



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN COMPUTACIÓN

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

T E S I S

**Modelo difuso para el análisis biótico mediante el
procesamiento de señales limnológicas**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

Doctorado en Ciencias de la Computación

P R E S E N T A

**M. EN C. ÚRSULA SAMANTHA
MORALES RODRIGUEZ**

DIRECTORES DE TESIS

DR. JOSÉ JUAN CARBAJAL HERNÁNDEZ

DR. HERÓN MOLINA LOZANO



Ciudad de México, junio 2022



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a de del

El Colegio de Profesores de Posgrado del en su Sesión
(Unidad Académica)

No celebrada el día del mes de , conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	MORALES	Apellido Materno:	RODRÍGUEZ	Nombre (s):	ÚRSULA SAMANTHA
-------------------	---------	-------------------	-----------	-------------	-----------------

Número de registro:

del Programa Académico de Posgrado:

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

"Modelo difuso para el análisis biótico mediante el procesamiento de señales limnológicas"

Objetivo general del trabajo de tesis:

Desarrollar un modelo de evaluación de zonas bióticas mediante el estudio de parámetros limnológicos empleando modelos de razonamiento difuso y clasificación de patrones medioambientales.

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: 2° Director:

No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

Director(a) de Tesis

Dr. José Juan Carbajal Hernández

Aspirante

C. Úrsula Samantha Morales Rodríguez

2° Director de Tesis

Dr. Herón Molina Lozano



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN
EN COMPUTACIÓN

DIRECCIÓN

IPN-CIC

Dr. Francisco Híram Calvo Castro



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de

del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de para examinar la tesis titulada:

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Morales	Apellido Materno:	Rodríguez	Nombre (s):	Úrsula Samantha
-------------------	---------	-------------------	-----------	-------------	-----------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 15% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*

El porcentaje de similitud no constituye un plagio y se cumplen con los criterios adecuados para su aceptación.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

La tesis cumple con los criterios adecuados para su aceptación.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Dr. José Juan Carbajal Hernández
Director de Tesis

Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández

Dr. Miguel Santiago Suárez Castañón

Dr. Herón Molina Lozano
2° Director de Tesis

Dr. Ricardo Barrón Fernández

Dra. Sandra Dinora Orantes

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN COMPUTACIÓN

Dr. Francisco Hiram Calvo Castro
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE
PROFESORES IPN-CIC



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día **23** del mes de **junio** del año **2022**, la que suscribe **Úrsula Samantha Morales Rodríguez** alumna del programa **Doctorado en Ciencias de la Computación** con número de registro **B180307**, adscrita al **Centro de Investigación en Computación** manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de **José Juan Carbajal Hernández** y **Herón Molina Lozano**, y cede los derechos del trabajo intitulado **“Modelo difuso para el análisis biótico mediante el procesamiento de señales limnológicas”**, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director(es). Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo **umoralesr@ipn.mx**, **jcarbajalh@ipn.mx**, **hmolina@ipn.mx** . Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Úrsula Samantha Morales Rodríguez

RESUMEN

En México, existe una carencia en el desarrollo de modelos que permitan estudiar el comportamiento de los lagos para facilitar la toma de decisiones que evitan el deterioro de los cuerpos de agua y promueven su conservación implementando políticas relacionadas con su preservación y/o mejora. Se sabe que, para poder estudiar un ecosistema acuático es necesario caracterizar su comportamiento, por lo que, por parte de los especialistas, resulta complicado implementar metodologías de análisis debido a la falta de tecnología y modelos especializados que faciliten el estudio del cuerpo de agua y con ello la toma de decisiones. Actualmente, las metodologías implementadas para la caracterización de los lagos mediante la medición de parámetros abióticos son lentas y difíciles de implementar. El presente trabajo muestra la creación y el desarrollo de un modelo de evaluación a través de la medición de parámetros fisicoquímicos en diversos puntos geográficos muestreados y a diferentes profundidades de un lago, desde el proceso de adquisición de datos hasta la obtención del Índice Biótico Lacustre (IBL), el cual indica una puntuación relacionada con la zona analizada para conocer qué tan ideal es la zona para el hábitat de las especies endémicas del lago. La metodología propuesta se implementa en el Lago de Zirahuén en el Estado de Michoacán, el cuál es considerado un lago de gran importancia sociocultural y económica; en el lago se realizó el muestreo de los niveles de oxígeno disuelto, temperatura y turbiedad. Los resultados obtenidos revelan el comportamiento de los parámetros involucrados, así como el índice de calidad del agua, denotando una evaluación de buena a media en la mayoría de los puntos muestreados, indicando la posibilidad de que el lago muestre signos de deterioro, además, se presentan los resultados de la evaluación del IBL en las zonas analizadas, considerando al presente trabajo como una herramienta especializada en la evaluación y análisis de zonas lacustres a través de un sistema computacional que permite el monitoreo de ecosistemas acuáticos mediante el procesamiento de parámetros limnológicos asistido de un sistema de inferencia difusa que realiza la evaluación de distintas zonas en aguas continentales para clasificarlas según las condiciones óptimas de los peces que habitan el ecosistema acuático de acuerdo con el IBL. Como parte de las investigaciones realizadas, también se propone la creación del Modelo de Clasificación de Capas de Estratificación en un lago, que identifica las diferentes capas de estratificación presentes en algún objeto de estudio a través del diseño, creación e implementación de diversos algoritmos especializados para el procesamiento y funcionamiento del modelo. Los resultados obtenidos del modelo de clasificación fueron demasiado precisos; primero, se obtuvieron las mediciones de la temperatura a lo largo del eje vertical del lago y posteriormente el modelo realizó la identificación de las capas indicando los niveles de profundidad y temperatura relacionados con los límites de las capas de estratificación.

ABSTRACT

In Mexico, there is a lack of models to study the lakes behavior facilitating decision-making to prevent the waterbodies deterioration and promote their conservation by implementing policies related to their preservation and/or improvement. It is known that, to study an aquatic ecosystem, is essential to characterize its behavior, which makes it difficult for specialists to implement analysis methodologies due to the lack of technology and specialized models that facilitate the waterbodies study and, therefore, decision-making. Currently, the implemented methodologies for lakes characterization by measuring abiotic parameters are slow and difficult to perform. The present work shows the creation and development of an evaluation model through physicochemical parameters measurement in geographical points sampled at different depths of a lake, from the data acquisition process to Lake Biotic Index (LBI) obtention, it indicates a score related to the analyzed area to know how ideal the lacustrine zone is for endemic species. The proposed methodology is implemented in Zirahuén Lake in Michoacán State, which is considered a lake of great sociocultural and economic importance, so dissolved oxygen levels, temperature and turbidity were sampled in the lake. The results obtained reveal the behavior of the parameters involved, as well as the water quality index, denoting a good to medium evaluation in most of the sampled points, indicating the possibility that the lake shows signs of deterioration, in addition, the results of the LBI evaluation in the analyzed zones are presented, considering this work as a specialized tool in the evaluation and analysis of lake zones through a computational system that allows the monitoring of aquatic ecosystems through the processing of limnological parameters assisted by a fuzzy inference system that performs the evaluation of different zones in inland waters to classify them according to the optimal conditions of the fish that inhabit the aquatic ecosystem according to the IBL. As part of the research carried out, the creation of the Stratification Layer Classification Model in a lake is also proposed, which identifies the different stratification layers present in the object of study through the design, creation and implementation of various specialized algorithms for the processing and performance of the model. The results obtained from the classification model were too accurate; first, temperature measurements were obtained along the vertical axis of the lake and then the model performed the identification of the layers indicating the depth and temperature levels related to the boundaries of the stratification layers.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional mediante los apoyos 20200604 y 20210154, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología bajo el apoyo 789644, a la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo económico para la presentación del trabajo a nivel internacional, así como al Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura, a la Secretaria de Marina, a la Comisión Nacional de Búsqueda y Salvamento de Aeronaves Civiles SAR-México A.C., al Taller de Manufactura “Maquinados e Ingeniería Morales”, a los investigadores Dr. José Juan Carbajal Hernández, Dr. Herón Molina Lozano y Dr. Luna Benoso Benjamín, y a mi hermana Sandra Carmina Morales Rodríguez por el apoyo otorgado en la realización del presente trabajo.

DEDICATORIAS

“Y si alguno de vosotros tiene falta de sabiduría, pídala a Dios, el cual da a todos abundantemente y sin reproche, y le será dada. Pero pida con fe, no dudando nada; porque el que duda es semejante a la onda del mar, que es arrastrada por el viento y echada de una parte a otra”. (Santiago 1:5).

Al amor de mi vida, David Soto, a ti, mi lindo esposo, te dedico el presente trabajo con todo el amor que el infinito en acto me permite, porque eres mi motivación y mis ganas de salir siempre adelante, porque con esto, vamos forjando las bases para poderle ofrecer a nuestra familia lo mejor que podemos para trascender, porque con tu amor y apoyo pudimos concluir este proceso, te amo por siempre.

A mis padres, Rafael Morales y Carmen Rodriguez, les dedico mi grado máximo de estudios, es completamente suyo, porque siempre han estado conmigo apoyándome incondicionalmente con todo su amor en cada etapa, desde el jardín de niños hasta hoy, sin ustedes y sin su compromiso, esta investigación no existiría, ni tampoco mi pasión por la enseñanza y la investigación, estoy en deuda con ustedes y el instituto también.

A mi abuelo, Jesús Rodríguez, porque gracias a sus enseñanzas, aprendí que el camino a la montaña, así como en la vida y en el estudio, puede ser difícil, arduo, sinuoso, complicado y lleno de obstáculos, sin embargo, con amor, dedicación, paciencia y perseverancia, es posible llegar a la cima.

A mi hermano y a mis hermanas, Rafael, Sandra y Sol, les dedico este logro, porque para mí siempre serán mi ejemplo por seguir, recuerden que aún sigo sus pasos.

A mis sobrinos, porque espero ser yo algún día su ejemplo a seguir, les dedico el presente trabajo porque quiero que siempre tengan presente que el estudio es la única llave que abre todas las puertas, nunca consideren el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para adentrarse en el bello y maravilloso mundo del saber, los quiero mucho.

“Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría, y que obtiene la inteligencia; porque su ganancia es mejor que la ganancia de la plata, y sus frutos más que el oro fino. Más preciosa es que las piedras preciosas; y todo lo que puedes desear, no se puede comparar a ella”. (Proverbios 3:13).

