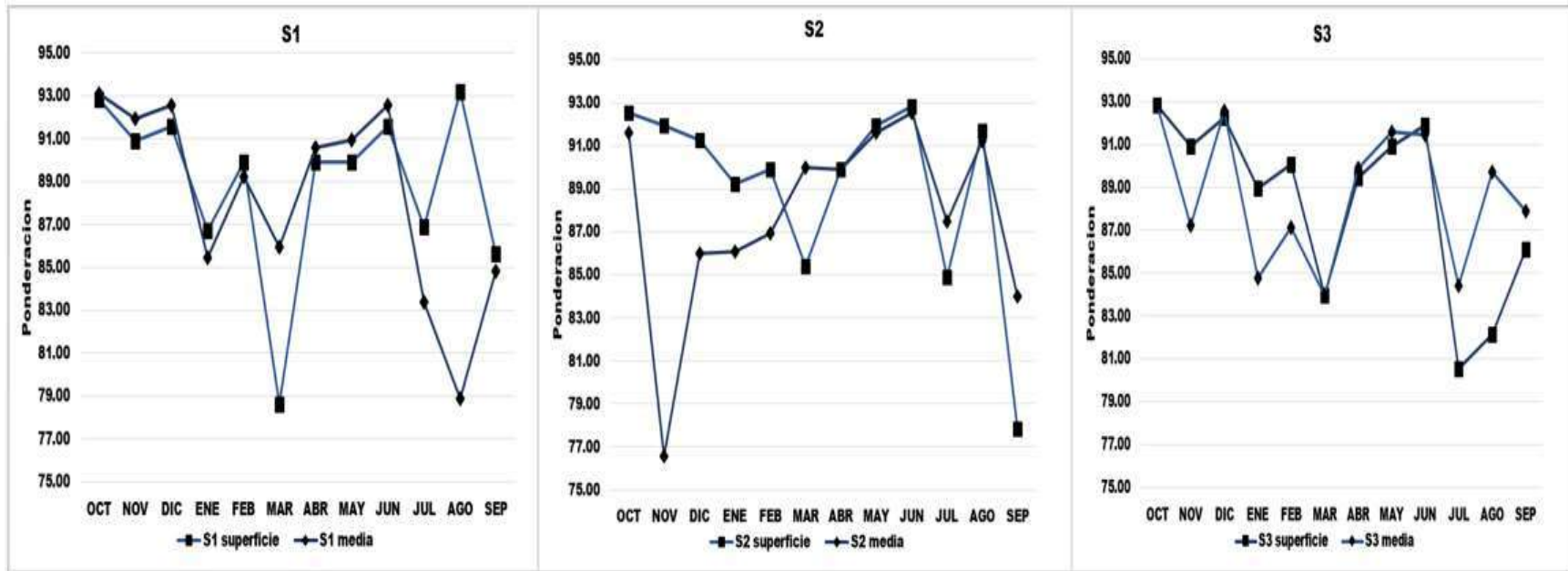


Figura 13. Variación temporal del Índice de calidad de agua en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

El análisis estadístico para el ICA no mostró diferencias estadísticas entre los sitios S1 y S2 de la presa de Zicuirán durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 1.0763$, gdl= 4, $P > \chi^2= 0.9562$) (Figura 14).

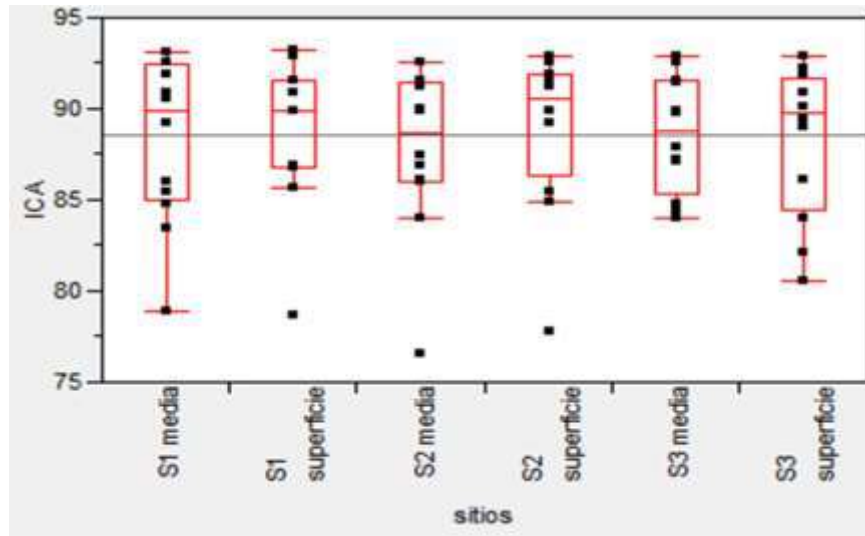


Figura 14. Valores temporales de distribución del índice de calidad de agua presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

El ICA (CCME WQI) indicó una tendencia de *buena* calidad de agua durante el periodo de muestreo, con un valor de 89.5 (Tabla 5). Esto indica que la columna de agua tiene condiciones adecuadas para el cultivo de tilapia, considerando la parte del epilimnion y metalimnion. Así mismo la calidad del agua no es *excelente* debido a la presencia del ion magnesio, los sólidos disueltos totales y formas de nitrógeno (NO_2 y NO_3). La concentración de los sólidos disueltos totales fue significativamente superior ($F = 15.51$, $P < 0.0001$) entre la época de estiaje (octubre – abril) y la época de precipitación (mayo – septiembre).

Las variaciones temporales del ICA concuerdan con los trabajos previos realizados en el embalse San Rafael, Nayarit (Alvarado *et al*, 2013), en la Presa “El infiernillo”, Michoacán (Sánchez *et al*, 2013) ya que usaron el índice de calidad de agua de León Vizcaíno (1991). En ellos se reportó que la calidad del agua de La presa derivadora de San Rafael presentó una ponderación de 70, mientras que en el caso de “El infiernillo”, la calidad del agua osciló entre 70 y 80. Para ambos embalses la calidad de agua fue

excelente y para los criterios de clasificación del ICA son aguas aptas para la pesca y la vida acuática abundante. Por su parte cuando se aplicó el ICA (CCME-WQI 2001) en el embalse “El infiernillo”, Michoacán se reportó que su calidad del agua osciló entre 83 y 85 y según los criterios de ponderación de este índice el agua del embalse es apta para el cultivo de tilapia. El nivel de precisión de los índices es diferente debido a que la ecuación de León Vizcaíno toma referencias muy generales del comportamiento de la calidad de agua y el ICA tiene más exactitud, ya que se concentra en el estudio de los parámetros fisicoquímicos para cada especie. Por ello este índice cuenta con una alta robustez estadística y no da ponderaciones por parámetro medido (Tunas, 2014).

Tabla 4. Cálculos para la determinación de la calidad del agua, en la presa Zicuirán, Michoacán

Mes	% de variables fallidas	% de pruebas fallidas	Valor CCME WQI
Octubre	13.3	11.1	89.2
Noviembre	13.3	15.6	83.8
Diciembre	13.3	11.9	88.5
Enero	14.32	18.9	86.9
Febrero	13.8	12.1	88.9
Marzo	22.19	19.8	84.6
Abril	13.3	11.1	89.9
Mayo	13.3	15.6	91.1
Junio	11.5	9.8	92.0
Julio	22.19	19.8	84.6
Agosto	24.8	20.4	87.8
Septiembre	21.94	18.9	84.4

4.1.4 LITERATURA CITADA

- APHA – AWWA - WPCF. 1998. *Methods for the Examination of Water*. 20TH edition. American Public Health Association (APHA), American Methods Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF) USA.
- Alvarado Espinoza, M., Sánchez Rodríguez, M., Calvario Martínez, O. (2013). *Evaluación de la Calidad del Agua para el Cultivo de Tilapia en la Presa Derivadora San Rafael, Nayarit*. 1–11.
- Álvarez-Silva, C., Del Rocío Torres-Alvarado, M. (2013). Composition and abundance of zooplankton from coyuca lagoon, guerrero, Mexico. *Hidrobiologica*, 23(2), 241–249.
- Awang, H., Daud, Z., Hatta, M. Z. M. (2015). Hydrology Properties and Water Quality Assessment of the Sembrong Dam, Johor, Malaysia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2868–2873. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.409>
- Azapagic, A. y Perdan, S. (2005). An integrated sustainability decision-support framework Part II: Problem analysis. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 12(2), 112–131. <https://doi.org/10.1080/13504500509469623>
- Bao, L., Li, X., Cheng, P. (2018). Phosphorus retention along a typical urban landscape river with a series of rubber dams. *Journal of Environmental Management*, 228(September), 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.019>

- Bao, Y., Gao, P., He, X. (2015). The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir - A unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 150, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.005>
- Beltr, R., y Bustos, G. A. (n.d.). *Diagnóstico limnológico y pesquero de los principales embalses de sinaloa*. 95 pp.
- Boas, I., Biermann, F., Kanie, N. (2016). Cross-sectoral strategies in global sustainability governance: towards a nexus approach. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 16(3), 449–464. <https://doi.org/10.1007/s10784-016-9321-1>
- Bouaroudj, S., Menad, A., Bounamous, A., Ali-Khodja, H., Gherib, A., Weigel, D. E., & Chenchouni, H. (2019). Assessment of water quality at the largest dam in Algeria (Beni Haroun Dam) and effects of irrigation on soil characteristics of agricultural lands. *Chemosphere*, 219, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.193>
- Bustamante Toro, C. A., Monsalve Durango, E. A., & García Reinoso, P. L. (2008). Análisis de la calidad del agua en la cuenca media del río Quindío con base en índices físicos, químicos y biológicos Analysis of the water quality at the intermediate river basin of the Quindío river on the basis of physical, chemical and biological inde. *Revista de Investigaciones Universidad Del Quindío*, 18, 22–31.
- Cao, H., Recknagel, F., Joo, G. J., & Kim, D. K. (2006). Discovery of predictive rule sets for chlorophyll-a dynamics in the Nakdong River (Korea) by means of the hybrid evolutionary algorithm HEA. *Ecological Informatics*, 1(1), 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2005.08.001>

- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)
- Choi, J. W., Han, J. H., Park, C. S., Ko, D. G., Kang, H. Il, Kim, J. Y., Yun, Y. J., Kwon, H. H., An, K. G. (2015). Nutrients and sestonic chlorophyll dynamics in Asian lotic ecosystems and ecological stream health in relation to land-use patterns and water chemistry. *Ecological Engineering*, 79, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.03.006>
- CONAGUA. (2016). *Nacional títulos y volúmenes de aguas nacionales y bienes inherentes por uso de agua*. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/nacional.pdf>
- Daniela, M., Jacqueline, Q., Armando, L. (2010). Metodos para identificar , diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS* 78, 25–33.
- Diario Oficial de la Federación. (2020). *Ley de Aguas Nacionales, 6 de enero de 2020*. 91.
- Ding, S., Chen, P., Liu, S., Zhang, G., Zhang, J., Dan, S. F. (2019). Nutrient dynamics in the Changjiang and retention effect in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 574(April), 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.034>
- Duineveld, G. C. A., y Boon, A. R. (2002). Short-term variations in the fluxes and composition of seston in near-bottom traps in the southern North Sea. *Helgoland Marine Research*, 56(2), 140–148. <https://doi.org/10.1007/s10152-001-0091-x>

- Arroyo. S, L., Hernández M, R., del Rosario. O., Murillo, M., Hurtado A, A., Martínez M, M. (2018). *Nutritional limitation and trophic state of Cuitzeo Lake, Michoacán, México.* 9(21), 897–918.
- Estudios, M., En, R., & Filtros, P. D. E. (2007). Revista AIDIS. *Planta*, 8(1), 44–56.
- FAO. (2016). FAO yearbook. Fisheries and Aquaculture Statistics 2016/FAO annuaire. Statistiques des pêches et de l'aquaculture 2016/ FAO anuario. Estadísticas de pesca y acuicultura 2016. In *Fao*. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.50-5350>
- Hoy, C. W., Grewal, P. S., Lawrence, J. L., Jagdale, G., Acosta, N. (2008). Canonical correspondence analysis demonstrates unique soil conditions for entomopathogenic nematode species compared with other free-living nematode species. *Biological Control*, 46(3), 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.06.001>
- Huerta, L. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos La Huerta , Jalisco Clave geoestadística 14043 Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos.*
- Ingle de la Mora, G., Villareal Delgado, E. L., Arredondo Figueroa, J. L., Ponce Palafox, J. T., & Barriga Sosa, I. de los A. (2003). Evaluation of some water quality parameters in a closed aquaculture recirculating-water system, submitted to different loads of fish. *Hidrobiológica*, 13(4), 247–253.
- Jago, C. F., Jones, S. E., Latter, R. J., McCandliss, R. R., Hearn, M. R., Howarth, M. J. (2002). Resuspension of benthic fluff by tidal currents in deep stratified waters, northern North sea. *Journal of Sea Research*, 48(4), 259–269. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(02\)00181-8](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(02)00181-8)

- Jeswani, H. K., Burkinshaw, R., Azapagic, A. (2015). Environmental sustainability issues in the food-energy-water nexus: Breakfast cereals and snacks. *Sustainable Production and Consumption*, 2(July), 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.08.001>
- Jones, S. E., Jago, C. F., Bale, A. J., Chapman, D., Howland, R. J. M., Jackson, J. (1998). Aggregation and resuspension of suspended particulate matter at a seasonally stratified site in the southern North Sea: Physical and biological controls. *Continental Shelf Research*, 18(11), 1283–1309. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(98\)00044-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(98)00044-2)
- Kapetsky, J. M., Aguilar-Manjarrez, J., Jenness, J. (2013). A global assessment of offshore mariculture potential from a spatial perspective. In *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*.
- Kimambo, O. N., Chikoore, H., Gumbo, J. R., Msagati, T. A. M. (2019). Retrospective analysis of Chlorophyll-a and its correlation with climate and hydrological variations in Mindu Dam, Morogoro, Tanzania. *Heliyon*, 5(11), e02834. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02834>
- Lee, K., Matsuno, T., Endoh, T., Ishizaka, J., Zhu, Y., Takeda, S., Sukigara, C. (2017). A role of vertical mixing on nutrient supply into the subsurface chlorophyll maximum in the shelf region of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 143(October), 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.11.001>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., Krishnakumar, S. (2017). Geospatial analysis of dissolved nutrients dataset in the surface water of Karayar reservoir, Southern India. *Data in Brief*, 13, 575–581. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.06.037>