RESUMEN	5
ABSTRACT	6
AGRADECIMIENTOS	7
DEDICATORIAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
ÍNDICE DE TABLAS	14
CAPÍTULO I	16
INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Problemática.....	17
1.3 Justificación.....	18
1.4 Solución propuesta.....	19
1.5 Alcance.....	20
1.6 Hipótesis.....	20
1.7 Objetivos	20
1.8 Metodología de la investigación	21
1.9 Contribuciones esperadas.....	22
1.10 Estructura de la tesis	23
CAPÍTULO II.....	24
ESTADO DEL ARTE.....	24
2.1 Introducción	24
2.1.1 Evaluación de la calidad del cuerpo de agua.....	24
2.1.2 Modelos para la evaluación de la densidad de las especies.....	25
2.1.3 Modelos para la clasificación de los lagos de acuerdo con su régimen térmico	
26	
CAPÍTULO III	28

MARCO TEÓRICO.....	28
3.1 Hidrobiología del Estado de Michoacán, México.....	28
3.2 Parámetros fisicoquímicos	35
3.2.1 Temperatura.....	35
3.2.2 Oxígeno disuelto.....	37
3.2.3 Turbidez.....	38
3.2.4 Localización geográfica.....	38
3.2.5 Profundidad	39
3.3 Especies endémicas del lago de Zirahuén	39
3.4 Monitoreo de lagos.....	40
CAPÍTULO IV.....	43
MODELOS COMPUTACIONALES.....	43
4.1 Módulo de adquisición de datos.....	43
4.1.1 Análisis paramétrico	43
4.1.2 Tarjeta de adquisición de datos y sensores	44
4.1.3 Contenedor sumergible.....	46
4.1.4 Software de medición y evaluación.....	47
4.1.5 Metodología de implementación	48
4.2 Modelo IBL – Índice Biótico Lacustre	49
4.2.1 Sistema de inferencia difuso.....	49
4.2.2 Entradas	50
4.2.3 Funciones de pertenencia.....	50
4.2.4 Reglas de razonamiento.....	52
4.2.5 Agregación y defuzzificación.....	54
4.3 Índice Biótico Lacustre	56
4.3.1 Sistema distribuido	57

4.4	Modelo de clasificación de capas de estratificación	60
4.4.1	Descripción del modelo	60
4.4.2	Algoritmos	67
4.4.3	Interpretación de resultados.....	73
4.4.4	Ejemplificación del modelo.....	74
CAPÍTULO V	88
	RESULTADOS Y DISCUSIONES	88
5.1	Muestreo y obtención de la base de datos	88
5.2	Análisis medioambiental	90
5.2.1	Módulo de adquisición de datos	90
5.2.2	Modelo difuso.....	97
5.2.3	Modelo de reconocimiento de patrones.....	106
CAPÍTULO VI	113
	TRABAJO FUTURO	113
6.1	Sistema de decisión	113
6.2	Modelo Global de Evaluación Lacustre	114
	CONCLUSIONES	116
	REFERENCIAS	119
ANEXO A	134
	EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	134

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. DIAGRAMA DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN.	21
FIG. 2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ESTADO TRÓFICO DE UN LAGO.	28
FIG. 3. DINÁMICA DE LOS LAGOS DURANTE LAS DIFERENTES ESTACIONES DEL AÑO.	29
FIG. 4. CLASIFICACIÓN DE LAGOS DE ACUERDO CON SUS CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS.	30
FIG. 5. LAGO DE ZIRAHUÉN	31
FIG. 6. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL LAGO DE ZIRAHUÉN Y APRECIACIÓN GRÁFICA DE SU CUENCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON AYUDA DE LOS ARCHIVOS GEOESPACIALES DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE MÉXICO, PROPORCIONADOS POR EL INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI, 2018).	32
FIG. 7. LAGO DE ZIRAHUÉN.	33
FIG. 8. DIAGRAMA DE RAWSON.	33
FIG. 9. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DEL ANÁLISIS DE INTERSECCIÓN DE LOS TRES CONJUNTOS TOMADOS EN CONSIDERACIÓN: 1) FACTORES DEL DIAGRAMA DE RAWSON, 2) PARÁMETROS EMPLEADOS POR EL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA DE LA NSF Y, 3) SENSORES EXISTENTES EN LA INDUSTRIA QUE PERMITEN LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS.	34
FIG. 10. ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA DE UN LAGO Y ZONAS DE IDENTIFICACIÓN (KASKO MARINE, 2022).	36
FIG. 11. EJEMPLO GRÁFICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA CUANDO LOS LAGOS SE ENCUENTRAN ESTRATIFICADOS.	37
FIG. 12. DIAGRAMA GENERAL DE INTERACCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ACUÁTICO DE MEDICIÓN (SAM).	43
FIG. 13. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS IMPLEMENTADA CON ARDUINO UNO. EL DISEÑO FUE ELABORADO EMPLEANDO EL SIMULADOR PROTEUS 8.	44
FIG. 14. VISTAS FRONTALES, LATERALES, SUPERIORES E ISOMÉTRICO DEL MCTR CON SUS RESPECTIVAS DIMENSIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON AYUDA DEL SOFTWARE SOLIDWORKS.	46
FIG. 15. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO: SE PUEDE APRECIAR EL LUGAR Y LA POSICIÓN DEL GPS AL MOMENTO DEL MUESTREO, LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DE INTERÉS Y EL RESULTADO DE LA ESTIMACIÓN DE LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, CAPTURA DE PANTALLA DEL SOFTWARE DE MEDICIÓN Y EVALUACIÓN.	47
FIG. 16. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	48
FIG. 17. DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL MODELO DE EVALUACIÓN.	49
FIG. 18. DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA	52
FIG. 19. FUNCIONES DE PERTENENCIA DEL ÍNDICE BIÓTICO LACUSTRE	55
FIG. 20. DIAGRAMA DE INFERENCIA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN DEL ÍNDICE BIÓTICO LACUSTRE CON TRES CUATRO VARIABLES Y DOS REGLAS. REGLAS 34 Y 35 SE USAN PARA MOSTRAR EL PROCESO DE DEFUZZIFICACIÓN.	56
FIG. 21. DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA DE MONITOREO DISTRIBUIDO DE ECOSISTEMAS ACUÁTICOS (SMEA-D).	58
FIG. 22. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ADQUISICIÓN Y EVALUACIÓN DE DATOS.	59
FIG. 23. DIAGRAMA DE INTERACCIÓN DEL MODELO PROPUESTO PARA RECONOCIMIENTO DE PATRONES EN EL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE UN LAGO.	60
FIG. 24. CARACTERÍSTICAS GRÁFICAS DE UN LAGO DE TIPO MONOMÍCTICO CÁLIDO EN SU ETAPA DE ESTRATIFICACIÓN Y MEZCLA.	63

FIG. 25. LAGO DE ZIRAHUÉN CON PUNTOS GEOGRÁFICOS DE MUESTREO DEBIDAMENTE ETIQUETADOS.	88
FIG. 26. ESTUDIO DE CAMPO LLEVADO A CABO EN EL LAGO DE ZIRAHUÉN EL DÍA 4 DE MAYO DE 2018.	89
FIG. 27. ILUSTRACIÓN DEMOSTRATIVA REFERENTE AL PROCESO DE ADQUISICIÓN DE MUESTRAS EN EL LUGAR DE ESTUDIO; LA ILUSTRACIÓN COMPRENDE CADA ELEMENTO DE SUMA IMPORTANCIA PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE INTERÉS.	90
FIG. 28. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA, SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO, TURBIEDAD Y CALIDAD DEL AGUA A DIFERENTES PROFUNDIDADES. LAS GRÁFICAS MUESTRAN EL COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO DE UN LAGO OLIGOTRÓFICO.	93
FIG. 29. GRÁFICOS DE COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL DISEÑO DEL ÍNDICE PROPUESTO, PUNTUACIÓN OBTENIDA POR EL LBI EN RELACIÓN CON LOS VALORES MOSTRADOS, ASÍ COMO LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL LAGO ZIRAHUÉN. LO ANTERIOR CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD ANALIZADA.	100
FIG. 30. ANÁLISIS DE REGRESIÓN GRÁFICA QUE RELACIONA <i>wQINSF</i> FRENTE A <i>LBISCORE</i>	101
FIG. 31. CORRELACIÓN LINEAL ENTRE <i>LBISCORE</i> Y PORCENTAJE DE ABUNDANCIA DE ESPECIES EN EL LAGO WERBELLER	104
FIG. 32. VISUALIZACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DEL LAGO DE ZIRAHUÉN	106
FIG. 33. TERMINAL DEL PROGRAMA EN PYTHON DESARROLLADO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS, ES DECIR LA CLASIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LOS LÍMITES DE LA CAPA DE <i>METALIMNION</i> EN EL LAGO DE ZIRAHUÉN.	107
FIG. 34. DIVISIÓN DE LAS CAPAS DE ESTRATIFICACIÓN DEL LAGO DE ZIRAHUÉN SEGÚN EL MODELO DE CLASIFICACIÓN PROPUESTO.	109
FIG. 35. VISUALIZACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DEL LAGO DEL EMBALSE SAN ROQUE.	109
FIG. 36. TERMINAL DEL PROGRAMA EN PYTHON DESARROLLADO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS, ES DECIR LA CLASIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LOS LÍMITES DE LA CAPA DE <i>METALIMNION</i> DEL LAGO DEL EMBALSE SAN ROQUE.	110
FIG. 37. DIVISIÓN DE LAS CAPAS DE ESTRATIFICACIÓN DEL LAGO DE ZIRAHUÉN SEGÚN EL MODELO DE CLASIFICACIÓN PROPUESTO.	112
FIG. 38. ZONA FÓTICA Y ZONA DE MEZCLA EN CONDICIONES TÍPICAS DE ESTRATIFICACIÓN EN EL CENTRO DEL EMBALSE SAN ROQUE.	112
FIG. 39. MODELO DE CARACTERIZACIÓN DE UN LAGO DE TIPO MONOMÍCTICO CÁLIDO RESPECTO AL COMPORTAMIENTO DE SU TEMPERATURA.	113
FIG. 40 DIAGRAMA A BLOQUES DEL MODELO GLOBAL DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS LACUSTRE.	114