- McCandliss, R. R., Jones, S. E., Hearn, M., Latter, R., Jago, C. F. (2002). Dynamics of suspended particles in coastal waters (southern North Sea) during a spring bloom. *Journal of Sea Research*, 47(3–4), 285–302. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(02\)00123-5](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(02)00123-5)
- Moreta, J. (2008). La Eutrofización De Los Lagos Y Sus Consecuencias. Ibarra 2008. *Books.Google.Com*, 52(4), 829–837. http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2377/2/ResumenEjecutivo.pdf%0Ahttps://www.academia.edu/1439928/La_eutrofización_de_los_lagos_y_sus_consecuencias._Ibarra_2008%0Ahttp://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2637/1/TESIS.pdf
- Nicovita. (2013). Manual de Crianza Tilapia. *Nicovita*, 49. [http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual de crianza de tilapia.pdf](http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual%20de%20crianza%20de%20tilapia.pdf)
- Pacetti, T., Lombardi, L., Federici, G. (2015). Water-energy Nexus: A case of biogas production from energy crops evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods. *Journal of Cleaner Production*, 101, 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.084>
- Pei, S., Laws, E. A., Zhu, Y., Zhang, H., Ye, S., Yuan, H., Ding, X. (2019). Nutrient dynamics and their interaction with phytoplankton growth during autumn in Liaodong Bay, China. *Continental Shelf Research*, 186(June), 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.07.012>
- Rodríguez, G, R., Martínez, M, C., Hernández, V, D., De Lucas, V, J., Acevedo de Pedro, M. L. (2003). Quality of the spring fountain water in the basic healthcare area of Sigüenza, Spain. *Revista Espanola de Salud Publica*, 77(3), 423–432. <https://doi.org/10.1590/s1135-57272003000300012>

- Roriz, G. D., Delphino, M. K. de V. C., Gardner, I. A., Gonsalves, V. S. P. (2017). Characterization of tilapia farming in net cages at a tropical reservoir in Brazil. *Aquaculture Reports*, 6, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.03.002>
- Rosas, J. L., Ávila, H., Sánchez, A., Rosas, A. Y., García, S., Sampedro, L., Granados, J. G., Juárez, A. L. (2014). Índice BMWP, FBI y EPT para determinar la calidad del agua en la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(2), 82–88.
- Ross, L. G., Telfer, T. C., Falconer, L., Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J. (2013). Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture. In *FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 21* (Issue December).
- Rubio, O., Carlos, R., Ortiz, R., Quintana, R., Saucedo, A., Ochoa, J., Rey, N. (2014). Índice De Calidad De Agua (Ica) En La Presa La Boquilla En Chihuahua, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(2), 139–150. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000200005%0Ahttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200790282014000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=en%0Ahttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S20
- Saavedra Martínez, M. (20 C.E.). Manejo del cultivo de tilapia. Managua, Nicaragua. *Manual*, 1–27.
- Sánchez-Chávez, J., Bravo-Inclán, L., Tomasini-Ortiz, C., Bernal-Brooks, F. (2011). Calidad del agua del Lago de Pátzcuaro. In *Estudio Ecosistémico del Lago de Pátzcuaro: Aportes en gestión ambiental para el fomento del desarrollo sustentable* (p. 308).

- Sardiñas, O., Chiroles, S., Fernández, M., Hernández Yusaima, Pérez, A. (2006). Evaluación físico-química y microbiológica del agua de la presa El Cacao (Cotorro, Cuba). *Sanid. Ambient. Higiene y Sanidad Ambiental*, 6(6), 202–206.
- SARH, SSA, CFE, LANFI. (1992). Norma Mexicana NMX-AA-14-1980 “Cuerpos receptores.- Muestreo.” *Diario Oficial de La Federación*, 2–5.
- Schneider, S. C., Biberdžić, V., Braho, V., Gjoreska, B. B., Cara, M., Dana, Z., Đurašković, P., Eriksen, T. E., Hjermann, D., Imeri, A., Jovanović, K., Krizmanić, J., Kupe, L., Loshkoska, T., Kemp, J. L., Marković, A., Patceva, S., Rakočević, J., Stojanović, K., ... Vermaat, J. E. (2020). Littoral eutrophication indicators are more closely related to nearshore land use than to water nutrient concentrations: A critical evaluation of stressor-response relationships. *Science of The Total Environment*, 748, 141193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141193>
- Schneider, S. C., Cara, M., Eriksen, T. E., Budzakoska Goreska, B., Imeri, A., Kupe, L., Lokoska, T., Patceva, S., Trajanovska, S., Trajanovski, S., Talevska, M., & Veljanoska Sarafiloska, E. (2014). Eutrophication impacts littoral biota in Lake Ohrid while water phosphorus concentrations are low. *Limnologica*, 44, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2013.09.002>
- Thi Bich, V. D., Urban, W., Hazra, S. B. (2020). Introducing the modification of Canadian water quality index. *Groundwater for Sustainable Development*, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100457>
- Tunas, L. (2014). Índice canadiense de calidad de las aguas para la cuenca del río Naranjo, provincia Las Tunas, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(3), 11–16.

- Valcarcel, L. R., Alberro, N. M., Frías, D. (2009). El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. *Medio Ambiente y Desarrollo; Revista Electrónica de La Agencia de Medio Ambiente*, 16, 1–5. http://www.ciesas.edu.mx/cee_xalapa/Informedegestionareassustantivas/Proyectosinstitucionales/aha.pdf
- Zhao, C., Maerz, J., Hofmeister, R., Röttgers, R., Wirtz, K., Riethmüller, R., & Schrum, C. (2019). Characterizing the vertical distribution of chlorophyll a in the German Bight. *Continental Shelf Research*, 175(February 2018), 127–146. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.01.012>
- Zou, W., Zhu, G., Cai, Y., Vilmi, A., Xu, H., Zhu, M., Gong, Z., Zhang, Y., Qin, B. (2020). Relationships between nutrient, chlorophyll a and Secchi depth in lakes of the Chinese Eastern Plains ecoregion: Implications for eutrophication management. *Journal of Environmental Management*, 260 (Mayo 2019), 109923. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109923>

4.2 Capítulo II. Dinámica de nutrientes, variación nutrimental y estado trófico de la presa de Zicuirán, Michoacán, México

RESUMEN.

La presa de Zicuirán se localiza en la reserva de la biósfera de Zicuirán-Infiernillo y presenta condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo de tilapia. En la presente investigación se presentan resultados del monitoreo del estado trófico, dinámica de nutrientes y la variación nutrimental del embalse aplicado al cultivo de tilapia, como una estrategia para el mejoramiento de las actividades productivas en la acuicultura de jaulas flotantes, principalmente en la zona central de la presa. Para ello se evaluaron parámetros fisicoquímicos y biológicos durante un ciclo anual y se recolectaron muestras en tres sitios ubicados a lo largo de la presa tomando como referencia la zona de la cortina, zona central y la zona de intersección del embalse. En campo se determinó la transparencia y en el laboratorio se determinaron las formas totales de fósforo, las formas de nitrógeno (nitritos, nitratos y amonio) y las formas principales de clorofila (a, b y c). La presa presenta un estado trófico eutrófico con tendencia a evolucionar a través del tiempo, así como un equilibrio entre las formas de fósforo total y de las formas de fósforo orgánicas presentes en el sistema. Las formas de nitrógeno son el nutriente limitante en la productividad primaria del sistema, los tipos de clorofilas y las formas de nitrógeno son las variables que determinan principalmente el comportamiento del estado trófico durante el periodo de muestreo.

Palabras Clave: Cultivo de tilapia, Zicuirán, Fisicoquímica, Variación estacional.

ABSTRACT

The Zicuirán dam is located in the Zicuirán-Infiernillo biosphere reserve and presents optimal conditions for the development of tilapia cultivation. In this research, results of the monitoring of the trophic state, nutrient dynamics and the nutritional variation of the reservoir applied to tilapia cultivation are presented, as a strategy for the improvement of productive activities in aquaculture through floating cages, mainly in the central area of the dam. Therefore, physicochemical and biological parameters were evaluated during an annual cycle, collecting samples in three sites located along the dam taking as reference the area of the curtain, central area and the intersection area of the reservoir, samples were taken, the which were obtained from the surface as indicated by the methodology proposed by Carlson and Simpson (1996), which were stored in three-liter jugs. Transparency was determined in the field and in the laboratory the total forms of phosphorus, the forms of nitrogen (nitrites, nitrates and ammonium) and the main forms of chlorophyll (a, b and c) were determined. It is established that the dam presents a eutrophic trophic state with a tendency to evolve over time, the reservoir presents a balance between the forms of total phosphorus and the forms of organic phosphorus present in the system, the forms of nitrogen are the limiting nutrient In the primary productivity of the system, the types of chlorophylls and the forms of nitrogen are the variables that mainly determine the behavior of the trophic state during the sampling period.

Key Words: Tilapia culture, Zicuirán, Physicochemical, Seasonal variation.

4.2.1 INTRODUCCION.

La presa de Zicuirán ubicada en la reserva de la biósfera de Zicuirán-Infiernillo es uno de los embalses más importantes de Michoacán para el cultivo de tilapia (SEPESCA 2006). Esta presa se encuentra en la región hidrológica 18, dentro de la cuenca del río Tepalcatepec – Infiernillo, la cual está limitada por el sistema volcánico transversal.

Las características del estado trófico actuales del embalse presentan diferencias a lo previamente descrito (Hurtado 1997), en su evolución a la eutrofización que ha presentado el sistema a través del tiempo y son muy próximas a embalses en donde se realizan actividades acuícolas. Dichas características fueron descritas por Drovandi *et al*, (2005), Echaniz y Vignatti (2009), Díaz y Vargas (2017) y acorde a estas, se describe un proceso de eutrofización continuo a través del tiempo, que se da por la limitación nutrimental tanto en formas de fósforo como en formas de nitrógeno. Por ello, el embalse de Zicuirán está catalogado con la presencia del fenómeno de evolución eutrófica a través del tiempo. Las formas totales de fósforo tienen un comportamiento de estabilidad en la superficie y en el fondo con una concentración promedio de 870 mg/L. Las variables físicas, químicas y biológicas se utilizaron para evaluar el estado trófico del embalse, con base en el Índice de estado trófico presentado por Carlson y Simpson (1996). Con la finalidad de explicar cómo las fluctuaciones de los parámetros físicos, químicos y biológicos modifican el estado trófico en los meses de muestreo. Además de las formas totales de fósforo para estudios posteriores de capacidad de carga en el uso de actividades acuícolas. Por lo cual, el presente estudio aporta información temporal de las variables fisicoquímicas y biológicas, para la determinación del estado trófico y su aplicación para establecer futuros estudios de capacidad de carga, así como para establecer sitios de cultivo óptimos para el cultivo de tilapia en la Presa de Zicuirán, Michoacán, México.

4.2.2 MATERIALES Y METODOS.

4.2.3.1 Toma de muestras para análisis fisicoquímicos y biológicos

Los sitios de muestreo se ubicaron a una distancia de 15 km, de la zona sur hasta la cortina del embalse. El sitio 1 (S1) está localizado en la compuerta del embalse (zona baja), el sitio 2 (S2) es en donde se encuentran las jaulas de cultivo de tilapia (zona media), mientras que el sitio 3 (S3) está ubicada en la zona alta del embalse. Durante el periodo de estudio (octubre 2018 a junio 2019), se tomaron muestras de agua en tres niveles: superficie, base de la media trofogénica y fondo uso de la (botella Van Dorn). Las muestras fueron depositadas en garrafas de plástico con sus respectivos datos de campo y se transportaron en obscuridad a 4°C (DOF, 1980) al área de Análisis de Aguas del Laboratorio de Biología Acuática “J. Javier Alvarado Díaz” de la Facultad de Biología de la U.M.S.N.H. para su respectivo análisis.

4.2.3.2 Registro de parámetros de campo

Conjuntamente con la toma de muestras se registraron los siguientes parámetros: La transparencia (m) que se determinó con la ayuda del disco de Secchi; la profundidad para lo cual se usó una cinta métrica y el perfil de clorofila “a”. Las formas totales de fósforo incluyendo las formas de fósforo orgánico, ortofosfatos y las formas de nitrógeno total del sistema (nitratos, nitritos y amonio) se midieron con el multiparamétrico YSI (modelo 6600V2).

4.2.3.3 Determinación de parámetros químicos y biológicos

En laboratorio se realizaron las determinaciones de fósforo total (mg L^{-1}), reactivo y orgánico (mg L^{-1}), nitratos (mg L^{-1}), nitritos (mg L^{-1}), amonio (mg L^{-1}), y clorofila “a”, “b” y “c” (mg L^{-1}) con base en los métodos propuestos por APHA-AWWA-WPCF (1998) y Lind (1984). Para definir el estado trófico del embalse, se utilizó el Índice de Carlson con la modificación de Simpson (1996).

4.2.3.4 Índice de estado trófico

Para determinar el índice de estado trófico (TSI) se utilizó el índice propuesto por Carlson y Simpson (1996), su escala va de oligotrófico a hipereutrófico manejando valores de 0 y 100. Se obtiene a través de la medición de la transparencia determinada con el disco de Secchi (DS), la concentración de clorofila "a" (CHL) y las formas de fósforo totales (TP). Su cálculo se realiza mediante las fórmulas que figuran a continuación.

$$\text{TSI (TP)} = 14.42 \ln (\text{TP}) + 4.15 \quad (1)$$

$$\text{TSI (CHL)} = 9.81 \ln (\text{CHL}) + 30.6 \quad (2)$$

$$\text{TSI (SD)} = 60 - 14.41 \ln (\text{SD}) \quad (3)$$

Donde:

TP: La concentración de fósforo total

CHL: La concentración de clorofila "a"

SD: La profundidad de lectura del disco de Secchi

Estas fórmulas propuestas en el índice de estado trófico permiten normalizar los valores en un intervalo entre 0 a 100 (Tabla 6), la cual indica desde un estado oligotrófico hasta un estado hipereutrófico y mediante una escala se indican los valores del estado trófico mediante los siguientes criterios:

Tabla 5. Categorización del Índice de estado trófico de Carlson y Simpson

ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO DE CARLSON
(Modificado por Carlson, R. E. y J. Simpson, 1996)

Índice trófico de Carlson.	Clorofila "a" (µg/L)	Transparencia (m)	Fósforo Total (µg/L)	Estado Trófico
< 30	< 0.95	> 8	< 6	Oligotrófico
30-40	0.95-2.6	8.0-4.0	6.0-12.0	
40-50	2.6-7.3	4.0-2.0	20.0-24.0	Mesotrófico
50-60	7.3-20	2.0-1.0	24.0-48.0	Eutrófico
60-70	20.0-56.0	0.5-1.0	48.0-96.0	
70-80	56.0-155.0	0.25-0.5	96.0-192.0	
> 80	> 155	< 0.25	192.0-384.0	Hipereutrófico

4.2.3.4 *Análisis de datos*

La información se trató con estadística descriptiva, análisis de varianza y prueba de hipótesis de Ji cuadrada (χ^2) a través del programa Microsoft Excel. Para la realización del perfil de clorofila "a" se utilizó el programa Surfer versión 8. Para identificar el comportamiento de las variables fisicoquímicas y biológicas que presentan los meses de muestreo, se efectuó un análisis de correlación canónica en el programa PAST versión 2.17b.

4.2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.4.1 Estado trófico

Existen diferentes índices de estado trófico, sin embargo, en esta investigación se utilizó el de Carlson y Simpson (1996) debido a que requiere un mínimo de datos y aunque es completamente numérico, permite calcular con facilidad el estado en que se encuentra un cuerpo de agua. Este índice toma en consideración los valores de tres variables fisicoquímicas (transparencia, clorofila "a" y fósforo total) para sus cálculos. Los resultados son se presentan en la tabla 7.

Tabla 6. Valores temporales del Índice de estado trófico de Carlson y Simpson (1996), presentes durante el periodo de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México

Mes	Octubre			Noviembre			Diciembre			Enero			Febrero			Marzo		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Sitios																		
Clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$)	13.5	14.7	14.4	92.5	89.6	69.5	76.8	90.3	72.0	40.3	59.9	79.4	112.2	113.8	136.1	114.9	125.6	166.2
Índice de Estado Trófico (Chla)	56	57	57	75	75	72	73	75	73	67	71	73	77	77	79	77	78	81
Fosforo Total ($\mu\text{g/L}$)	136.8	52.9	33.7	42.4	42.4	26.7	51.2	47.7	38.9	80.9	31.9	61.7	68.7	150.8	63.4	290.7	110.6	61.7
Índice de Estado Trófico (FT)	75	61	55	58	58	52	61	60	57	67	54	64	65	76	64	86	72	64
Trasparencia (DS) (m)	1.34	1.5	1.14	1.75	1.89	1.83	1.71	1.84	1.71	1.36	1.30	1.28	1.34	1.45	1.15	1.28	1.18	0.87
Índice de Estado Trófico (DS)	56	54	58	52	51	51	52	51	52	56	56	56	56	55	58	56	58	62

Calidad de agua y estado trófico en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

Mes	Abril			Mayo			junio			Julio			Agosto			Septiembre		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Sitios																		
Clorofila "a" ($\mu\text{g/L}$)	157.5	164.9	234.6	145.0	121.3	171.0	157.5	164.9	234.6	145.0	121.3	171.0	157.5	164.9	234.6	145.0	121.3	171.0
Indice de Estado Trófico (Chla)	80	81	84	79	78	81	80	81	84	79	78	81	80	81	84	79	78	81
Fosforo Total ($\mu\text{g/L}$)	290.7	110.6	61.7	87.9	42.4	47.7	290.7	110.6	61.7	87.9	42.4	47.7	290.7	110.6	61.7	87.9	42.4	47.7
Indice de Estado Trófico (FT)	86	72	64	69	58	60	86	72	64	69	58	60	86	72	64	69	58	60
Traspacidad (DS) (m)	0.94	1.11	0.89	0.43	0.43	0.41	0.94	1.11	0.89	0.43	0.43	0.41	0.94	1.11	0.89	0.43	0.43	0.41
Indice de Estado Trófico (DS)	61	58	62	72	72	73	61	58	62	72	72	73	61	58	62	72	72	73

La transparencia o visibilidad al disco de Secchi es un parámetro estrechamente relacionado con la incidencia de la luz y la cantidad de materia orgánica (fitoplancton) e inorgánica que se encuentra en la columna de agua (APHA, 1998). Los resultados obtenidos durante los meses de muestreo registraron un promedio de 1.21 m, con los valores más altos en noviembre y los mínimos registrados en mayo, situación que se relaciona principalmente con la temporada de estiaje y la estratificación térmica.

Durante el periodo de muestreo, en S1, la transparencia mínima registrada fue 0.46 m en la superficie (en mayo), la máxima registrada fue 1.75 m (en noviembre), con un promedio de 1.16 m. En el S2, la visibilidad al disco de Secchi mínima fue 0.43 m en mayo, la máxima fue de 1.89 m en noviembre y la transparencia promedio de 1.22 m. Para S3 se registró una transparencia

mínima de 0.41 m, en mayo, la transparencia máxima registrada fue 1.83 m en noviembre y la transparencia promedio de 1.02 m (Figura 15).

Este parámetro exhibió diferencias estadísticas significativas entre los sitios S1 y S2 del embalse durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 0.8393$, gdl= 2, $P > \chi^2= 0.6573$); en tanto que entre la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) la diferencias significativas ocurrieron de noviembre a marzo (Figura 16). Esto se debe al aporte de materia orgánica acarreada por los aportes de sistemas lóticos al embalse (Hu *et al*, 2013). La mayor transparencia en S1 y S2 se debe principalmente a la profundidad (Kimambo *et al*, 2019), ya que en estos se midieron las profundidades máximas de todos los sitios de muestreo en noviembre, lo que causa el inicio de los movimientos de convección del embalse y coincide con la finalización de la época de precipitación (Moreta, 2008). Se observó una estabilización en la columna y con ello se facilitó la sedimentación de la materia coloidal ya que en este mes comienza la mezcla de la columna del agua, que terminó en abril. A este proceso le siguió la estratificación de mayo a noviembre, con lo cual se mueven sedimentos del fondo a la superficie y ocasionaron mayor turbiedad (Lee *et al*, 2017). Esto concuerda con lo reportado por Hurtado (1997), quien reportó una transparencia promedio de 1.43 m, con la más alta transparencia en la zona de la cortina (1.24 m). Para este trabajo se obtuvo un incremento de la transparencia en S1 con 1.75 m en noviembre, lo que pudo deberse al término de la época de precipitación, que facilita la sedimentación de los sólidos antes del inicio de la estratificación.

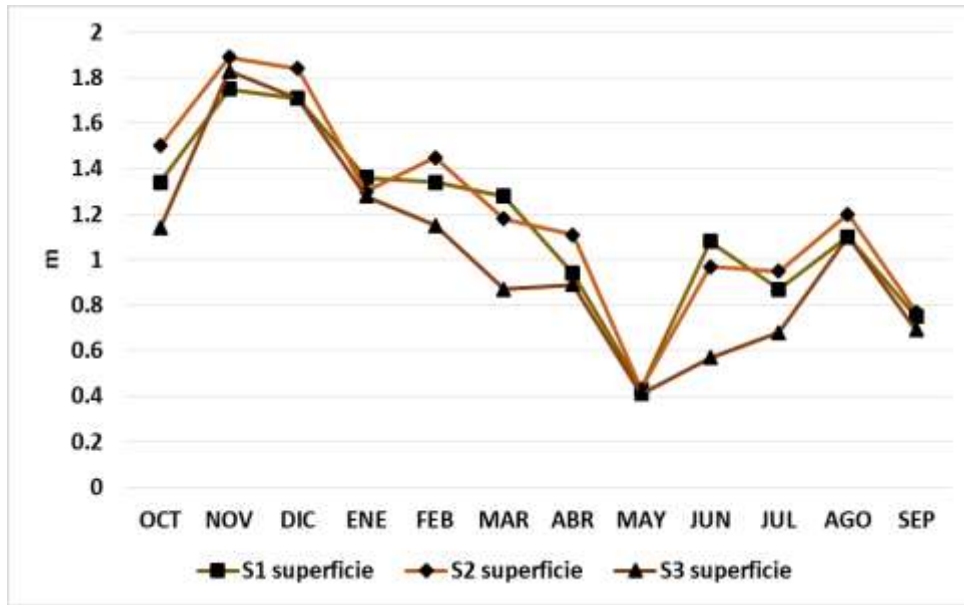


Figura 15. Variación temporal de la transparencia en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

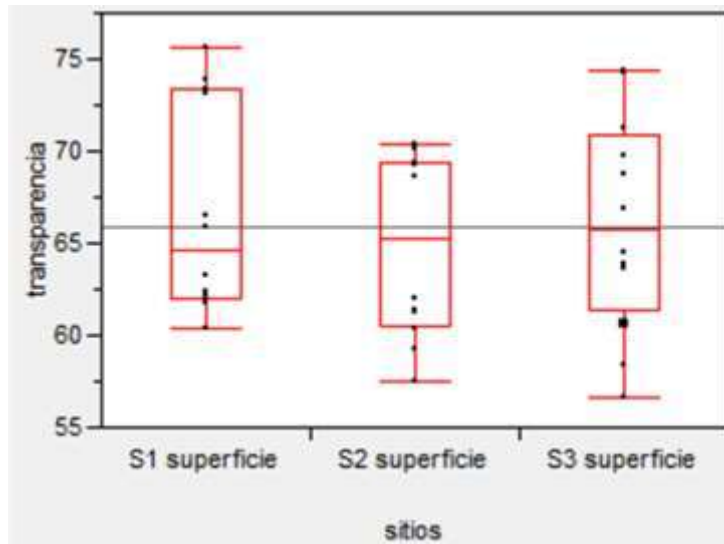


Figura 16. Valores temporales de distribución de transparencia (m) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

La dinámica de nutrientes es un fenómeno que ha sido altamente estudiado, debido a su potencial ecológico, así como los riesgos que con lleva, como el deterioro de la calidad del agua, la degradación del ecosistema en cuanto a su estructura y función, entre otros factores (Carpenter *et al*, 1998). El Nitrógeno (N) y fósforo (P), son los dos básicos elementos que apoyan la supervivencia de los organismos acuáticos y han demostrado ser indicadores cruciales del estado nutricional en cuerpos de agua continentales (Lewis *et al*, 2011). La actividad humana puede exacerbar el estado nutricional de los lagos directamente a través del aumento de la entrada de nitrógeno, fósforo y conducir directamente a la eutrofización del sistema (Baldwin *et al*, 2008).

Para el embalse se encontró que las formas del nitrógeno en los cuales están englobados los nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-) son las formas más abundantes y la que se encontraron en menor proporción fue el amonio NH_3^+ . El embalse presenta concentraciones de nitratos que llegan a los $250 \mu\text{g L}^{-1}$ en la superficie y las menores concentraciones se registraron en el fondo, con valores de 0 a $50 \mu\text{g L}^{-1}$ durante el periodo de muestreo. Se registraron variaciones de 48, 34 y $15 \mu\text{g L}^{-1}$ en la superficie, zona trofógena y fondo respectivamente, en tanto que el promedio general fue de $352.6 \mu\text{g L}^{-1}$. En S1 la concentración de nitratos mínima registrada fue $173.6 \mu\text{g L}^{-1}$ en la zona intermedia de la columna y en el fondo en marzo; la máxima fue $1478 \mu\text{g L}^{-1}$ en la zona media en abril y un promedio de $530.2 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 17). En S2 la concentración mínima fue $146.94 \mu\text{g L}^{-1}$ en la zona media de la columna en de abril, la máxima fue $1057.3 \mu\text{g L}^{-1}$ en el hipolimnion en octubre y una concentración de nitratos promedio de $426.5 \mu\text{g L}^{-1}$. Durante la mayor parte del periodo de muestreo se presentó poca variabilidad en la concentración de nitratos en el epilimnion y en el fondo, lo que se debe a que la dinámica del sistema presenta un metabolismo constante y en equilibrio (González, 1996). Para S3 se registró una concentración mínima de nitratos de $146.4 \mu\text{g L}^{-1}$, una concentración máxima de $1914.4 \mu\text{g L}^{-1}$ en julio en la zona media y una promedio de $520.4 \mu\text{g L}^{-1}$. En cuanto al análisis estadístico, los nitratos presentaron diferencias significativas entre los sitios S1, S2 y S3 durante el periodo de muestreo ($\chi^2 = 1.3581$, gdl= 8, $P > \chi^2 = 0.9948$) (Figura 18).

Los meses de octubre y noviembre se observó una diferencia entre la concentración de este parámetro y esto se debió a las abundantes concentraciones de oxígeno disuelto que se registraron en la presa, tanto en el epilimnion como en el metalimnion, lo que propició la presencia de estados oxidados de nitrógeno y el paso de los estados de reducción a oxidación a través de la columna de agua (Wetzel, 2001, Pei *et al*, 2019).