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VALORES IDEALES, MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE CADA PARÁMETRO INVOLUCRADO EN LA INVESTIGACIÓN PARA CADA ESPECIE ENDÉMICA DEL LAGO ZIRAHUÉN.	41
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SENSORES UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA, LOS NIVELES DE OXÍGENO DISUELTO, TURBIEDAD Y NIVEL DE AGUA.	45
TABLA 5. VALORES DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA.	50
TABLA 6. RANGOS DE VALORES IMPLEMENTADOS POR PARÁMETROS, ESTADO, FUNCIÓN DE MEMBRESÍA IMPLEMENTADA POR ESTADO EN EL MODELO DE EVALUACIÓN	50
TABLA 7. REGLAS DE RAZONAMIENTO DEL FIS	53
TABLA 9. FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LAS SALIDAS DEL MODELO DE EVALUACIÓN	54
TABLA 10. ALGORITMO DE ENTRENAMIENTO EN EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE CAPAS DE ESTRATIFICACIÓN DE UN LAGO DE TIPO MONOMÍCTICO CÁLIDO.	67
TABLA 11. ALGORITMO DE PRE-PROCESAMIENTO DE DATOS EN LA ETAPA DE CLASIFICACIÓN DE CAPAS DE ESTRATIFICACIÓN DE UN LAGO DE TIPO MONOMÍCTICO CÁLIDO.	69
TABLA 12. ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE DATOS EN LA ETAPA DE CLASIFICACIÓN DE CAPAS DE ESTRATIFICACIÓN DE UN LAGO DE TIPO MONOMÍCTICO CÁLIDO.	70
TABLA 13. ALGORITMO DE CLASIFICACIÓN BASADO EN ELKHOUKHI, H. ET. AL. (2022) EN EL PROCESO DE IDENTIFICACIÓN DE CAPAS DE ESTRATIFICACIÓN DE UN LAGO DE TIPO MONOMÍCTICO CÁLIDO	71
TABLA 14. ALGORITMO DE POST-PROCESAMIENTO DE DATOS EN LA ETAPA DE CLASIFICACIÓN DE CAPAS DE ESTRATIFICACIÓN DE UN LAGO DE TIPO MONOMÍCTICO CÁLIDO.	72
TABLA 15. VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE PROFUNDIDAD Y TEMPERATURA POR ETAPAS IDENTIFICADAS EN EL LAGO MONOMÍCTICO CÁLIDO.	73
TABLA 16. DESCRIPTORES DE UN LAGO DE TIPO MONOMÍCTICO CÁLIDO ESTRATIFICADO PARA UTILIZADOS EN EL PROCESO DE ENTRENAMIENTO DEL CLASIFICADOR: TOTAL DE MEDICIONES w , VALORES NUMÉRICOS DEL VECTOR r QUE REPRESENTA LA MEDICIÓN ORDENADA ASCENDENTEMENTE DE w NIVELES DE PROFUNDIDAD, VALORES NUMÉRICOS DEL VECTOR v QUE REPRESENTA LAS MEDICIONES DE TEMPERATURA RELACIONADAS CON r , VALORES NUMÉRICOS DEL VECTOR DEL GRADIENTE TÉRMICO LACUSTRE ∇V , ASÍ COMO LOS VALORES BINARIOS DEL VECTOR CUALITATIVO p .	74
TABLA 17. SIGNIFICADO Y ATRIBUTO IDENTIFICADO DE CADA CLASE.	76
TABLA 18. TABLAS DE FRECUENCIA DE CADA CLASE POR CADA ATRIBUTO IDENTIFICADO.	76
TABLA 19. TABLAS DE FRECUENCIA DE CADA CLASE POR CADA ATRIBUTO IDENTIFICADO CON AJUSTE MEDIANTE LA ESTIMACIÓN DE LAPLACE.	76
TABLA 20. TABLAS DE FRECUENCIA NORMALIZADA DE CADA CLASE POR CADA ATRIBUTO IDENTIFICADO.	77
TABLA 21. MEDICIONES REALIZADAS EN EL LAGO DE ZIRAHUÉN CONSIDERANDO FECHA, HORA, LATITUD, LONGITUD, PROFUNDIDAD Y TEMPERATURA.	77

TABLA 22. MEDICIONES OBTENIDAS DEL LAGO DE ZIRAHÚEN ORDENADAS DE MANERA ASCENDENTE CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD MOSTRADA, SOMBRADAS SE ENCUENTRAN LAS MEDICIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS QUE NO SE TOMARON EN CONSIDERACIÓN.	80
TABLA 23. DESCRIPTORES PROMEDIADOS DEL LAGO DE ZIRAHÚEN REPRESENTADOS POR <i>z</i> Y <i>t</i> .	84
TABLA 24. TABLA DE FRECUENCIAS NORMALIZADAS DEL ATRIBUTO <i>d6</i>	85
TABLA 25. RESULTADOS DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES CAPAS DE ESTRATIFICACIÓN DEL LAGO ZIRAHÚEN.	87
TABLA 26. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS OBTENIDOS DE LOS 8 PUNTOS GEOGRÁFICOS MUESTREADOS A DIFERENTES PROFUNDIDADES DEL LAGO DE ZIRAHÚEN DEBIDAMENTE ETIQUETADOS, INCLUYENDO HORARIOS DE MEDICIÓN, ASÍ COMO LA PRESIÓN ABSOLUTA, PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO Y EL VALOR DE CALIDAD DEL AGUA SEGÚN EL <i>wQINSF</i> .	90
TABLA 27. COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES DE OXÍGENO DISUELTO, TEMPERATURA, TURBIEDAD Y CALIDAD DEL AGUA OBTENIDO A PARTIR DEL PROMEDIADO DE LAS DISTINTAS MEDICIONES MUESTREADAS A DIFERENTES PROFUNDIDADES EN EL LAGO DE ZIRAHÚEN CON SU RESPECTIVA DESVIACIÓN ESTÁNDAR.	92
TABLA 28. MEDICIONES COMPARATIVAS DE 3 PUNTOS GEOGRÁFICOS SIMILARES ANALIZADOS POR DIFERENTES AUTORES EN DISTINTOS AÑOS, PERO EN LA MISMA ÉPOCA DEL AÑO CON SU RESPECTIVO.	95
TABLA 29. OCHO PUNTOS DE MEDICIÓN UBICADOS EN EL LAGO ZIRAHÚEN, A DIFERENTES PROFUNDIDADES; PUNTUADO POR EL IBL SEGÚN LA PROFUNDIDAD, LOS NIVELES DE OXÍGENO DISUELTO, LA TEMPERATURA Y LA TURBIDEZ COMO PARÁMETROS LIMNOLÓGICOS.	97
TABLA 30. COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES DE OXÍGENO DISUELTO, TEMPERATURA, TURBIDEZ, CALIDAD DEL AGUA Y LBI OBTENIDOS A PARTIR DEL PROMEDIO DE LAS MEDICIONES MUESTREADAS A DIFERENTES PROFUNDIDADES EN EL LAGO ZIRAHÚEN CON SU RESPECTIVA DESVIACIÓN ESTÁNDAR.	99
TABLA 31. DESCRIPTORES ABIÓTICOS Y EVALUACIÓN DE SCARDI ET. AL, Y <i>LBISCORE</i>	102
TABLA 32. COMPARACIÓN ENTRE LA EVALUACIÓN DE LBI Y JUZA T. ET. AL. EVALUACIÓN SEGÚN LA PROFUNDIDAD, LOS NIVELES DE OD Y LA TEMPERATURA.	103
TABLA 33. EVALUACIÓN DE <i>LBISCORE</i> A DIFERENTES PROFUNDIDADES A TRAVÉS DE LOS AÑOS CON MEDIDAS EXPUESTAS POR DIFERENTES AUTORES.	105
TABLA 34. LISTADO DEL NÚMERO DE PUNTOS ANALIZADOS, PROFUNDIDAD DESCRITA, TEMPERATURA Y LA CLASIFICACIÓN ASIGNADA DEPENDIENTE DE LA PROFUNDIDAD Y LA TEMPERATURA DEL LAGO DE ZIRAHÚEN	108
TABLA 35. LISTADO DEL NÚMERO DE PUNTOS ANALIZADOS, PROFUNDIDAD DESCRITA, TEMPERATURA Y LA CLASIFICACIÓN ASIGNADA DEPENDIENTE DE LA PROFUNDIDAD Y LA TEMPERATURA DEL LAGO DEL EMBALSE SAN ROQUE.	111
TABLA 33. PARÁMETROS UTILIZADOS POR EL <i>wQINSF</i> CON LAS UNIDADES REPRESENTADAS POR PARÁMETRO Y SU RESPECTIVO PESO ASOCIADO	134
TABLA 34. PALABRAS DESCRIPTIVAS ASOCIADAS AL ÍNDICE <i>wQINSF</i> CON SU RESPECTIVO RANGO	134

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La *Limnología* es una rama de la ecología encargada de estudiar los ecosistemas acuáticos continentales y epicontinentales mediante el monitoreo acuático de las masas de agua con el fin de caracterizarlas y lograr la gestión y conservación de los medios acuáticos (Banderas, A., et. al., 1996). El monitoreo acuático es una actividad de suma importancia para el conocimiento del estado de las masas de agua continental, mismas que son fuente básica de recursos para el ser humano y las diferentes actividades económicas dependientes de él.

A partir de esta actividad es factible la toma de decisiones para el manejo adecuado de uno de los recursos naturales más importante en la Tierra, teniendo en consideración que a través de los sistemas de monitoreo es posible conocer las características de interés principal siendo de gran apoyo para los especialistas; siendo el monitoreo ecológico uno de los temas más abordados por numerosos autores en distintas áreas geográficas y con diferentes enfoques (Spelleberg, 1991; Chapman, 1992; Mudrock y MacKnight, 1994; Díaz et al., 1995; López y Guzmán, 1995; Shear, 1995; Bain y Stevenson, 1999; De la Lanza, 2000; Abarca, 2007; Alippi et al., 2010; Carbajal-Hernández et al., 2013; Hongpin et al., 2015; Rahmat et al., 2016; Palani et al., 2020; Gandra et al., 2015). El monitoreo ecológico se ha concentrado en medir la calidad ambiental en aire y agua; uno de sus principales objetivos es caracterizar el comportamiento de los ecosistemas a través de índices que los describan, empleando indicadores de calidad ambiental e inclusive indicadores biológicos. Los indicadores biológicos (también conocidos como bioindicadores) son elementos fundamentales en la aplicación de políticas ambientales y de gestión de recursos hídricos en la mayoría de los países desarrollados (Norris y Morris, 1995; Moog & Chovanec, 2000). Sin embargo, en materia de lagos, los esfuerzos serios por establecer lineamientos y directrices para programas de monitoreo han sido relativamente recientes (Convención Ramsar 2013 y 2016).

Los muestreos relacionados con mediciones de parámetros limnológicos convencionalmente se rigen bajo distintos estándares de calidad, tanto internacionales (ISO) como nacionales (NMX), empleados para la recolección de muestras de agua (ISO, 2018; SECOFI, 1980), medición de la temperatura (SE, 2013), niveles de oxígeno disuelto por el método electroquímico (SE, 2010; ISO, 2012) y turbiedad (SE, 2001; ISO, 2016) en aguas naturales por mencionar algunas, donde prevalece la importancia de la recolección de muestras *in situ* en cortos periodos de tiempo.

Estudios relacionados con el análisis y evaluación de los cuerpos de agua en sus respectivos casos de estudio, indican la realización del muestreos en tiempos de medición demasiado elevados (Martínez-Almeida y Tavera, 2005; Ortiz y Rendón, 2010; Mendoza et al., 2015; Armendáriz y Martínez, 2016; Sigala et al., 2017), ocasionando la obtención de pocos puntos de análisis, ya que las mediciones suelen realizarse a lo largo de varios días, afectando los parámetros medidos de acuerdo con el cambio climático, la irradiación solar, presión

atmosférica, por mencionar algunas. Por normatividad, no realizar las mediciones en un corto periodo de tiempo afecta la precisión del resultado en las muestras obtenidas.