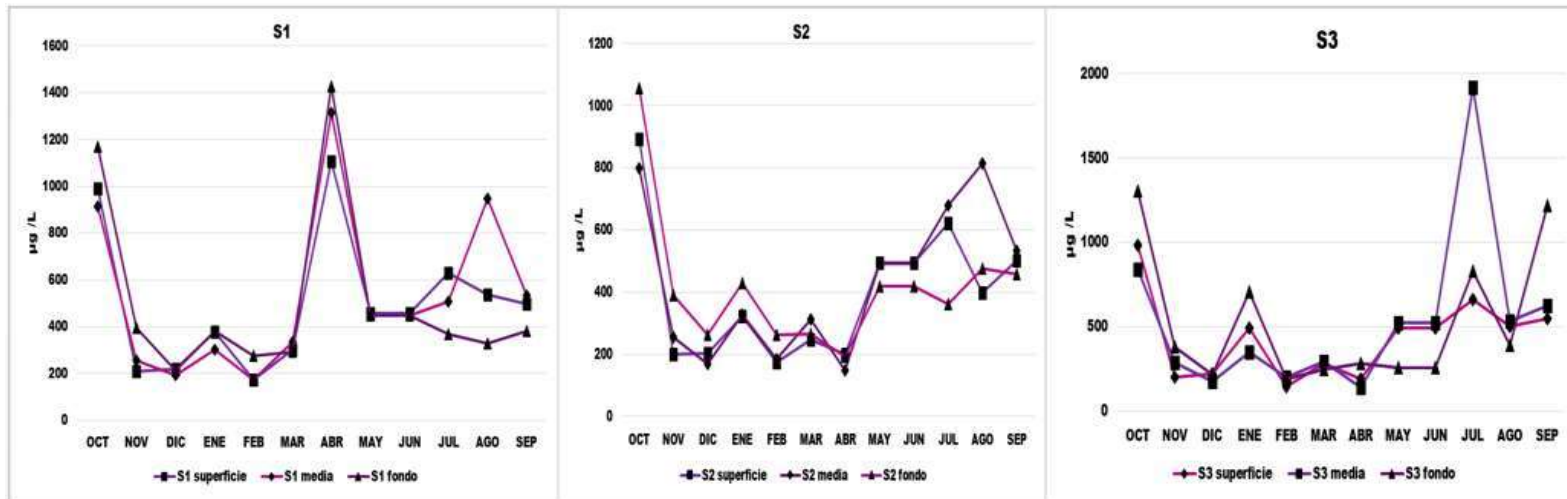


Figura 17. Variación espacial de los nitratos en los sitios de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México

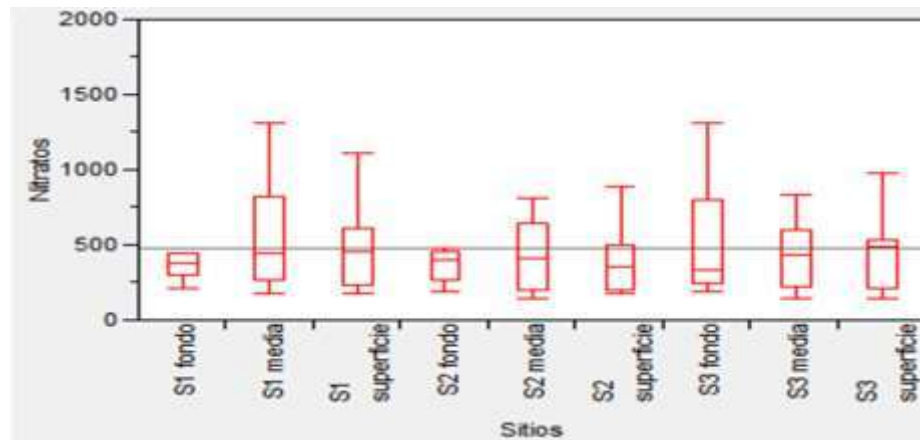


Figura 18. Valores temporales de distribución de nitratos ($\mu\text{g L}^{-1}$) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México

Las variaciones reportadas por Hurtado (1997) concuerdan con los resultados de la presente investigación. Los nitratos presentan variabilidad en su distribución por toda la columna de agua, asociados a la variabilidad del oxígeno disuelto (Bao *et al*, 2018) y a la ausencia de éste gas en el fondo del embalse (Pei *et al*, 2019).

En cuanto a los nitritos, el embalse presentó concentraciones de nitritos que alcanzaron $800 \mu\text{g L}^{-1}$, se presentaron concentraciones elevadas en la superficie y en la zona trofogénica, en tanto que las concentraciones menores fueron registradas en el fondo (0 a $100 \mu\text{g L}^{-1}$) y el promedio general fue $352.6 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 19). Durante la mayor parte del periodo de muestreo se evidenció alta variabilidad en la concentración de nitritos en el epilimnion y el fondo, asociada a la estratificación térmica (Cao *et al*, 2006).

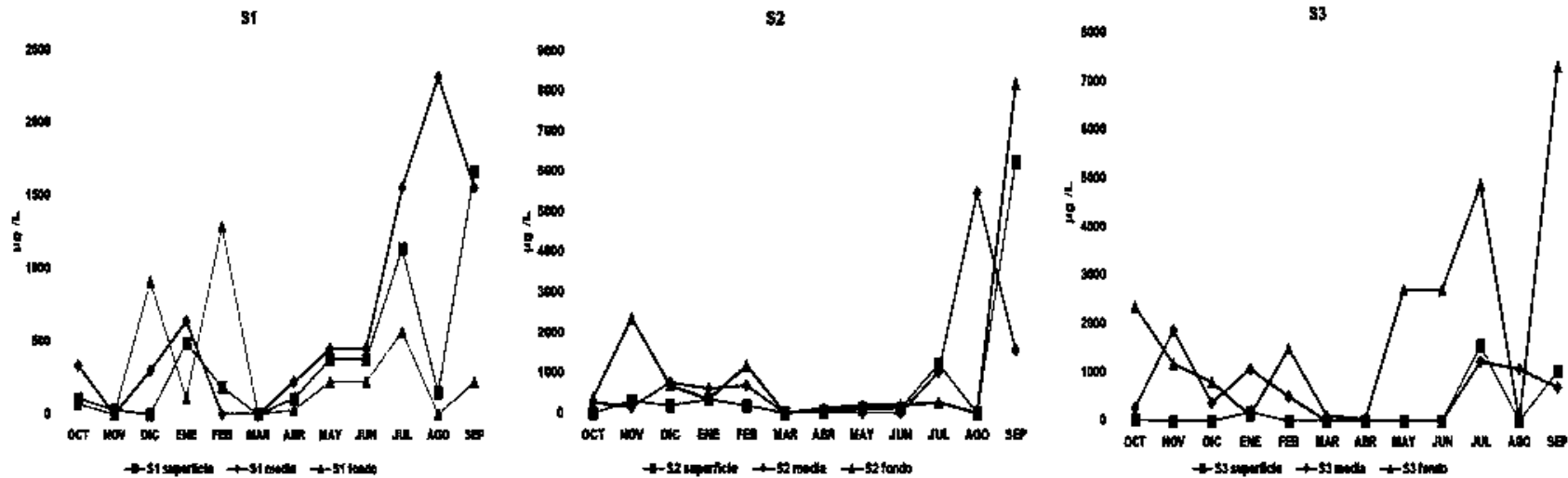


Figura 19. Variación temporal de los nitritos en los sitios de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

Los nitritos no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los sitios S1 y S2 del embalse durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 14.2476$, $gdl= 8$, $P > \chi^2= 0.0755$), ni entre la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) (Figura 20). Esto se debe a la rápida oxidación de esta forma del nitrógeno y la presencia de estados oxidados de nitrógeno y el paso de los estados de reducción a oxidación a través de la columna de agua (Magesh *et al.* 2017).

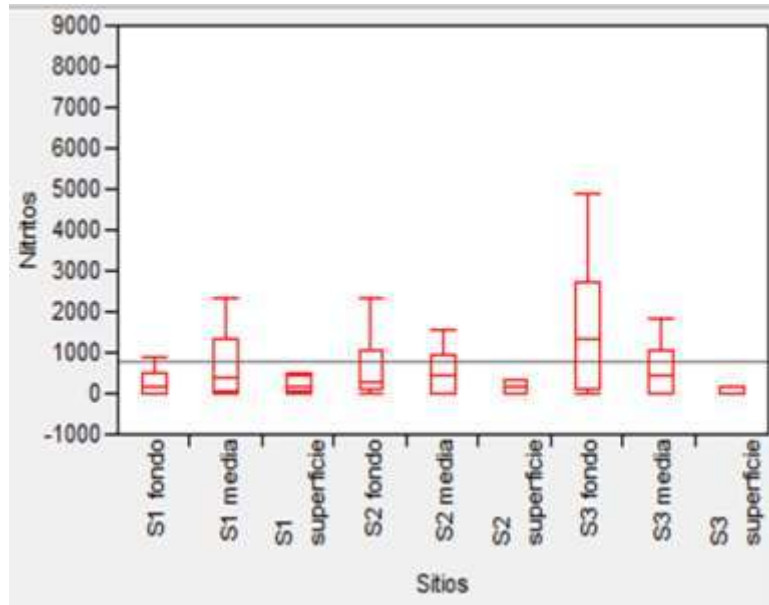


Figura 20. Valores temporales de distribución de nitritos ($\mu\text{g L}^{-1}$) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

Las formas de amonio (NH_3^+) presentes durante el muestreo alcanzaron $16,000 \mu\text{g L}^{-1}$, con las concentraciones más elevadas en el hipolimnion y en la zona trofогógica. Las concentraciones menores se registraron en la superficie presentando valores en un intervalo de 0 a $200 \mu\text{g L}^{-1}$, con un promedio de superficie a fondo de $564.3 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 21). Durante la mayor parte del periodo de muestreo se observó una ausencia de amonio en el epilimnion y en la zona trofогógica, lo cual se atribuye a las condiciones de fluctuación, estratificación y al sentido de la circulación de las corrientes, además de ser el producto final en los procesos de descomposición y de excretas de peces y otros organismos presentes en el fondo (Wetzel, 2001).

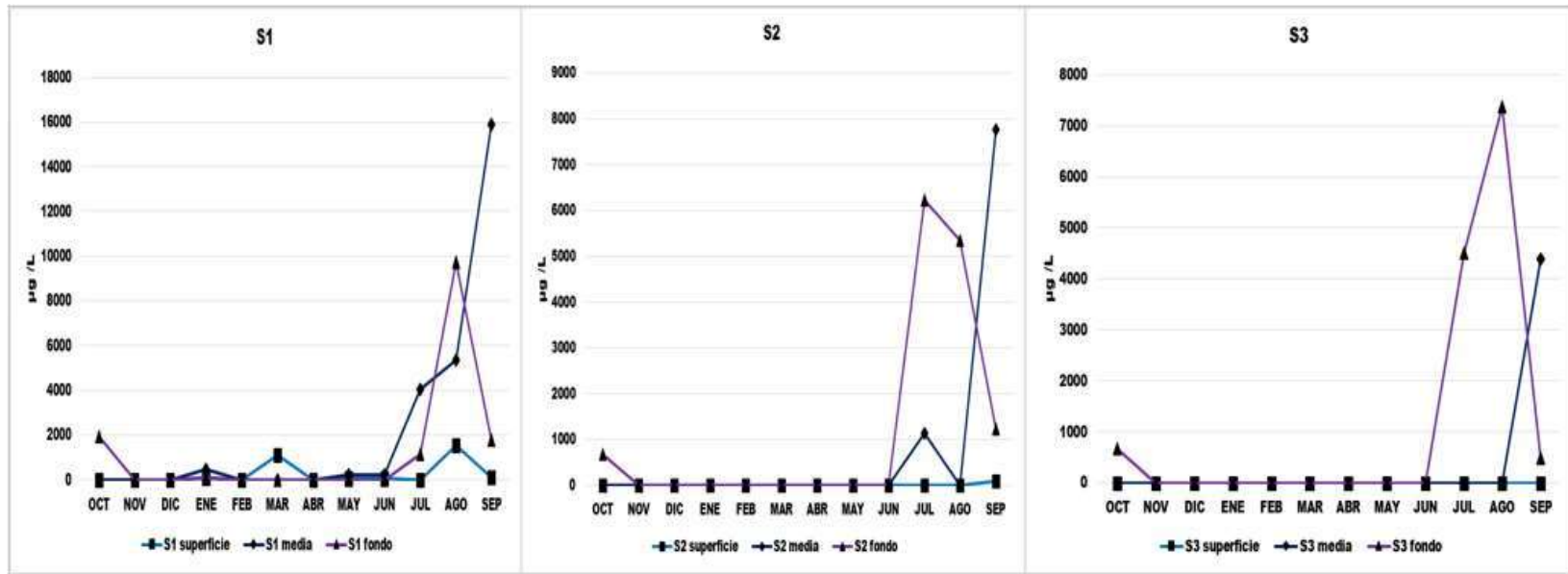


Figura 21. Variación temporal de la concentración de amonio en el sitio S1 en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

Para el amonio denotó diferencias estadísticas que entre los sitios S1 y S2 del embalse durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 16.0318$, gdl= 8, $P > \chi^2= 0.0419$) y entre la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) durante julio, agosto y septiembre (época de precipitación) (Figura 22). Esto coincide con las concentraciones más altas de amonio de otoño y en la zona de las jaulas de cultivo, que registraron 60.0 y 44 $\mu\text{g L}^{-1}$ respectivamente (Hurtado, 1997). Para el fondo reporta. Por su parte, los valores mínimos (170 $\mu\text{g L}^{-1}$ en promedio) se midieron en la zona de la compuerta, zona de cultivo de tilapia (jaulas) y la zona de transición, en primavera y en temporada de lluvias, que es cuando la concentración de amonio aumentó y esto ocurrió en mayor concentración en el sitio S2.

Estos resultados son similares a lo observado por Hurtado (1997), quien reportó este comportamiento en la misma zona, lo que se debe a la profundidad del sitio y la acumulación de materia orgánica y sedimento que precipitan al fondo, producen oxidación y reducción de la misma (Roldan, 2018). Esto ocurre por el aporte del alimento excedente y por las excretas de las tilapias y por las descargas de los restaurantes aledaños a la zona.

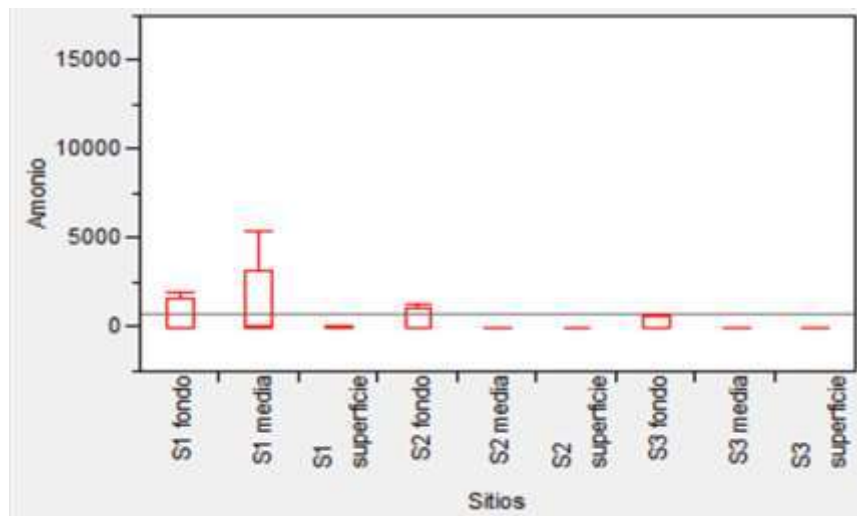


Figura 22. Valores temporales de distribución de nitritos (mg/m^3) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

El fósforo es un nutriente de interés ecológico, ya que tiene un papel importante en el metabolismo, además de que es relativamente escaso en la hidrósfera, por lo que es considerado un factor limitante en la productividad primaria (Silva *et al.* 2013; Danieta *et al.* 2010). La presa de Zicuirán reportó para las formas de fósforo totales y orgánicas ya que son las formas más abundantes de este elemento biogeoquímico y las que se detectaron en menor proporción con respecto a las formas de nitrógeno. El embalse presentó concentraciones de las formas de fósforo total, que llegaron a los 140 $\mu\text{g L}^{-1}$ en promedio, con variaciones en su distribución por la columna y valores máximos de hasta 440 $\mu\text{g L}^{-1}$ y mínimos tanto en superficie y fondo en un intervalo de 0 a 70 $\mu\text{g L}^{-1}$. Se registraron variaciones de 15 $\mu\text{g L}^{-1}$ en la superficie, 40 $\mu\text{g L}^{-1}$ en la zona trofogénica y de 25 $\mu\text{g L}^{-1}$ en el fondo (Figura 23).

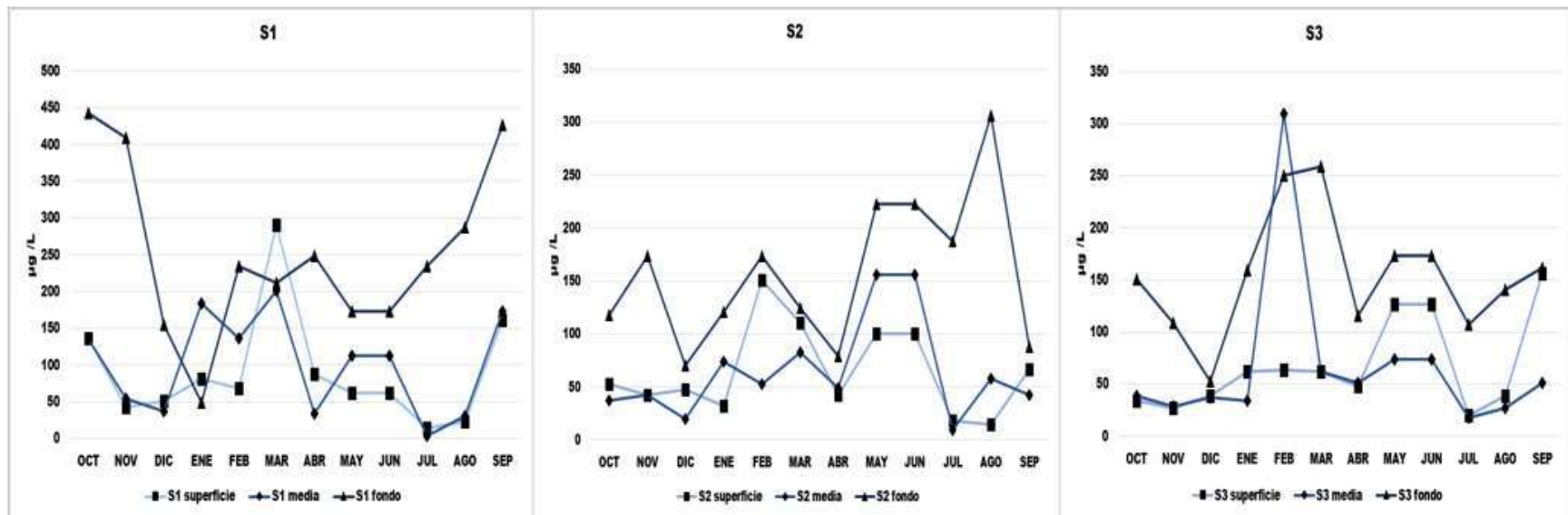


Figura 23. Variación temporal de las formas de fósforo total en los sitios de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

El fósforo total mostró diferencias estadísticas significativas entre los sitios S1 y S2 del embalse durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 44.5086$, $gdl= 8$, $P > \chi^2= 0.0001$) y entre S2 y S3 en la época de estiaje. Su concentración disminuyó en el estiaje y aumentó en temporada de lluvias, ya es que en esta última, los arrastres de terrígenos hacia el cuerpo de agua depositan concentraciones de fósforo que causan su aumento en la columna de agua (Bao *et al.* 2018) (Figura 24).

Los valores obtenidos durante el muestreo han aumentado en las últimas dos décadas comparativamente con lo reportado por Hurtado (1997), el cual registro una concentración en superficie de $20 \mu\text{g L}^{-1}$ en la zona de transición y obteniendo esta medición en primavera y el valor máximo registrado de $28 \mu\text{g L}^{-1}$ en verano. Los valores obtenidos en este estudio, en la zona transicional se registran en superficie $65 \mu\text{g L}^{-1}$ alcanzando el valor mínimo en primavera en el fondo de $48 \mu\text{g L}^{-1}$ y un máximo en verano de $69 \mu\text{g L}^{-1}$.

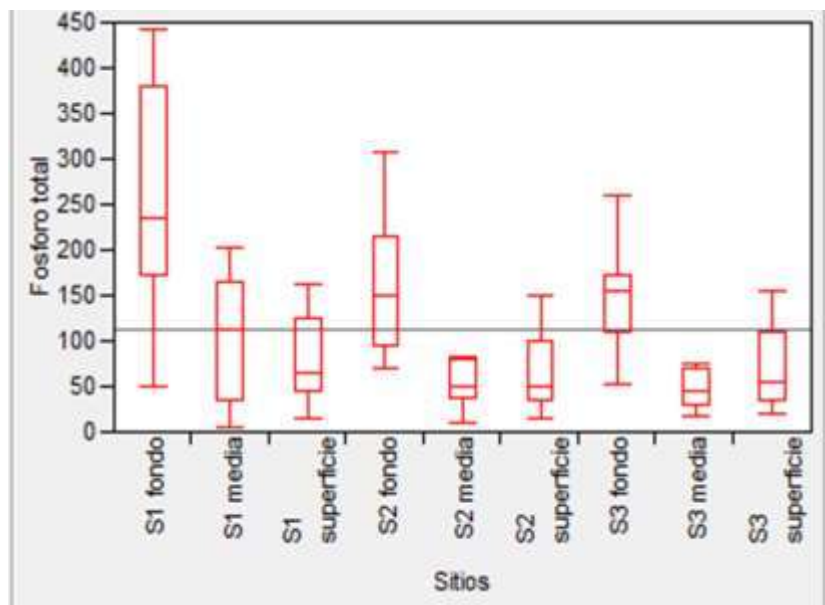


Figura 24. Valores temporales de distribución de las formas de fósforo total ($\mu\text{g L}^{-1}$) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

La concentración de clorofila "a" (Figura 25) extraída del concentrado de la muestra de agua, proporcionó información cuantitativa de la productividad microalgal en el momento de la colecta. Para este parámetro el valor promedio registrado fue $108.4 \mu\text{g L}^{-1}$, con el mínimo en octubre ($13.5 \mu\text{g L}^{-1}$) y el máximo en mayo ($235.0 \mu\text{g L}^{-1}$).

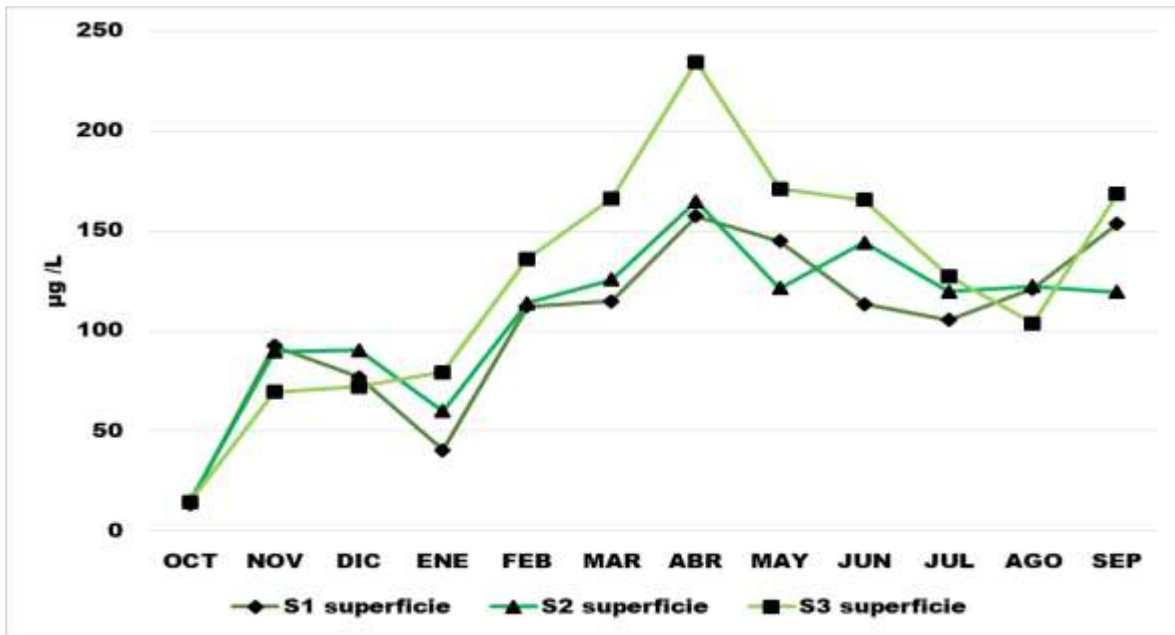


Figura 25. Variación temporal de la clorofila "a" en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

Durante los meses de muestreo, la presencia de clorofila "a", mostró disminuciones y fluctuaciones en los meses de noviembre a abril. La temperatura, transparencia y profundidad regulan la productividad primaria por las condiciones de convección y la estratificación dada en el embalse, ya que son factores que ocasionan los fenómenos de surgencia (la masa de agua por su cercanía al fondo es empujada a la superficie por las corrientes del embalse) y con el cambio de temperatura se favorecen los florecimientos de algas (Wetzel, 2001).

La clorofila "a" registró diferencias estadísticas significativas entre los sitios S1 y S2 del embalse durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 0.8393$, gdl= 2, $P > \chi^2= 0.6573$) y entre la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) durante diciembre a julio. Durante el análisis se presentaron asentamientos de clorofila "a" en los meses de noviembre a abril, lo que provocó fluctuaciones durante este periodo. Factores como temperatura, transparencia y profundidad regulan la productividad primaria por las condiciones de mixes y la estratificación dada en el embalse ya que son factores que ocasionan los fenómenos de surgencia en los que la masa de agua, por su cercanía al fondo, es empujada a la superficie por las corrientes del embalse y al cambio mayor de temperatura en el agua se registran mayores florecimientos de algas (Wetzel, 2001) (Figura 26).

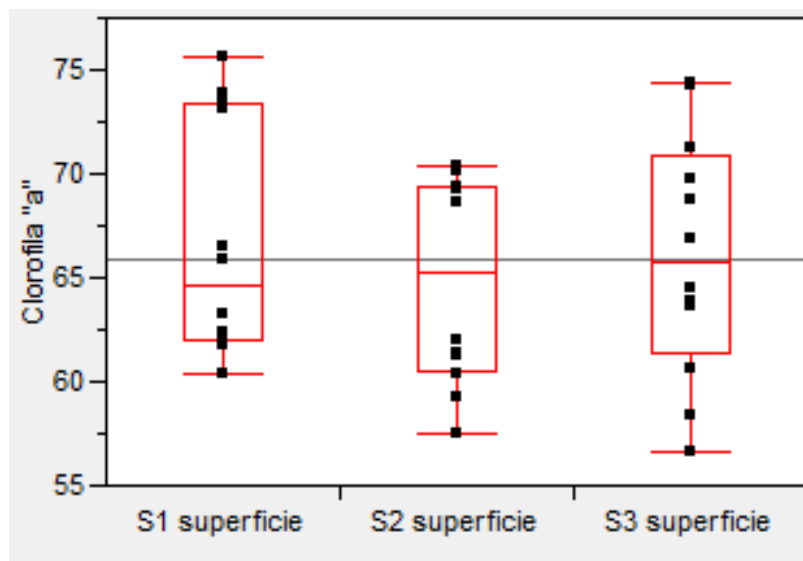


Figura 26. Valores temporales de distribución de la clorofila "a" ($\mu\text{g L}^{-1}$) presentes durante el periodo de muestreo en los sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

La picnoclina de clorofila obtenida para el embalse (Figura 27) obedeció al comportamiento de un perfil de tipo HSCLM (high surface chlorophyll model) (Zhao *et al*, 2019). Este ocurre en un mecanismo mixto y resulta de diferentes tipos de corrientes que circulan por encima y por debajo de la columna de agua y que traen fitoplancton de diferentes regiones de origen a la misma área (McCandliss *et al*, 2002). La diferencia estacional presentó entre los picos más altos de clorofila “a” y la importancia de la resuspensión en la concentración de clorofila se puede atribuir a cambios estacionales de disponibilidad de micronutrientes en la parte inferior (Jago *et al*, 2002). Hurtado (1997) reportó valores de clorofila “a” 9.85, 7.91 y 8.88 $\mu\text{g L}^{-1}$, con el valor más alto en julio. Al comparar los valores de este parámetro se observa un incremento muy alto de la productividad microalgal desde 1997 comparativamente con nuestro periodo de muestreo (2018-2019), lo cual es de importancia ya que el crecimiento algal es indicador de eutrofización (Kapetsky *et al*. 2013). Drovandi *et al*. (2005), Echaniz y Vignatti (2009), Díaz y Vargas (2017). Reportaron en sus embalses que la causa de eutrofización de estos es la alta productividad microalgal dada por las altas concentraciones de fósforo presentes en los sistemas.