1.2 Problemática

Actualmente la mayoría de las aguas continentales muestran signos de degradación y deterioro ocasionados por la explotación irracional de sus recursos (Dunalska, J. A., y Wiśniewski, G., 2016; Hall-Spencer, J. M., y Harvey, B. P., 2019), surgiendo la necesidad de tomar medidas a corto, mediano y largo plazo para su conservación, administración y gestión. Además, la falta de recursos tecnológicos y modelos computacionales que provean métodos eficientes de análisis en los diversos ecosistemas acuáticos es una constante que afecta la investigación de los cuerpos de agua (Aguilar Ramírez, Flores Santillan, & González Ania, 2012), ya que las mediciones y relaciones de los parámetros limnológicos, suelen ser tardadas (Mendoza et al., 2015; Martínez-Almeida y Tavera, 2005; Sigala et al. 2017; Paniagua, 2010; Armendáriz y Martínez, 2016).

Es importante mencionar que los indicadores biológicos multiparamétricos o índices bióticos multiparamétricos son muy comunes para realizar el análisis de la calidad ambiental de los cuerpos de agua, sin embargo, relacionar múltiples parámetros para emitir una evaluación se vuelve complejo y la falta de recursos computacionales y tecnológicos que permitan analizar los índices bióticos multiparamétricos se ha convertido en una problemática. ya que suelen considerar pocas muestras generando una pérdida de información, mientras que las métricas seleccionadas se procesan heurísticamente (Scardi et. al., 2008)

La mayor parte de los estudios en cuencas hidrológicas se realiza de forma casi manual, solo se apoya del uso de sensores y equipos de medición de forma independiente, en donde el operador de muestreo aparte de recolectar las muestras tiene que maniobrar los instrumentos y registrar sus lecturas en bitácoras generalmente de papel, lo cual hace muy lento y complejo el proceso de medición y de obtención de datos. Adicionalmente, se deben anexar los problemas de movilidad dentro del cuerpo de agua, ya que las mismas corrientes o irregularidades del lugar complican aún más este tipo de trabajos, con altas posibilidades de tener accidentes de forma personal o del equipo de muy elevado costo.

El estudio de los lagos de tipo endorreico es de gran importancia para el área de la Limnología (Mendoza, 2015). En México, específicamente en el estado de Michoacán, existen tres lagos de tipo endorreico: Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén. Los dos primeros muestran grandes signos de deterioro durante las últimas décadas (Chacón et al., 2010). El Lago Cuitzeo ha sido desecado continuamente debido a la expansión urbana y su constante contaminación, aunado el aprovechamiento excesivo del agua del lago, y principalmente a las infraestructuras construidas que dividen al lago por la mitad; acciones que han alterado la capacidad del lago para llevar a cabo su ciclo natural afectando todo el ecosistema del lugar (Ortiz y Lassman, 2019; Maldonado-López, 2019). El Lago de Pátzcuaro presenta un deterioro por sobreexplotación y contaminación debido a la tala inmoderada y sobrepoblación del lugar. Por otra parte, Zirahuén resulta de mayor interés porque no sigue el patrón de los dos anteriores a pesar de ubicarse en las cercanías y ser de menor dimensión; por el contrario, se

trata de un lago de agua cristalina el cual es protegido por la entidad, no obstante, tanto pobladores como investigadores de la UMSNH y organismos gubernamentales involucrados realizan peticiones a legisladores estatales y federales para poder mantener, sanear y rehabilitar el lago. Peticiones realizadas como la creación de legislaciones para evitar el uso de agroquímicos prohibidos, el uso de detergentes bajos en fosfatos, la implementación de cultivos orgánicos cerca de centros de población y áreas claves, además de implementar un sistema de monitoreo y seguimiento de calidad y condiciones del lago, son fundamentales para su conservación, ya que el uso de la cuenca es fuente principal de ingresos para la población aledaña. Cabe mencionar que la principal limitante para realizar acciones a favor del lago de Zirahuén son los recursos económicos (Ayala, 2019).

No obstante, en México, de acuerdo con el plan nacional de desarrollo del Gobierno Federal de México de 2013 a 2018, y como parte del programa institucional del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2014 - 2018 (PND, 2017; DOF, 2014), existe una gran necesidad de generar, adquirir, implementar y proveer recursos tecnológicos que permitan la buena gestión de los recursos hídricos y la investigación de la biodiversidad acuática.

1.3 Justificación

Los muestreos relacionados con mediciones de parámetros limnológicos convencionalmente se rigen bajo distintos estándares de calidad, tanto internacionales (ISO), como nacionales (NMX), empleados para la recolección de muestras de agua (ISO 5667-3:2018; NMX-AA-003-1980), medición de la temperatura (NMX-AA-007-SCFI-2013), niveles de oxígeno disuelto por el método electroquímico (PROY-NMX-AA-012/2-SCFI-2009; ISO 5814:2012) y turbiedad (NMX-AA-008-SCFI-2016; ISO 7027-1:2016) en aguas naturales por mencionar algunas, donde prevalece la importancia de la recolección de muestras in situ en cortos periodos de tiempo.

Estudios relacionados con el análisis y evaluación de los cuerpos de agua en sus respectivos casos de estudio, indican la realización del muestreo en tiempos de medición demasiado elevados (Martínez-Almeida y Tavera, 2005; Paniagua, 2010; Mendoza, R. et al., 2015; Armendáriz y Martínez, 2016; Sigala et al. 2017), ocasionando la obtención de pocos puntos de análisis, donde las mediciones suelen realizarse a lo largo varios días, afectando los parámetros medidos de acuerdo al cambio climático, irradiación solar, presión atmosférica, etc. Por normatividad, el no realizar las mediciones en un corto periodo de tiempo, afecta la precisión del resultado en las muestras obtenidas.

Actualmente, el mercado ofrece diversos dispositivos de elevado costo como los medidores para calidad del agua de Van Walt (2020), las sondas multiparamétricas de la serie 600 de SIDMAR (2020), entre otros (Hanna Instruments, 2020), capaces de medir distintos parámetros in situ. Sin embargo, los especialistas interesados en la conservación de los cuerpos de agua se ven obligados a diseñar nuevas herramientas que permitan el muestreo en sitio a bajo costo con distintos enfoques (Marcelli et al., 2014; Davis, 2016; Bhardwaj, et. al., 2018; Wade y

Ericksen, 2019). No obstante, no todos los especialistas en el área cuentan con el conocimiento para diseñar sus propias herramientas especializadas, ya que la mayoría de los autores realizan la recolección de las muestras de agua a diferentes profundidades para obtener el perfil vertical de la masa de agua mediante el uso de una botella de Van Dorn, posteriormente obtienen sus mediciones por cada parámetro de manera independiente, empleando una serie de dispositivos dedicados para la medición de la temperatura, los niveles de oxígeno, turbiedad y así consecuentemente. (Martínez-Almeida y Tavera, 2005; Ortiz y Rendón, 2010; Mendoza et al., 2015; López y Salas, 2019). En estos trabajos, se necesita de un dispositivo GPS para obtener la coordenada del punto de medición, requiriendo un post-procesamiento de la información, es decir, primero encontrar la coordenada, anotarla, posteriormente realizar las mediciones in situ mediante el proceso descrito con anterioridad, preservar las muestras, enviarlas al laboratorio en caso de ser necesario y procesarlas mediante una hoja de cálculo electrónica.

La aplicación de métodos de inteligencia artificial en los sistemas de gestión del agua ayuda a garantizar el cumplimiento en el tratamiento, caracterización y evaluación de los cuerpos de agua reduciendo los costos de implementación. Se han realizado diferentes investigaciones en torno a la modelización, asistencia en la toma de decisiones y gestión operativa del agua para el control de la contaminación, el uso racional del recurso y evaluación (Raghav et. al., 2011; Hmoud Al-Adhaileh and Waselallah Alsaade, 2021), sin embargo, en México, la implementación de herramientas tecnológicas relacionadas con evaluación de los índices tanto de calidad del agua como bioindicadores son una necesidad.

1.4 Solución propuesta

El presente trabajo propone el desarrollo y la implementación de un sistema computacional para el análisis automatizado de la calidad del agua en zonas lacustres, mediante la programación de un modelo de evaluación multiparamétrico. Esto se realizará mediante el desarrollo y la implementación de un software de instrumentación virtual que permite visualizar gráficamente la coordenada geo-posicionada, medir parámetros fisicoquímicos como temperatura, niveles de oxígeno disuelto y turbiedad a distintas profundidades mediante una serie de sensores. Posteriormente, permitirá realizar estimaciones inmediatas de calidad del agua y la clasificación, así como la evaluación de la zona analizada en un corto periodo de tiempo, es decir, la evaluación del lugar mediante un Índice Biótico Lacustre y la caracterización del comportamiento del régimen térmico del objeto de estudio.

Los valores obtenidos serán analizados y procesados por medio de un modelo de razonamiento difuso y un clasificador de zonas el cual evaluará los parámetros en conjunto para emitir un indicador de evaluación por zona lacustre analizada, así como caracterización del régimen térmico del lago. En el proceso de integración, se obtendrá la interfaz gráfica de usuario que permitirá el monitoreo de las mediciones, así como la visualización de la información obtenida después de la valoración previamente mencionada. Con el desarrollo del presente proyecto se ayudará a los hidrobiólogos a realizar un mejor estudio sobre la densidad biótica, así como la caracterización y el estado de los lagos al obtener mediciones más precisas de manera más rápida y sencilla.

1.5 Alcance

El alcance del proyecto se ve reflejado en los siguientes puntos:

- A1.** Obtención de los niveles de oxígeno disuelto, temperatura y turbidez en distintos puntos geográficos a diferentes profundidades de cualquier cuerpo de agua continental.
- A2.** Análisis medioambiental relacionado con el índice de calidad del agua del lago de Zirahuén.
- A3.** Evaluación de diferentes zonas en el Lago de Zirahuén a través del puntaje obtenido por el Índice Biótico Lacustre relacionado con las condiciones óptimas para las especies endémicas del lago.
- A4.** Caracterización del régimen térmico de lagos de tipo monomítico cálidos; identificación de las capas de estratificación mediante el modelo de clasificación de capas de estratificación.

1.6 Hipótesis

Mediante la construcción de un modelo de inferencia difusa, se podrá identificar zonas bióticas adecuadas para la supervivencia de especies acuáticas integrando indicadores de parámetros limnológicos en ecosistemas acuáticos en cuerpos de aguas continentales y la identificación de sus capas de estratificación.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de evaluación para zonas bióticas mediante el estudio de parámetros limnológicos empleando modelos de razonamiento difuso.

1.7.2 Objetivos específicos

- O1.** Estudio y caracterización de parámetros limnológicos en cuerpos lacustres.
- O2.** Diseño de un sistema de extracción de datos mediante un dispositivo electrónico sumergible.
- O3.** Desarrollo de un modelo computacional basado en inferencia difusa para la evaluación de zonas bióticas en cuerpos lacustres.
- O4.** Desarrollo de un modelo computacional usando técnicas de reconocimiento de patrones para la identificación zonas de estratificación de cuerpos lacustres.
- O5.** Implementación de los modelos computacionales a través de un sistema computacional para validación de los resultados.
- O6.** Elaboración de software especializado para visualización e interpretación de resultados.