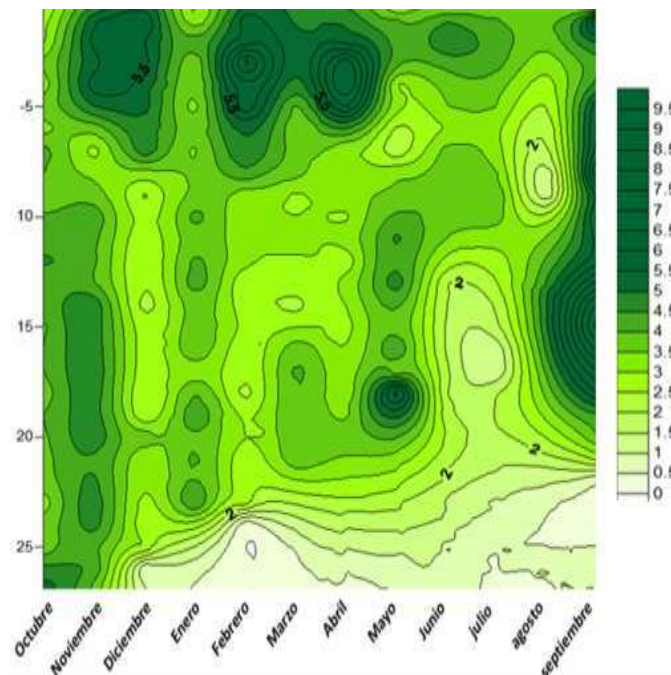


Figura 27. Distribución vertical de la clorofila “a” presente en la columna de agua en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

4.2.4.4 Estado trófico y su comportamiento

La eutrofización es un proceso natural de los ecosistemas acuáticos epicontinentales que evidencia la transformación paulatina en embalses a través de varios años (incluso cientos de ellos); esta es inevitable e implica que la entrada de nutrientes desde la cuenca sea relativamente constante a lo largo del tiempo con oscilaciones temporales a consecuencia de los ciclos climáticos, así como, el desarrollo y descomposición de la cubierta vegetal como la erosión (Wetzel, 2001). Estas circunstancias pueden ser aceleradas hasta cierto punto, por la propia actividad humana. Una prueba de ello son los ecosistemas acuáticos a lo largo de México, que en número considerable presentan condiciones de mesotrófia, eutrofia e hipereutrofia; 79.9 % de los estos son eutróficos con tendencia a la hipereutrofia (Rosas *et al*, 2014).

En este sentido, muchos de estos cuerpos de agua sustentan actividades acuiculturales, principalmente el cultivo de peces como la tilapia nilótica (*O. niloticus*), que si bien brinda una alternativa alimenticia en las poblaciones rurales y una fuente de ingresos por la venta de excedentes, también enriquece el embalse debido a que es una actividad constante y con densidades de siembra o repoblamiento considerables (Saavedra, 2006). Adicionalmente, esta actividad ha mantenido el mayor crecimiento comparado con otras industrias productoras de alimento.

Diez variables fisicoquímicas fueron utilizadas para la realización de este análisis entre las cuales destacaron; fósforo reactivo, nitratos, temperatura del agua, nitritos, nitratos, clorofila “a”, “b” y “c”. Los resultados de las variables fisicoquímicas con respecto a los sitios de muestreo y estado trófico fueron similares en su comportamiento. Aunque se estimaron diferencias cuantitativas menores en la contribución de variables específicas a los ejes canónicos, las combinaciones lineales que comprenden los ejes no difirieron cualitativamente y la significación estadística de todos los ejes canónicos fue el mismo para ambos tipos de datos (sitios de muestreo-estado trófico y el primer eje canónico, $F = 0.1898$ y $P = 0.001$). Por lo tanto, los resultados se basaron en la relación de las variables fisicoquímicas con el estado trófico. Esta relación se presenta en la Figura 28. La ordenación de los dos primeros ejes canónicos están sobre los ejes X y Y; las flechas representan a las variables fisicoquímicas.

Las direcciones de las flechas representan la correlación entre cada variable y los ejes canónicos y entre sí, mientras que la longitud de las flechas representa la contribución relativa de las variables a los ejes y la relación estado trófico-variables fisicoquímicas. Los dos ejes canónicos presentan una estimación del 78.4 % de la variación en el estado trófico – variables fisicoquímicas. El primer eje está más alineado con la temperatura del agua, nitritos, transparencia, las formas de fósforo total, orgánico y ortofosfatos, mientras que el segundo está más alineado con el índice de estado trófico y la clorofila. La posición ocupada por el índice de estado trófico se caracterizaría como relativamente enriquecido por los tipos de clorofilas, moderado a bajo por la temperatura del agua e influenciado por las formas de nitrógeno. Aunque algunas de las variables en el análisis están claramente correlacionadas, las formas de clorofila presentes, las formas de fósforo y nitrógeno presentes en el embalse son descriptores del comportamiento vectorial que describe la condición fisicoquímica de la presa de Zicuirán y definen el comportamiento del estado trófico (Figura 28). Se puede apreciar que las variables que influyen directamente son las formas de nitrógeno ya que estas mantienen una correlación directamente proporcional con la clorofila “a” (0.0364, $P < 0.0001$) y están altamente correlacionados con los dos ejes del análisis, que en conjunto explican el 80 % de la variación del índice de calidad del agua y del índice de estado trófico.

La temperatura del agua es la única variable física del agua que fue altamente correlacionada con uno de los dos primeros ejes. El resto de las variables físicas y químicas se correlacionaron entre sí y contribuyen aproximadamente por igual a los dos primeros ejes del análisis canónico. Las variables que fueron negativamente asociadas con los dos primeros ejes canónicos descritos principalmente son: las formas de nitrógeno, la transparencia y las variables positivamente asociadas incluyeron las formas de fósforo y los tipos de clorofilas.

Lo anterior coincide con estudios previos que describen que el comportamiento del estado trófico está dado por la clorofila “a” presente en el sistema y la transparencia. Tal es el caso de Las lagunas de Mojanda, Quito. Ecuador, en las cuales la clorofila “a” presenta una alta correlación positiva con la transparencia y las formas de fósforo mantienen una estabilidad durante el periodo de muestreo (Loachamin y Tonato 2017). La relación entre los tipos de clorofila y la temperatura del agua, reducen la transparencia y aumentan el estado trófico, lo que lo lleva a evolucionar a hipereutrófico (Maja 2007). Hurtado (1997) reportó una variabilidad tanto en el epilimnion como en el metalimnion, lo que probablemente se deba al consumo constante de las micro algas y de otros organismos presentes en la columna de agua ya que estos utilizan las formas oxidadas de nitrógeno para el proceso respiratorio. Por otra parte, la porción que no es metabolizada queda inactiva en los sedimentos, con lo cual el sistema tiende a una eutrófización continua a través del tiempo. Asimismo, las variables fisicoquímicas: temperatura del agua, los ortofosfatos, las formas de fósforo total y orgánico, nitratos, nitritos y las clorofilas “a, b y c” son las variables que proporcionan información significativa en el análisis de correlación canónica y tendrán que medirse en un posterior monitoreo en la presa de Zicuirán y considerarse para el cálculo de la capacidad de carga del embalse.

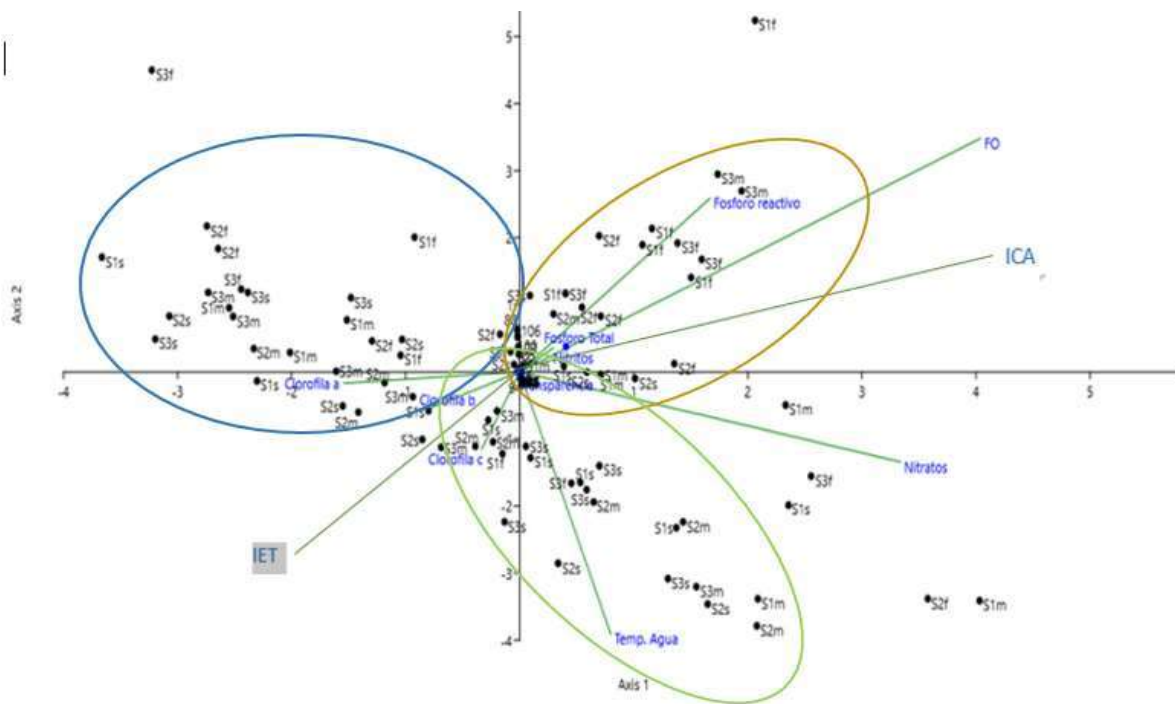


Figura 28. Resultados del análisis de correspondencia canónica basado en las variables fisicoquímicas y biológicas, representadas con puntos y las variables con flechas respectivamente, en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

La eutroficación natural (sin influencia antropogénica) es un proceso que tarda miles de años para llevarse a cabo, debido al acarreo de sedimentos desde las partes altas de la cuenca hasta la zona lacustre. Por su parte, la eutroficación cultural es un proceso que puede durar poco tiempo en desarrollarse debido a la sobrepoblación y sus las descargas de aguase residuales a los cuerpos de agua sin un previo tratamiento (Choi *et al*, 2015).

El IET se encarga de medir la productividad de un cuerpo de agua (incorporación de nutrientes), mediante la determinación de clorofila “a”, fósforo total y la transparencia medida con el disco de Secchi. Existen diferentes índices de estado trófico, sin embargo, en esta investigación se utilizó el de Carlson y Simpson (1996) debido a que requiere un mínimo de datos y aunque es completamente numérico, permite calcular con facilidad el estado en que se encuentra un cuerpo de agua. Este índice toma en

consideración los valores de tres variables fisicoquímicas (transparencia, medida con el disco de Secchi; clorofila “a” y fósforo total).

En el sitio S1, el IET mínimo registrado fue de 60 unidades en julio, el máximo fue de 75 unidades, en abril, con un promedio de 67 unidades durante el periodo de muestreo. En el sitio S2, los valores mínimo y máximo registrados fueron 57 y 70 unidades, los que se presentaron en octubre y abril respectivamente. El IET promedio anual fue 65 unidades. Para el sitio S3 se registró un valor mínimo de 57 unidades (octubre) y el máximo fue 74 (junio), con un promedio de 66 unidades (Figura 29). El análisis estadístico para este parámetro expusó diferencias estadísticas significativas entre S1 y S2 durante el periodo de muestreo ($\chi^2= 0.7399$, gdl= 2, $P > \chi^2= 0.7553$) y entre la sección intermedia del embalse y la zona de transición (S2 y S3) en los meses de diciembre a abril.

El resultado del índice de estado trófico se calculó con base a la transparencia, las formas de fósforo total y la clorofila “a”, estos valores catalogan a la presa de Zicuirán como Eutrófico, pues todos ellos se registraron por arriba de las 50 unidades IET (Figura 48). Este resultado concuerda con el diagnóstico trófico generado por Hurtado (1997), quien concluyó que en 1997, el embalse presentaba un estado mesotrófico con tendencia a la eutrofia, de acuerdo a la comparación de diferentes índices de estado trófico (Sakamoto 1966, Carlson 1977, Vollenweider 1979 y EPA-NES 1994).