1.8 Metodología de la investigación

La metodología empleada para el presente trabajo se muestra en Fig. 1:

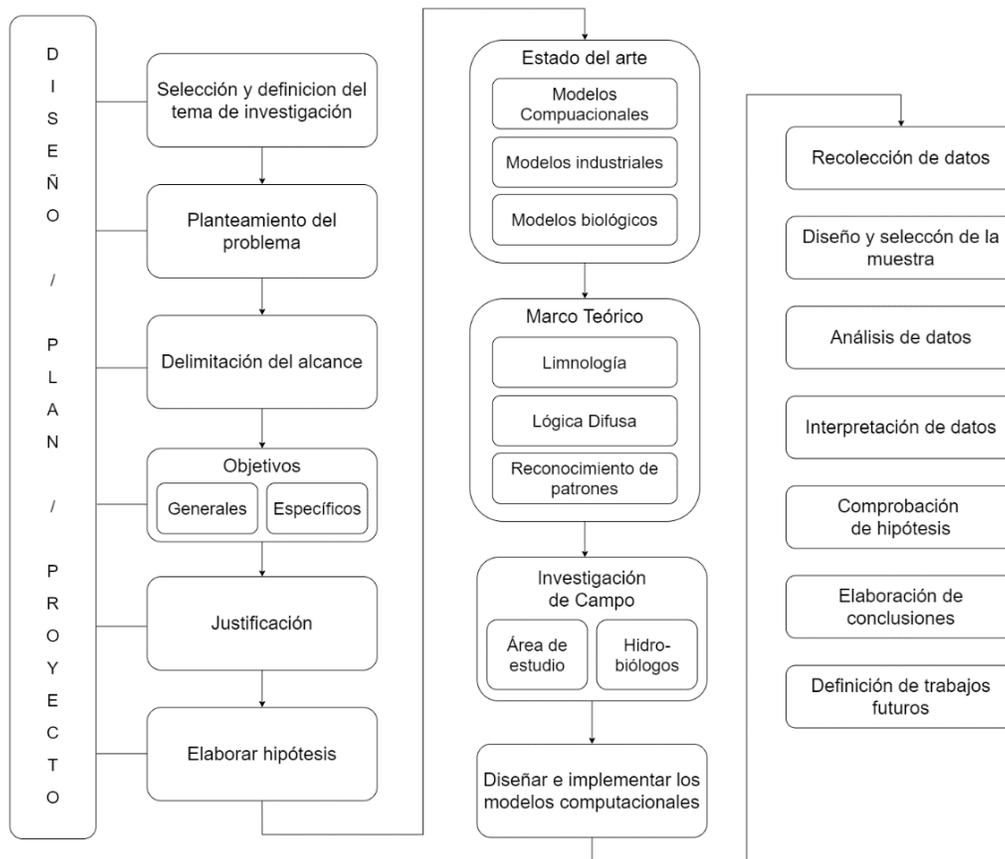


Fig. 1. Diagrama del proceso de investigación.

1. Selección y definición del tema de tesis.
2. Planteamiento del problema.
3. Delimitación del alcance, objetivos y justificación de la investigación.
4. Formulación de hipótesis.
5. Revisión exhaustiva de literatura científica existente sobre sistemas de medición, supervisión y análisis de parámetros limnológicos en ecosistemas acuáticos, modelos computacionales que ayudan a la medición de parámetros y su aplicación en casos de estudios similares. Con la información recolectada, se procede a elaborar el estado del arte.
6. El Marco Teórico se realizará mediante la obtención, consulta y recopilación de la literatura concerniente al problema de investigación considerando aspectos relevantes, como son: parámetros de medición y evaluación de ecosistemas acuáticos, modelos computacionales para la evaluación de

zonas lacustres en masas de agua continentales mediante lógica difusa e instrumentación para la elaboración del dispositivo electrónico.

7. Para llevar a cabo la Investigación de Campo, se acudirá al área de estudio para que los hidrobiólogos expliquen sus necesidades y problemas relacionados con el estudio y análisis del lago de Zirahuén.
8. Diseño e implementación del modelo y sistema electrónico de evaluación de los parámetros involucrados. Cabe mencionar que el paso 7 y 8, están estrechamente ligados, ya que se requiere de retroalimentación de los expertos (hidrobiólogos).
9. Diseñar e Implementar el sistema computacional.
 - a. Sistema electrónico de medición de parámetros limnológicos.
 - b. Software para el monitoreo de los parámetros y visualización de las zonas con mayor posibilidad de sustentar la biodiversidad del lago.
10. Pruebas experimentales en campo para la recolección de datos.
 - a. Instalación del sistema
 - b. Calibración de sensores en campo.
11. Recolección y análisis de datos.
12. Interpretación de datos.
13. Comprobación de hipótesis.
14. Elaboración de conclusiones.
15. Definir trabajos futuros.

1.9 Contribuciones esperadas

En esta propuesta se aportarán las siguientes contribuciones:

- C1.** El desarrollo de un sistema embebido para el monitoreo y análisis de parámetros limnológicos en cuerpos lacustres (O2).
- C2.** Creación de un modelo computacional para la evaluación de zonas bióticas de interés, mediante los parámetros limnológicos de importancia para las poblaciones acuícolas (O3).
- C3.** Creación de un modelo computacional para la identificación, clasificación y caracterización de las distintas capas de un lago de acuerdo con su régimen térmico (O4).
- C4.** Software especializado para la visualización de la información obtenida (O5, O6).

1.10 Estructura de la tesis

La presente tesis se organiza en 6 capítulos.

El *capítulo 1* introduce al tema de investigación, presenta la problemática a resolver, así como la justificación y los alcances del proyecto, detallando los objetivos del trabajo y la hipótesis planteada. Además, incluye la metodología aplicada.

El *capítulo 2* proporciona una búsqueda amplia de los trabajos que ya han sido desarrollados por otros investigadores, así como la diversidad de equipo existente en el mercado.

En el *capítulo 3* se hace un análisis de conceptos teóricos que guían el trabajo, tales como la localización del área de trabajo, fundamentos de lógica difusa, clasificadores, parámetros medidos, entre otros.

El *capítulo 4* describe a detalle los modelos de evaluación utilizados en el presente proyecto.

El *capítulo 5* muestra un análisis de los resultados experimentales obtenidos en la investigación y su respectiva interpretación.

Finalmente se presentan el *capítulo 6* las conclusiones derivadas de la investigación y la consideración del trabajo a futuro por realizar.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Para abordar el contexto del presente trabajo, es necesario conocer cuál es el estado actual del monitoreo de los cuerpos de agua continentales, específicamente de los lagos; la diversidad de analizadores de acuerdo con su estado trófico y/o régimen térmico, y como varían en función de los parámetros obtenidos de los muestreos realizados en los diversos tipos de lagos. Realizando una revisión de la literatura relacionada, se encontraron diversos analizadores y modelos de clasificación que ayudan a la caracterización y evaluación de los cuerpos lacustres. Algunos de los estudios descritos tienen una estrecha relación con el objeto de estudio del presente trabajo: el lago de Zirahuén.

2.1.1 Evaluación de la calidad del cuerpo de agua

Alrededor del mundo, tanto los índices de calidad de agua como los bióticos son ampliamente utilizados para obtener un valor numérico, es decir, un valor cuantitativo de algunas características de los cuerpos de agua y de los ecosistemas acuáticos, respectivamente. Gracias a la facilidad de los índices de calidad del agua (WQI) como el índice de Horton que se considera el primer modelo de WQI (Horton, 1965), el índice más utilizado en todo el mundo propuesto por la Fundación Nacional de Saneamiento wQI_{NSF} (Brown et. al., 1970) y otro de los índices más utilizados propuesto por el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME, 2001) por nombrar algunos, permite evaluar la calidad global del agua. Desempeñan un papel fundamental en el seguimiento, la comparación y el control del recurso. Cabe mencionar que los WQIs actuales se han basado exclusivamente en las características físicas y químicas, y rara vez incluyen factores biológicos relacionados con las características de la fauna presente en los cuerpos de agua (Abassi y Abassi, 2011).

No obstante, en las últimas décadas se han desarrollado algunos métodos de evaluación ambiental acuática basados en los peces: la mayoría de ellos inspirados en el trabajo presentado por Karr (1981), quien desarrolló el índice biótico más utilizado en Limnología, el Índice de Integridad Biótica (IBI). El IBI es un índice multimétrico que combina diferentes parámetros y variables para obtener una puntuación individual que responda a las perturbaciones ambientales. A pesar de lo anterior, también se propusieron otro tipo de métodos que difieren del paradigma del IBI debido a la complejidad de los criterios de puntuación que consideran las características multiparamétricas de los peces y los atributos ambientales como la morfología de los cuerpos de agua, pero todos ellos basados en enfoques multiparamétricos.

La falta de optimización computacional multiparamétrica que ayude a la implementación de los índices bióticos y de calidad del agua que utilizan descriptores multiparamétricos afecta a algunas fases de implementación del desarrollo de los índices, como el tiempo consumido para su implementación basada en procedimientos de prueba y error, así como la precisión de los datos obtenidos, lo que implica que diferentes desarrolladores de ambos, índices bióticos y de calidad del agua, pueden producir diferentes soluciones basadas en el mismo conjunto de datos. La precisión de los métodos para evaluar el estado del ecosistema acuático siempre disminuye cuando se aplica una escala espacial grande, como es el caso del estudio de los lagos de gran superficie. Esto no es sorprendente, porque ningún modelo, método o índice puede ser simple, general y preciso al mismo tiempo. Los índices multiparamétricos están diseñados para ser intrínsecamente simples, un método puede ser general pero no exacto, o puede ser exacto, pero no general (Scardi et. al., 2007)

2.1.2 Modelos para la evaluación de la densidad de las especies

A pesar de la popularidad de los índices multiparamétricos, tanto de calidad de agua como bióticos, no son la única solución que permite evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos. Existen modelos propuestos que realizan una evaluación de la masa de agua y comparan sus resultados con los grupos de peces observados en función de las variables físicas y químicas relevantes para el ecosistema acuático obteniendo índices basados en la desviación de la expectativa de coexistencia de los peces (Oberdorff et al., 2001; Oberdorff et al., 2002). Por ejemplo, Oberdorff et al. (2001), compara las características donde se pueden encontrar 34 especies a lo largo de un cuerpo de agua y evalúa las características abióticas que influyen en la localización de las especies analizadas y realiza un modelo de regresión para estimar y predecir el número de especies que se encontrarán por lugar o zona evaluar mediante la emisión de una desviación estándar del número de especies observadas y el valor predicho de las especies existentes en el punto analizado. Por su parte, Sacardi et. al. (2008), diseñaron un sistema experto para la evaluación de una cuenca hidrográfica basando su desarrollo en una red neuronal perceptrón multicapa implementando una interfaz gráfica para usuarios no técnicos en el uso del modelo. La red neuronal recuperó juicios de expertos basados en un conjunto de descriptores abióticos y características de los peces, proporcionando una estimación consensuada del estado ecológico para la masa de agua analizada. Este enfoque permite clasificar cada clase de estado ecológico en alto, bueno, moderado, pobre y malo mediante un sistema difuso de juicios de expertos codificados.