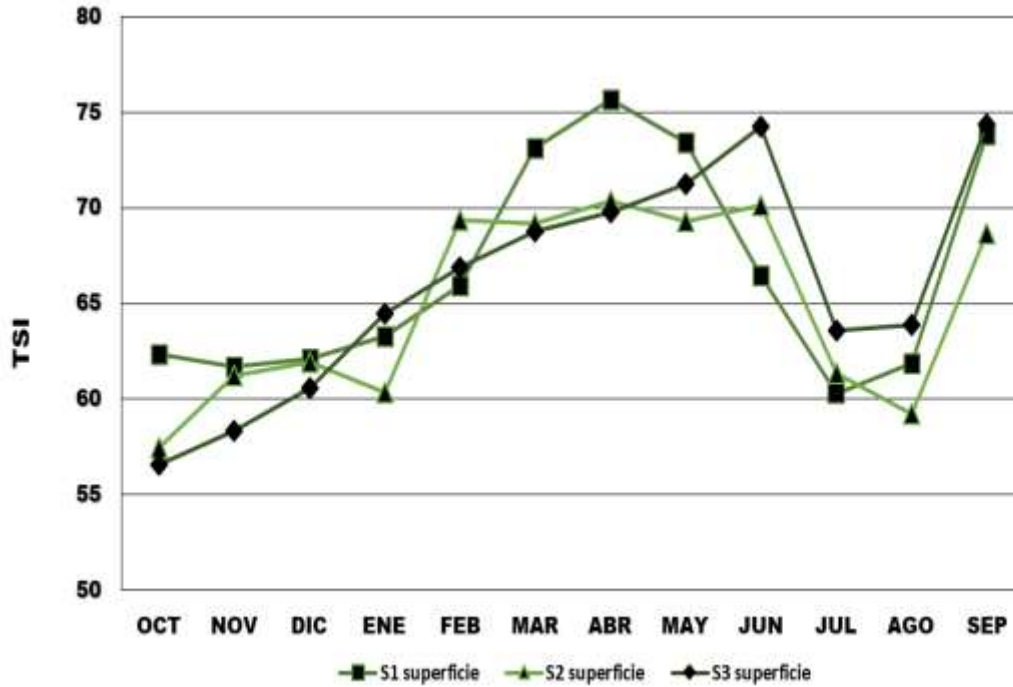


Figura 29. Valores temporales del Índice de estado trófico (IET) presentes durante el periodo de muestreo en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

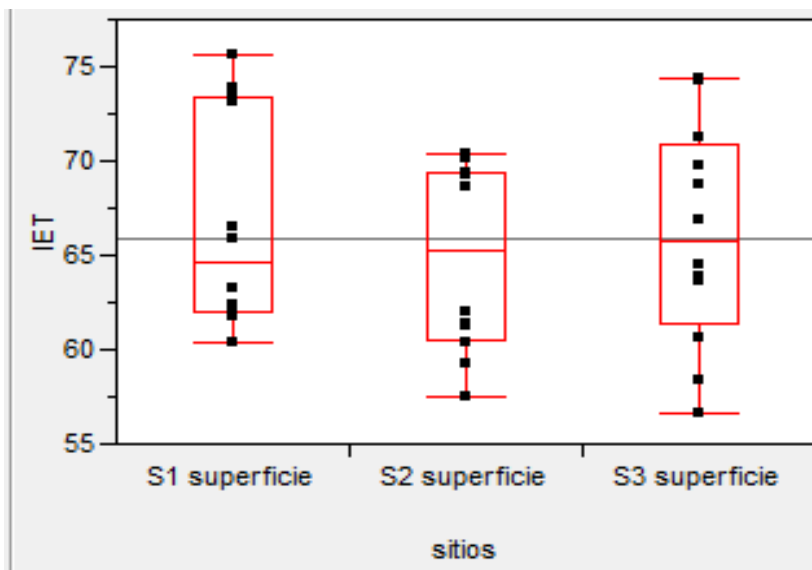


Figura 30. Valores temporales de distribución del índice de estado trófico (IET) presentes durante el periodo de muestreo en tres sitios de la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

4.2.4.5 Limitación nutrimental de la presa de Zicuirán

La determinación de requerimientos nutricionales de los organismos autótrofos microscópicos y su abundancia depende de las condiciones bajo las cuales las especies crecen y compiten, es conocida como el cociente de Redfield (Wetzel, 2001). Este representa la fracción de la concentración total de las formas de nitrógeno inorgánico disuelto y las formas de fósforo inorgánico totales disueltas en cada sitio del embalse de forma estacional. La limitación nutrimental, calculada mediante el coeficiente de Redfield durante el periodo de muestreo, alcanzó el máximo en noviembre, diciembre y enero en la zona trofogénica de las estaciones S2 y S3 y mantiene una estabilidad en toda la columna en la parte de la compuerta (S1) y la zona de transición (S3) durante los meses de muestreo. Cabe resaltar que el embalse registra una alta variación en los valores de limitación nutrimental en la media de las estaciones S2 y S3, fluctuación que se reduce en la columna de agua de las estaciones durante el periodo de muestreo (Figura 31).

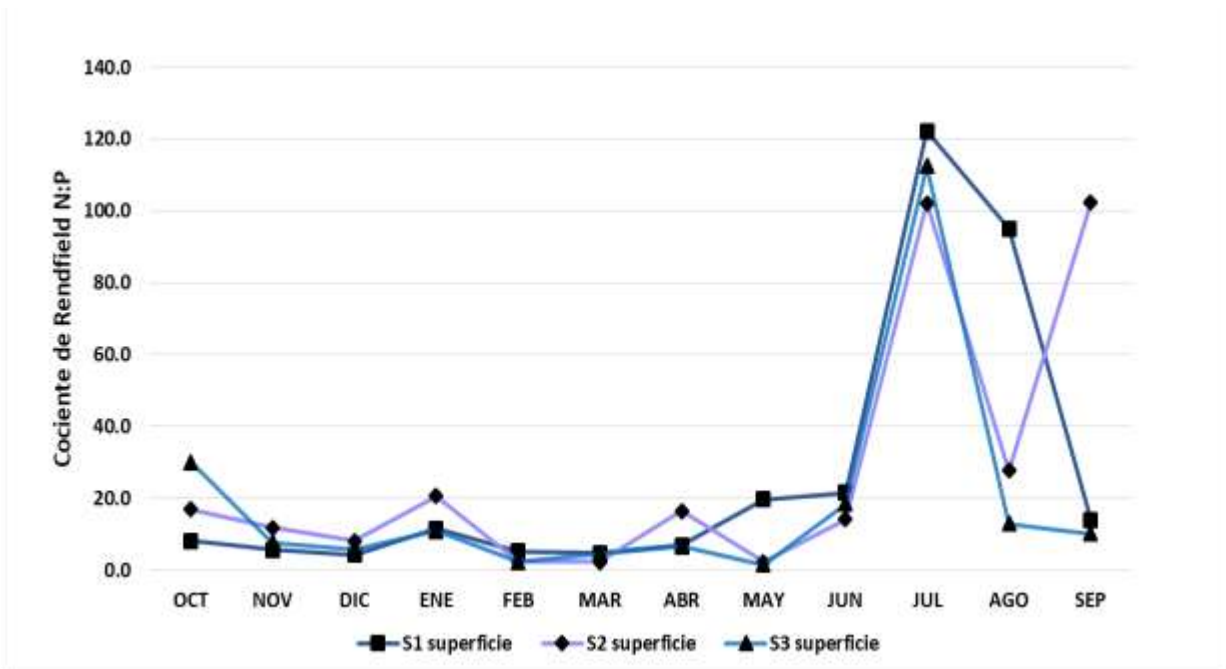


Figura 31. Variación estacional de la Limitación Nutrimental en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

La limitación nutrimental indica que la presa de Zicuirán en el sitio S3 durante el mes de octubre, la parte del metalimnion del sitio S3 en el mes de noviembre y la estación S1 en el mes de junio se encuentran limitadas por el fósforo, mientras que durante el periodo de muestreo la presa se encuentra limitada por el nitrógeno y donde este destaca como el factor limitante de la productividad acuática (tabla 8).

Tabla 7. Cociente de Redfield. Relación nitrógeno- fósforo, y limitación nutrimental en la presa de Zicuirán, Michoacán, México

Mes	Sitios	Nitrógeno total	Fosforo Total	Cociente Redfield	Limitación nutrimental teórica
octubre	S1s	1.100	0.137	8.0	N
	S2s	0.891	0.053	16.8	P
	S3s	1.012	0.034	30.0	P
noviembre	S1s	0.241	0.042	5.7	N
	S2s	0.498	0.042	11.7	N
	S3s	0.203	0.027	7.6	N
diciembre	S1s	0.218	0.051	4.3	N
	S2s	0.387	0.048	8.1	N
	S3s	0.221	0.039	5.7	N
enero	S1s	0.926	0.081	11.4	N
	S2s	0.658	0.032	20.6	P
	S3s	0.675	0.062	10.9	N
febrero	S1s	0.357	0.069	5.2	N
	S2s	0.357	0.151	2.4	N
	S3s	0.147	0.063	2.3	N
marzo	S1s	1.388	0.291	4.8	N
	S2s	0.248	0.111	2.2	N
	S3s	0.283	0.062	4.6	N
abril	S1s	0.606	0.088	6.9	N
	S2s	0.699	0.042	16.5	P
	S3s	0.312	0.048	6.5	N

Mes	Sitios	Nitrógeno total	Fosforo Total	Cociente Redfield	Limitación nutrimental teórica
mayo	S1s	1.216	0.062	19.7	P
	S2s	0.232	0.100	2.3	N
	S3s	0.191	0.126	1.5	N
junio	S1s	0.911	0.042	21.5	P
	S2s	0.602	0.042	14.2	N
	S3s	0.491	0.027	18.4	P
julio	S1s	1.766	0.014	122.2	P
	S2s	1.833	0.018	102.1	P
	S3s	2.214	0.020	112.4	P
agosto	S1s	2.205	0.023	95.0	P
	S2s	0.399	0.014	27.6	P
	S3s	0.503	0.039	12.9	N
septiembre	S1s	2.263	0.161	14.0	N
	S2s	6.843	0.067	102.3	P
	S3s	1.568	0.156	10.0	N

4.2.4.6 Relación de la Limitación Nutrimental y la Clorofila "a"

El análisis de regresión evidenció que entre mayor es el cociente N: P, en los sitios de muestreo, la concentración de clorofila "a" decrece, por lo cual dichas variables mantienen entre si una relación inversa. Cabe mencionar, que el sitio con mayor concentración de clorofila fue el sitio S2, en marzo (166.20 µg/L), mientras que la mínima concentración fue 14.41 µg/L en el sitio S1 durante el mes de octubre (Figura 32).

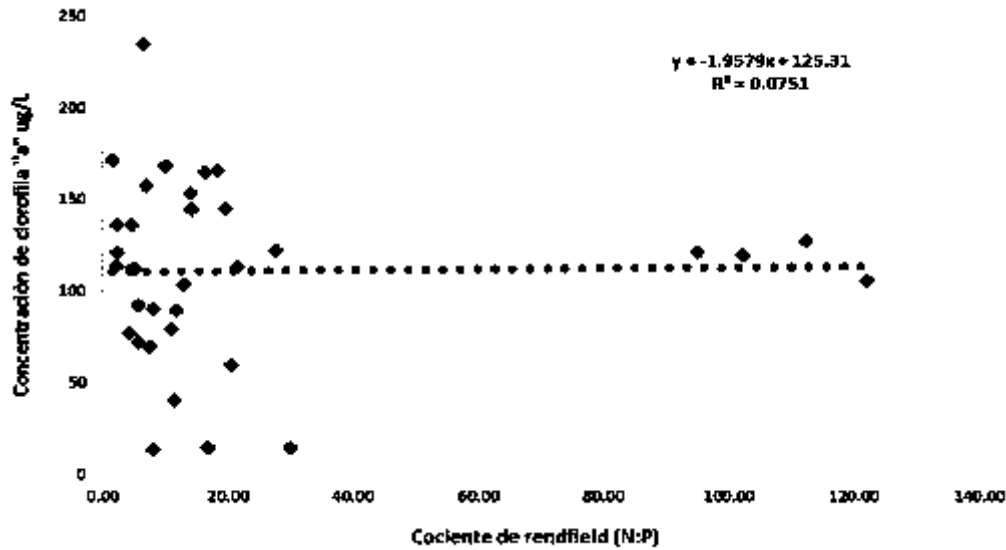


Figura 32. Relación del cociente de Redfield y la clorofila “a” en la presa de Zicuirán, Michoacán, México.

A diferencia de otros embalses analizados en la mayor parte de México, en donde la limitación nutrimental está dada por el fósforo como en el caso de los lagos de Cuitzeo (Arroyo *et al*, 2018) y Pátzcuaro (Sánchez *et al*, 2011; Brooks, 2000) se registró una limitación dada en la mayor parte del tiempo por el fósforo. En la presa de Zicuirán, la mayor parte del periodo de muestreo está limitada por nitrógeno, en la mayor parte de los sitios, ya que el embalse presenta un cociente de Redfield menor a 16 unidades. Esto provoca que aumente la productividad primaria y disminuya la transparencia (Roldan, 2018) y que el estado trófico no se encuentra dado por los sólidos suspendidos totales como en la mayoría de los cuerpos de agua mexicanos, sino por la productividad primaria.

4.2.5 LITERATURA CITADA

- Alvarado Espinoza, M., Sánchez Rodríguez, M., Calvario Martínez, O. (2013). *Evaluación de la Calidad del Agua para el Cultivo de Tilapia en la Presa Derivadora San Rafael, Nayarit.* 1–11.
- Álvarez-Silva, C., Del Rocío Torres-Alvarado, M. (2013). Composition and abundance of zooplankton from coyuca lagoon, guerrero, Mexico. *Hidrobiologica*, 23(2), 241–249.
- Awang, H., Daud, Z., Hatta, M. Z. M. (2015). Hydrology Properties and Water Quality Assessment of the Sembrong Dam, Johor, Malaysia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2868–2873. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.409>
- Azapagic, A., Perdan, S. (2005). An integrated sustainability decision-support framework Part II: Problem analysis. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 12(2), 112–131. <https://doi.org/10.1080/13504500509469623>
- Bao, L., Li, X., Cheng, P. (2018). Phosphorus retention along a typical urban landscape river with a series of rubber dams. *Journal of Environmental Management*, 228(September), 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.019>
- Bao, Y., Gao, P., He, X. (2015). The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir - A unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 150, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.005>
- Beltr, R. y Bustos, G. A. (n.d.). *Diagnóstico limnológico y pesquero de los principales embalses de sinaloa.*

- Boas, I., Biermann, F., Kanie, N. (2016). Cross-sectoral strategies in global sustainability governance: towards a nexus approach. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 16(3), 449–464. <https://doi.org/10.1007/s10784-016-9321-1>
- Bouaroudj, S., Menad, A., Bounamous, A., Ali-Khodja, H., Gherib, A., Weigel, D. E., & Chenchouni, H. (2019). Assessment of water quality at the largest dam in Algeria (Beni Haroun Dam) and effects of irrigation on soil characteristics of agricultural lands. *Chemosphere*, 219, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.193>
- Bustamante Toro, C. A., Monsalve Durango, E. A., García Reinoso, P. L. (2008). Análisis de la calidad del agua en la cuenca media del río Quindío con base en índices físicos, químicos y biológicos Analysis of the water quality at the intermediate river basin of the Quindío river on the basis of physical, chemical and biological inde. *Revista de Investigaciones Universidad Del Quindío*, 18, 22–31.
- Cao, H., Recknagel, F., Joo, G. J., Kim, D. K. (2006). Discovery of predictive rule sets for chlorophyll-a dynamics in the Nakdong River (Korea) by means of the hybrid evolutionary algorithm HEA. *Ecological Informatics*, 1(1), 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2005.08.001>
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)

- Choi, J. W., Han, J. H., Park, C. S., Ko, D. G., Kang, H. II, Kim, J. Y., Yun, Y. J., Kwon, H. H., & An, K. G. (2015). Nutrients and sestonic chlorophyll dynamics in Asian lotic ecosystems and ecological stream health in relation to land-use patterns and water chemistry. *Ecological Engineering*, 79, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.03.006>
- CONAGUA. (2016). *Nacional títulos y volúmenes de aguas nacionales y bienes inherentes por uso de agua*. 1. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/nacional.pdf>
- Daniela, M., Jacqueline, Q., Armando, L. (2010). Metodos para identificar , diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS* 78, 25–33.
- Diario Oficial de la Federación. (2020). *Ley de Aguas Nacionales, 6 de enero de 2020*. 91.
- Ding, S., Chen, P., Liu, S., Zhang, G., Zhang, J., Dan, S. F. (2019). Nutrient dynamics in the Changjiang and retention effect in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydrology*, 574(April), 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.034>
- Duineveld, G. C. A., Boon, A. R. (2002). Short-term variations in the fluxes and composition of seston in near-bottom traps in the southern North Sea. *Helgoland Marine Research*, 56(2), 140–148. <https://doi.org/10.1007/s10152-001-0091-x>
- Arroyo, Sesento, L., Hernández, M, R., del Rosario, O. Murillo, M., Hurtado A, A., Martínez. M, M. (2018). *Nutritional limitation and trophic state of Cuitzeo Lake, Michoacán, México*. 9(21), 897–918.

- Estudios, M., En, R., & Filtros, P. D. E. (2007). Revista AIDIS. *Planta*, 8(1), 44–56.
- FAO. (2016). FAO yearbook. Fisheries and Aquaculture Statistics 2016/FAO annuaire. Statistiques des pêches et de l'aquaculture 2016/ FAO anuario. Estadísticas de pesca y acuicultura 2016. In *Fao*. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.50-5350>
- Hoy, C. W., Grewal, P. S., Lawrence, J. L., Jagdale, G., Acosta, N. (2008). Canonical correspondence analysis demonstrates unique soil conditions for entomopathogenic nematode species compared with other free-living nematode species. *Biological Control*, 46(3), 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.06.001>
- Huerta, L. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos La Huerta , Jalisco Clave geoestadística 14043* *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos.*
- I. de la Mora, G., Villarea, I D, E. L., Arredondo, F, J. L., Ponce Palafox, J. T., Barriga Sosa, I. de los A. (2003). Evaluation of some water quality parameters in a closed aquaculture recirculating-water system, submitted to different loads of fish. *Hidrobiológica*, 13(4), 247–253.
- Jago, C. F., Jones, S. E., Latter, R. J., McCandliss, R. R., Hearn, M. R., Howarth, M. J. (2002). Resuspension of benthic fluff by tidal currents in deep stratified waters, northern North sea. *Journal of Sea Research*, 48(4), 259–269. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(02\)00181-8](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(02)00181-8)

- Jeswani, H. K., Burkinshaw, R., Azapagic, A. (2015). Environmental sustainability issues in the food-energy-water nexus: Breakfast cereals and snacks. *Sustainable Production and Consumption*, 2(July), 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.08.001>
- Jones, S. E., Jago, C. F., Bale, A. J., Chapman, D., Howland, R. J. M., Jackson, J. (1998). Aggregation and resuspension of suspended particulate matter at a seasonally stratified site in the southern North Sea: Physical and biological controls. *Continental Shelf Research*, 18(11), 1283–1309. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(98\)00044-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(98)00044-2)
- Kapetsky, J. M., Aguilar-Manjarrez, J., Jenness, J. (2013). A global assessment of offshore mariculture potential from a spatial perspective. In *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*.
- Kimambo, O. N., Chikoore, H., Gumbo, J. R., Msagati, T. A. M. (2019). Retrospective analysis of Chlorophyll-a and its correlation with climate and hydrological variations in Mindu Dam, Morogoro, Tanzania. *Heliyon*, 5(11), e02834. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02834>
- Lee, K., Matsuno, T., Endoh, T., Ishizaka, J., Zhu, Y., Takeda, S., Sukigara, C. (2017). A role of vertical mixing on nutrient supply into the subsurface chlorophyll maximum in the shelf region of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 143(October), 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.11.001>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., Krishnakumar, S. (2017). Geospatial analysis of dissolved nutrients dataset in the surface water of Karayar reservoir, Southern India. *Data in Brief*, 13, 575–581. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.06.037>

- McCandliss, R. R., Jones, S. E., Hearn, M., Latter, R., Jago, C. F. (2002). Dynamics of suspended particles in coastal waters (southern North Sea) during a spring bloom. *Journal of Sea Research*, 47(3–4), 285–302. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(02\)00123-5](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(02)00123-5)
- Moreta, J. (2008). La Eutrofización De Los Lagos Y Sus Consecuencias. Ibarra 2008. *Books.Google.Com*, 52(4), 829–837. http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2377/2/ResumenEjecutivo.pdf%0Ahttps://www.academia.edu/1439928/La_eutrofización_de_los_lagos_y_sus_consecuencias._Ibarra_2008%0Ahttp://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2637/1/TESIS.pdf
- Nicovita. (2013). Manual de Crianza Tilapia. *Nicovita*, 49. [http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual de crianza de tilapia.pdf](http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual_de_crianza_de_tilapia.pdf)
- Pacetti, T., Lombardi, L., Federici, G. (2015). Water-energy Nexus: A case of biogas production from energy crops evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods. *Journal of Cleaner Production*, 101, 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.084>
- Pei, S., Laws, E. A., Zhu, Y., Zhang, H., Ye, S., Yuan, H., Ding, X. (2019). Nutrient dynamics and their interaction with phytoplankton growth during autumn in Liaodong Bay, China. *Continental Shelf Research*, 186(June), 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.07.012>
- Rodríguez García, R., Martínez Muñoz, C., Hernández Vizcaino, D., De Lucas Veguillas, J., & Acevedo de Pedro, M. L. (2003). Quality of the spring fountain water in the basic healthcare area of Sigüenza, Spain. *Revista Espanola de Salud Publica*, 77(3), 423–432. <https://doi.org/10.1590/s1135-57272003000300012>

- Roriz, G. D., Delphino, M. K. de V. C., Gardner, I. A., & Gonçalves, V. S. P. (2017). Characterization of tilapia farming in net cages at a tropical reservoir in Brazil. *Aquaculture Reports*, 6, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.03.002>
- Rosas, J. L., Ávila, H., Sánchez, A., Rosas, A. Y., García, S., Sampedro, L., Granados, J. G., Juárez, A. L. (2014). Índice BMWP, FBI y EPT para determinar la calidad del agua en la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1(2), 82–88.
- Ross, L. G., Telfer, T. C., Falconer, L., Soto, D., Aguilar-Manjarrez, J. (2013). Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture. In *FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 21* (Issue December).
- Rubio, O., Carlos, R., Ortiz, R., Quintana, R., Saucedo, A., Ochoa, J., Rey, N. (2014). Índice De Calidad De Agua (Ica) En La Presa La Boquilla En Chihuahua, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(2), 139–150. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000200005%0Ahttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=en%0Ahttp://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S20
- Saavedra Martínez, M. (20 C.E.). Manejo del cultivo de tilapia. Managua, Nicaragua. *Manual*, 1–27.
- Sánchez, C. J., Bravo, I. L., Tomasini, O. C., Bernal, B. F. (2011). Calidad del agua del Lago de Pátzcuaro. In *Estudio Ecosistémico del Lago de Pátzcuaro: Aportes en gestión ambiental para el fomento del desarrollo sustentable* (p. 308).

- Sardiñas, O., Chiroles, S., Fernández, M., Hernández Yusaima, Pérez, A. (2006). Evaluación físico-química y microbiológica del agua de la presa El Cacao (Cotorro, Cuba). *Sanid. Ambient. Higiene y Sanidad Ambiental*, 6(6), 202–206.
- SARH, SSA, CFE, LANFI. (1992). Norma Mexicana NMX-AA-14-1980 “Cuerpos receptores.- Muestreo.” *Diario Oficial de La Federación*, 2–5.
- Schneider, S. C., Biberdžić, V., Braho, V., Gjoreska, B. B., Cara, M., Dana, Z., Đurašković, P., Eriksen, T. E., Hjermann, D., Imeri, A., Jovanović, K., Krizmanić, J., Kupe, L., Loshkoska, T., Kemp, J. L., Marković, A., Patceva, S., Rakočević, J., Stojanović, K., ... Vermaat, J. E. (2020). Littoral eutrophication indicators are more closely related to nearshore land use than to water nutrient concentrations: A critical evaluation of stressor-response relationships. *Science of The Total Environment*, 748, 141193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141193>
- Schneider, S. C., Cara, M., Eriksen, T. E., Budzakoska Goreska, B., Imeri, A., Kupe, L., Lokoska, T., Patceva, S., Trajanovska, S., Trajanovski, S., Talevska, M., & Veljanoska Sarafiloska, E. (2014). Eutrophication impacts littoral biota in Lake Ohrid while water phosphorus concentrations are low. *Limnologica*, 44, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2013.09.002>
- Thi Bich, V. D., Urban, W., Hazra, S. B. (2020). Introducing the modification of Canadian water quality index. *Groundwater for Sustainable Development*, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100457>
- Tunas, L. (2014). Índice canadiense de calidad de las aguas para la cuenca del río Naranjo, provincia Las Tunas, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(3), 11–16.

- Valcarcel, L. R., Alberro, N. M., Frías, D. (2009). El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. *Medio Ambiente y Desarrollo; Revista Electrónica de La Agencia de Medio Ambiente*, 16, 1–5. http://www.ciesas.edu.mx/cee_xalapa/Informedegestionareassustantivas/Proyectosinstitucionales/aha.pdf
- Zhao, C., Maerz, J., Hofmeister, R., Röttgers, R., Wirtz, K., Riethmüller, R., Schrum, C. (2019). Characterizing the vertical distribution of chlorophyll a in the German Bight. *Continental Shelf Research*, 175(February 2018), 127–146. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.01.012>
- Zou, W., Zhu, G., Cai, Y., Vilmi, A., Xu, H., Zhu, M., Gong, Z., Zhang, Y., Qin, B. (2020). Relationships between nutrient, chlorophyll a and Secchi depth in lakes of the Chinese Eastern Plains ecoregion: Implications for eutrophication management. *Journal of Environmental Management*, 260(Mayo 2019), 109923. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109923>

4.3. CONCLUSIONES

- Este estudio permite establecer un diagnóstico sobre la calidad del agua, el estado trófico, la variabilidad nutrimental y la dinámica de nutrientes que presenta la presa de Zicuirán, ya que es de gran utilidad para el conocimiento de las condiciones actuales y con esto seguir con el cultivo de tilapia ya que no se cuenta con un estudio realizado a profundidad de esta índole.
- La temperatura del agua muestra que el embalse es monomítico cálido, la mezcla comienza en el mes de noviembre y termina con la estratificación que comienza a partir del mes de marzo.
- La concentración de oxígeno disuelto, presentes en las muestras de agua son óptimas para el cultivo de tilapia durante el periodo de marzo a noviembre en la parte media de la presa y durante el periodo de diciembre a febrero en el sector de transición del embalse, ya que presentan concentraciones mayores a los 7 mg/L.
- El ICA mostró que el sector intermedio (S2, parte media) del embalse es apto para el cultivo de tilapia en el periodo de marzo a noviembre, así como la sección de transición del embalse (S3, parte alta) lo es en el periodo de diciembre a febrero.
- En el análisis de componentes principales muestra diferencias durante los meses de muestreo y las variables fisicoquímicas que explican los cambios en la calidad del agua son fósforo total, conductividad eléctrica, temperatura del agua, pH, las formas de fósforo, dureza total, dureza de magnesio, alcalinidad total y salinidad.

- Es un sistema altamente productivo ya que su estado actual se encuentra en la eutrofia, es limitado por las formas de nitrógeno y mantiene una relación en las formas de fósforo totales con las formas de fósforo orgánico debido a que presentan una correlación directamente proporcional

- El estado trófico de la presa de Zicuirán tiende a la eutrofización continua a través del tiempo

- Existe una variación espacio-temporal en la limitación nutrimental de la presa de Zicuirán, la cual en la mayoría de los meses esta se encuentra determinada por el nitrógeno en todos los sitios, a excepción de tres meses donde el fósforo es el nutriente limitante.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de agroquímicos y de metales pesados en la columna de agua del embalse, que pudiesen alterar la calidad del agua, al estado trófico y afectar al cultivo intensivo de tilapia.
- Realizar un estudio de análisis del sistema de corrientes que presenta el embalse.
- Realizar un estudio de capacidad de carga para estimar la cantidad de biomasa que pueda ser producida en el embalse sin alterar el estado trófico del sistema ya que este tiende a un aumento continuo.
- Realizar proyecciones a una década de las concentraciones nutrimentales, para estimar los futuros efectos posibles sobre el sistema, generados por el cultivo intensivo de tilapia en el embalse y así tener un mejor manejo y control de la producción que puede dar el embalse.
- Realizar una comparación del índice de estado trófico de Carlson y Simpson (1996) con el índice de estado trófico TRIX ya que toma como variable extra el OD (oxígeno disuelto) y considerando que es una variable importante para el cultivo de cualquier especie acuícola en este caso de *Oreochromis niloticus*.