En las últimas décadas se han publicado varias publicaciones relacionadas con aspectos limnológicos del Lago Zirahuén. Por ejemplo, Martínez y Tavera (2005) reflejan la realización de mediciones mensuales de fitoplancton, apoyadas por datos fisicoquímicos y niveles de concentración de clorofila, en la búsqueda de factores ambientales que pudieran explicar la constante presencia de algas en Zirahuén. Se concluyó que el comportamiento general del lago Zirahuén era el típico de los lagos monomíticos cálidos tropicales de gran altitud. Sin embargo, la metodología presentada para realizar las mediciones es poco precisa y sugiere algunas variaciones debido a la falta de tecnología. Igualmente, el trabajo presentado por Guridi, X. M., Retana, A. N., y Torres, A. C., (2004) que caracterizó el lago Zirahuén de manera general describiendo la flora y vegetación

acuática del lago, representada por 35 familias, 55 géneros y 93 especies, de las cuales 27 son tolerantes, 42 subacuáticas y 24 acuáticas estrictas. A pesar de estos estudios, las mediciones mostradas tienen más de una década de antigüedad, ya que realizar la caracterización del lago Zirahuén sin la tecnología adecuada para ello, resulta ser un proceso lento.

No basta con diseñar índices para controlar la calidad del medio ambiente o la integridad biótica. Antes de proponerlos para su uso generalizado, es necesario validarlos. Para ello existen dos enfoques: si existen otros índices diseñados para sitios similares en la misma región, el índice propuesto puede ser validado en base a la correlación con el índice ya probado y, si no existen otros índices ya probados para la región y el tipo de sistemas acuáticos en estudio, la opción es buscar relaciones entre los índices que miden la calidad ambiental y/o la integridad biótica a través de análisis de correlación y regresión. (Munguía et. al., 2007), como en México, donde la prevalencia del uso de la comunidad de peces como indicadores de salud ambiental y/o biomonitoreo es aún baja y más aún el uso del Índice de Integridad Biótica y el Índice de Calidad Ambiental (Lyons et al., 1995; De la Lanza et al., 2000; Medina, 2003) y donde apenas se ha iniciado el diseño de protocolos para monitorear la calidad e integridad de sus ecosistemas acuáticos.

2.1.3 Modelos para la clasificación de los lagos de acuerdo con su régimen térmico

El estudio y determinación de los modelos de estratificación termal es relevante ya que influyen de manera fundamental en los ciclos físicos y químico-biológicos de los lagos y embalses. En el trabajo “Dinámica térmica de cuerpos de aguas eutróficas: caso Embalse San Roque” (Degano M., et. al., 2016) se presenta el caso del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina) y se describe su régimen térmico estacional. Sobre la base de datos comprendida en el período 1999-2014, se analiza el comportamiento estacional en la columna de agua del embalse considerando la temperatura, conductividad y oxígeno disuelto en dos áreas del cuerpo de agua y se aplica un indicador de estratificación para dichas variables. La metodología utilizada fue satisfactoria para describir la dinámica de estratificación del embalse San Roque siendo clasificado como monomítico cálido, con presencia de una estratificación estival y una mezcla otoñal, aunque incide negativamente por la condición eutrófica del embalse.

El modelo de ecosistema lacustre PCLake (Janssen A., et. al., 2019) es un modelo basado en procesos que se desarrolló para simular la calidad del agua sobre interacciones ecológicas en lagos poco profundos y no estratificados en la zona climática templada. PCLake + amplía el modelo PCLake para cubrir una amplia gama de lagos de agua dulce que difieren en el régimen de estratificación y procesos relacionados con el clima. El modelo se extendió con la capa de hipolimnio que puede ser invocado y configurado forzando funciones o mediante simples relaciones empíricas incorporadas que imponen la estratificación. Se han realizado más ajustes al modelo original de PCLake con respecto al cálculo de 1) irradiación de luz en la columna de agua, 2) procesos de evaporación y 3) fenología de macrófitas. La simulación de PCLake + para diferentes tipos de lagos

cumple bien con el comportamiento limnológico generalmente aceptado para los cuerpos de agua prometiendo contribuciones futuras a la teoría ecológica y la aplicación a lagos de todo el mundo.

El artículo desarrollado por Karpatne A., et. al. (2018) presenta un marco novedoso para combinar el conocimiento científico de modelos basados en la física con redes neuronales para avanzar en el descubrimiento científico. Este marco, denominado red neuronal guiada por la física (PGNN), aprovecha la salida de simulaciones de modelos basados en la física junto con características de observación para generar predicciones utilizando una arquitectura de red neuronal. Además, este documento presenta un marco novedoso para usar funciones de pérdida basadas en la física en el objetivo de aprendizaje de las redes neuronales, para garantizar que las predicciones del modelo no solo muestren errores más bajos en el conjunto de entrenamiento, sino que también sean científicamente consistentes con la física conocida en las etiquetas de un conjunto. Ilustramos la efectividad de PGNN para el problema del modelado de la temperatura del lago, donde las relaciones físicas entre la temperatura, la densidad y la profundidad del agua se utilizan para diseñar una función de pérdida basada en la física. Al utilizar el conocimiento científico para guiar la construcción y el aprendizaje de redes neuronales, podemos demostrar que el marco propuesto garantiza una mejor visión general al utilizar una serie bastante amplia de condicionantes de entrada, tales como el día del año, la profundidad, la radiación, temperatura atmosférica, humedad, velocidad del viento, lluvia, etc.

Los trabajos anteriormente mencionados, necesitan de grandes cantidades de parámetros a la entrada para obtener un comportamiento y caracterización del lago, algunos de ellos utilizan una serie de complejos algoritmos que en la mayoría de los casos no se menciona la capacidad de cómputo necesario para su procesamiento.

Derivado de la revisión del estado del arte, se implementa un sistema computacional con hardware y software avanzado que utiliza la lógica difusa para parámetros significativos en las mediciones y análisis de datos que permiten a los hidrobiólogos mejorar la investigación de la densidad biótica en Zirahuén utilizando un índice biótico propuesto, el Índice Biótico Lacustre - IBL, permitiendo conocer las condiciones reales del lago aplicando mediciones precisas de manera rápida y sencilla; evaluando las zonas lacustres y clasificándolas por las características de las especies endémicas presentes en el ecosistema acuático, así como su clasificación, respecto al régimen térmico presentado.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Hidrobiología del Estado de Michoacán, México

La *hidrobiología* es la ciencia que, como parte de la *biología*, se encarga del estudio de los seres vivos que habitan los cuerpos de agua, tanto dulces como salinos. Las aguas dulces, o aguas continentales (Vich,1996), son el objeto de investigación de la *limnología* (Cajal, 2020). La *limnología* es la rama de la ecología que estudia los ecosistemas acuáticos continentales (ríos, lagos, lagunas, marismas, estuarios y charcas), las interacciones entre los organismos acuáticos y el ambiente estableciendo su abundancia y distribución (Guerrero, 2020). Un lago, es decir, el cuerpo de agua continental objeto de estudio, es un cuerpo de agua que se encuentra rodeado de tierra.

Hay tres formas básicas en que los limnólogos clasifican los lagos: cuántos nutrientes tienen los lagos, cómo se mezcla su agua y qué tipos de peces viven en ellos.

- Productividad trófica: cuando los lagos se clasifican por la cantidad de nutrientes que tienen, los limnólogos utilizan el estado trófico. El estado trófico de un cuerpo de agua es una propiedad íntimamente relacionada tanto con la estructura del ecosistema, es decir, la relación entre sus componentes bióticos y abióticos respecto de la influencia de las actividades humanas. Al aumentar la concentración de nutrientes se favorece la producción de algas, incrementando la producción primaria, la demanda de oxígeno disuelto y la transparencia (Cony, N. et. al., 2016), tal y como se aprecia en Fig. 2.

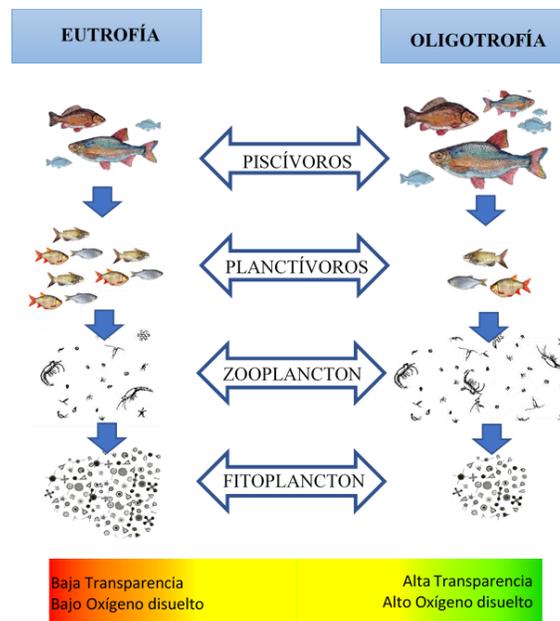


Fig. 2. Representación gráfica de las características del estado trófico de un lago.

- Dinámica del lago: los lagos tienen una dinámica anual que se rige por las variaciones de temperatura producidas durante las estaciones del año y que ocasionan cambios en la densidad del agua. Los lagos también pueden clasificarse según la forma en que el agua se mezcla o cambia desde la superficie (*epilimnion*) hasta su máxima profundidad (*hipolimnion*). Esto se llama *turnover* del lago, que es la mezcla estacional del agua en los lagos durante las diferentes estaciones del año tal y como se aprecia en la Fig. 3.

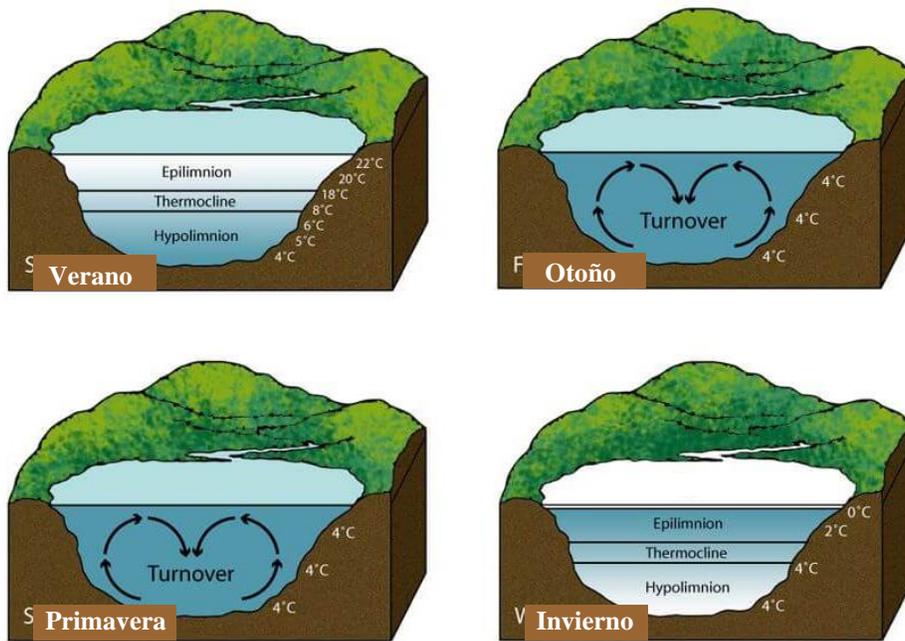


Fig. 3. Dinámica de los lagos durante las diferentes estaciones del año.

Durante el otoño, el descenso de la temperatura ambiente y los fuertes vientos hacen que el agua de las dos capas se vuelva a mezclar y, por lo tanto, vuelva a tener características homogéneas. Esta disminución de la temperatura ambiente provoca el enfriamiento de las aguas superficiales (*epilimnion*) que, al volverse más densas que las del fondo, tienden a hundirse, produciendo así una mezcla vertical de las dos capas. La acción del viento facilita y acelera este proceso. Obligando al agua del *hipolimnion* a elevarse.

Durante el invierno, el *epilimnion* es más frío porque está expuesto al viento, la nieve y las bajas temperaturas del aire. El *hipolimnion* es el más cálido ya que se encuentra aislado por la tierra, razón por la cual hay hielo en los lagos durante el invierno, mientras que los peces nadan en aguas líquidas ligeramente más cálidas debajo.

Durante la primavera, el lago vuelve a cambiar. El agua superficial fría se hunde hasta el fondo, obligando al agua más cálida y menos densa desplazarse hacia arriba.

Esta dinámica no es extensible a todos los lagos. De hecho, los lagos suelen clasificarse según el tipo de dinámica, o tipo de estratificación, que presentan en lagos *amicticos*, *monomicticos* fríos, *monomicticos* cálidos,

polimicticos fríos continuos, *polimicticos* fríos discontinuos, *dimicticos*, *polimicticos* cálidos discontinuos y *polimicticos* cálidos continuos

Algunos tipos de lagos, basados en características térmicas y de circulación, se generalizan en relación con las distribuciones altitudinales y latitudinales, la Fig. 4. demuestra una distribución geográfica generalmente observada de estos tipos de lagos ya que la situación geográfica condiciona la dinámica de los sistemas lacustres.

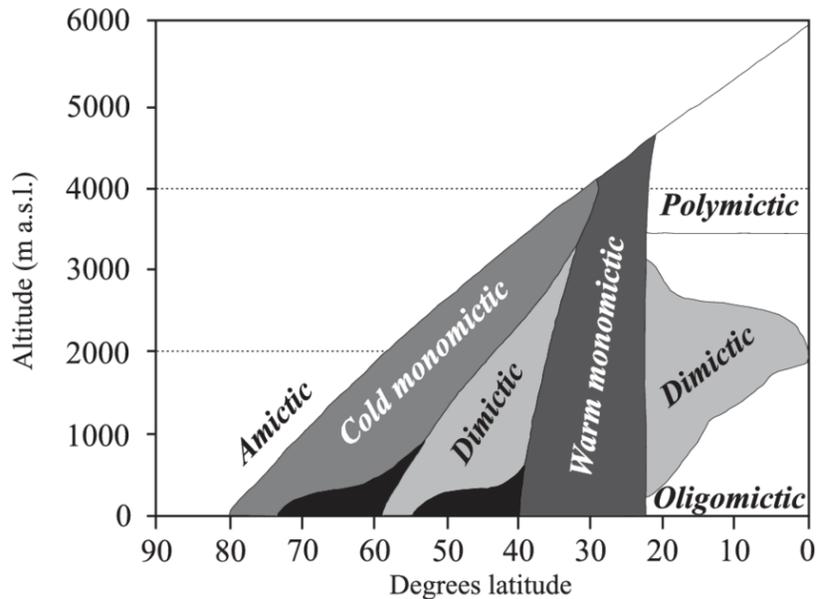


Fig. 4. Clasificación de lagos de acuerdo con sus características geográficas.

- Geomorfología del lago: es posible diferenciar distintas clases de lagos dependiendo del proceso geológico que ha creado la depresión topográfica necesaria para que se desarrolle el depósito de agua, por ejemplo, los lagos de tipo endorreicos son lagos que no evacuan cantidades importantes de agua ya sea mediante desagües o por el proceso de infiltración: se trata de un tipo de lago que elimina agua solo mediante la evaporación y colecta agua solo de su cuenca hidrográfica. Este tipo de lagos solo pueden existir dentro de las cuencas endorreicas. Este tipo de lagos también es muy sensible al accionar humano y al uso que se haga de sus aguas ya que su área y volumen usualmente suele depender proporcionalmente a las cantidades de agua que reciba.

Para la *hidrobiología*, las cuencas hidrográficas son las unidades territoriales básicas para la gestión integrada de los recursos hídricos, definidas como la superficie que drena sus afluentes en una salida única y jerárquicamente estructuradas que funcionan a diferentes niveles de organización, donde los cambios y sus efectos se producen a diferentes escalas espaciales y temporales (Thoms et al., 2007; Mavrommati et al., 2013; O'Neill y King, 1998). La fisiografía del Estado de Michoacán, ubicado en México, está dominada por un conjunto de cuencas hidrográficas de tipo endorreicas: los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén destacados por su extensión, importancia cultural y biológica. Una cuenca endorreica, o algún lago de tipo endorreico, no

evacua cantidades significativas de agua ni por desagüe superficial ni por infiltración, es decir, que evapora en su superficie toda el agua que colecta de su cuenca hidrográfica (Revelo, J., 2017).

El lago de Zirahuén, localizado en la región hidrológica de la cuenca del Balsas, es el menos conocido desde el punto de vista del análisis de su biodiversidad (Pérez, 1996); es un lago de gran importancia ya que se trata de un lago de agua cristalina el cual es protegido por el estado de Michoacán; pobladores e investigadores de la UMSNH, así como organismos gubernamentales involucrados como INAPESCA, buscan mantenerlo, sanearlo y rehabilitarlo.

El lago de Zirahuén (Fig. 5) está ubicado en el municipio de Salvador Escalante, Michoacán de Ocampo, México, con un área de casi 10 km². Es un lago monomítico, oligotrófico, de tipo endorréico y posee una profundidad de 40 a 45 m. en el centro del lago (Guridi, X., 2004; Bernal-Brooks y MaCrimmon, 2000).

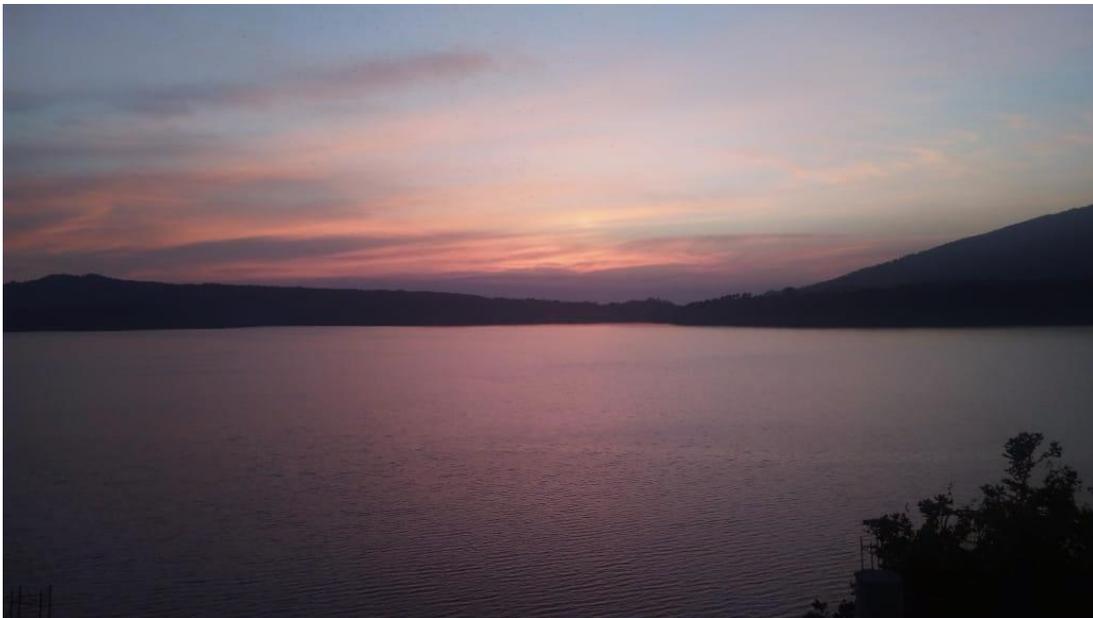


Fig. 5. Lago de Zirahuén.

Se localiza entre las coordenadas 19°21'10" y 19°29'24" Latitud Norte y 101°29'37", 101°49'37" de Longitud Oeste, y pertenece a la cuenca hidrológica del Balsas (Madrigal, X. et al., 2004) tal y como se aprecia en Fig. 6. La cuenca del lago Zirahuén es del tipo endorreico, cubriendo una extensión de 260 km² de tierras altas, entre 19 ° 22' N a 19 ° 30' N y 101 ° 30' O a 101 ° 46' O (José et al., 2018). La altitud a la que se encuentra es de 2075 m. sobre el nivel del mar (López, 1981; Madrigal et al., 2004).

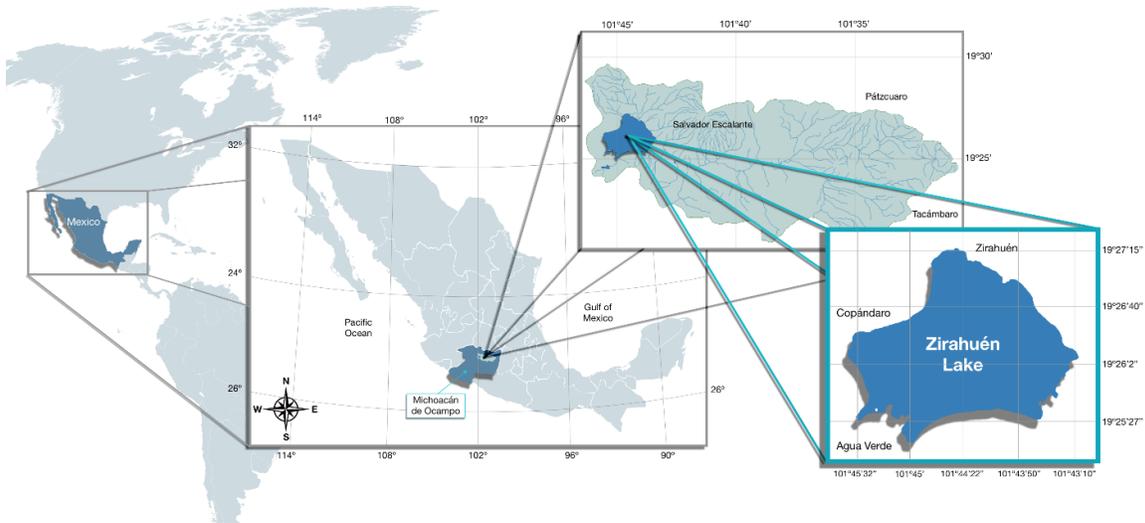


Fig. 6. Localización geográfica del Lago de Zirahuén y apreciación grafica de su cuenca. Fuente: elaboración propia con ayuda de los archivos geoespaciales de las cuencas hidrográficas de México, proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018).

El lago de Zirahuén (Fig. 7) es caracterizado por ser uno de los lagos más importantes de Michoacán; su fauna, flora y la presencia de asentamientos humanos prehispánicos en su cuenca lo identifican como un patrimonio nacional de valor ecológico, económico, social y cultural con grandes posibilidades de recuperación y conservación de interés para organismos gubernamentales como el INAPESCA (2013) y la SEMAR (2018) entre otros (Gómez-Tagle y Gómez-Tagle, 2009; Chacón et al., 2010; Ortiz y Rendón, 2010; Lozano-García et al., 2010; Barajas, 2017).

Actualmente se encuentra con serios problemas de contaminación y deterioro debido a la tala inmoderada de cientos de hectáreas de bosque que se encuentran a los alrededores del lago, proliferando las huertas de aguacate, mismas que aceleran el proceso de erosión y azolve (Chacón et al., 2010; Gómez-Tagle et al., 2019; Martínez, 2019). Debido a que se trata de una problemática en auge desde la década pasada, es posible que su actual estado de conservación aun permita que su recuperación pueda ser viable mediante acciones concretas tanto en el cuerpo de agua, como en sus afluentes y poder mejorar su estado para preservar su aspecto (Maldonado-López, 2019).

El objetivo de la *Limnología* es poder describir y analizar las características estructurales y funcionales de las aguas continentales en relación con los factores físicos, químicos y biológicos presentes en el ecosistema acuático (Margalef, 1983).



Fig. 7. Lago de Zirahuén.

El diagrama de Rawson (1939), Fig. 8, expone los múltiples factores esenciales que interactúan entre sí para caracterizar a un lago y así determinar su composición, distribución, densidad y productividad.

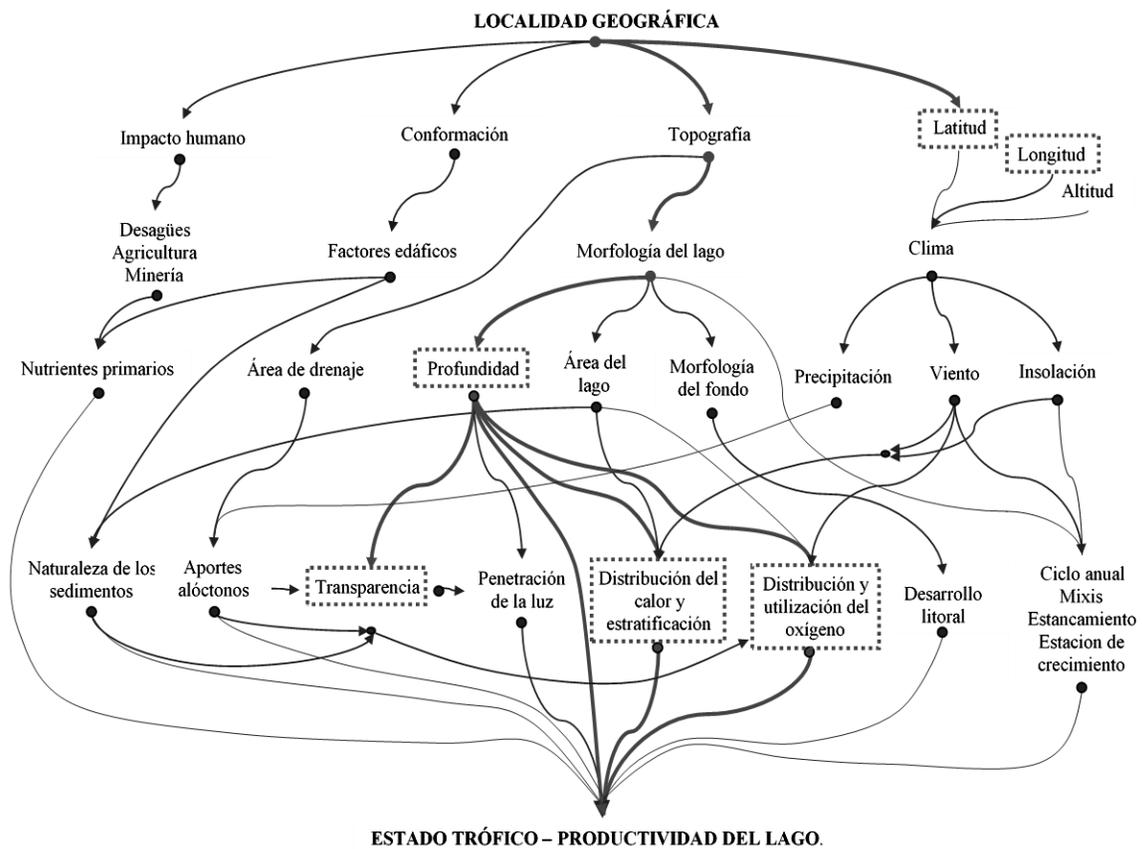


Fig. 8. Diagrama de Rawson.

En cualquier cuerpo lacustre, la longitud y latitud son parámetros considerados para obtener su localización geográfica. La temperatura, los niveles de oxígeno disuelto y turbiedad, son factores derivados y dependientes de la profundidad del lago y son sumamente necesarios para su caracterización. Mediante la implementación de sensores electrónicos es posible registrar los valores de las mediciones de las magnitudes de los parámetros fisicoquímicos involucrados.

Caracterizar la distribución del calor, oxígeno y transparencia del lago, es de suma importancia para el monitoreo acuático, ya que a través de su interrelación mediante modelos de calidad del agua como el índice propuesto por la National Sanitation Foundation wQI_{NSF} en 1970 (Brown et al., 1970; Brown et al., 1972) (Ver anexo A), es posible conocer qué tan contaminado se encuentra el cuerpo de agua analizado.

Realizando un análisis de intersección mediante un diagrama de Venn, descrito gráficamente en Fig. 9, entre los factores del diagrama de Rawson, los parámetros utilizados por el índice wQI_{NSF} y los sensores que actualmente existen en la industria que pueden ser acoplados para la obtención de magnitudes fisicoquímicas relacionados tanto en el wQI_{NSF} como en el diagrama de Rawson, únicamente los niveles de oxígeno disuelto, la turbiedad del agua así como la temperatura son los parámetros que simultáneamente se encuentran involucrados en los tres conjuntos considerados de suma importancia.

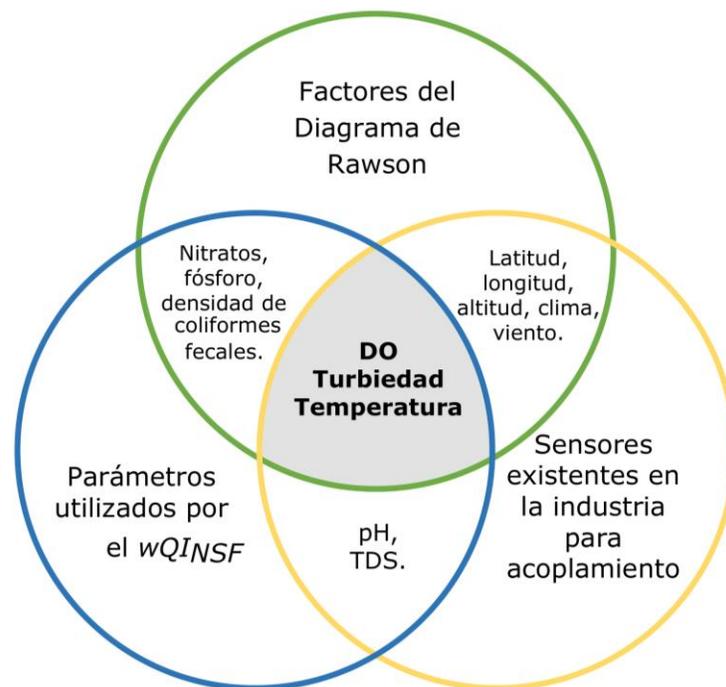


Fig. 9. Descripción grafica del análisis de intersección de los tres conjuntos tomados en consideración: 1) Factores del diagrama de Rawson, 2) Parámetros empleados por el índice de calidad del agua de la NSF y, 3) Sensores existentes en la industria que permiten la medición de parámetros fisicoquímicos.

3.2 Parámetros fisicoquímicos

La longitud y latitud son parámetros necesarios para obtener la localización geográfica del lago, así como la temperatura, los niveles de oxígeno disuelto y turbiedad, es decir, factores derivados y dependientes de la profundidad del lago esenciales para su caracterización y mediante la implementación de sensores electrónicos es posible registrar valores de mediciones de las magnitudes fisicoquímicas involucradas en el monitoreo acuático. A continuación, se mencionan las características e importancia de cada magnitud, así como los posibles dispositivos electrónicos que permiten la obtención del valor de las magnitudes representadas.

3.2.1 Temperatura

Es una magnitud que mide el nivel térmico o el calor que un cuerpo posee, actualmente se utilizan tres escalas de temperatura; grados Fahrenheit (°F), Celsius (°C) y Kelvin (K) (Jiménez, J. D., Gil, C. L., & Herrera, R. G., 2005). La temperatura controla la tasa en la cual se realizan procesos y reacciones químicas y biológicas, además determina parcialmente la concentración de gases disueltos en el agua, incluyendo el oxígeno y el dióxido de carbono, e influye en la distribución de las especies acuáticas (Mann y Lazier, 1996).

a. Estratificación Térmica

En cuerpos de agua lo suficientemente profundos se presenta una mayor probabilidad de estratificación de temperaturas durante el verano. La estratificación térmica se refiere a las tres capas principales de un lago respecto a su régimen térmico, cada una con un rango de temperatura diferente. La capa más superficial de un lago es el *Epilimnion* o Zona Eufótica (fótica, región de aguas cálidas) es la porción superior de la zona cerca de la superficie del agua; es la capa que recibe la luz solar en la porción de agua. La zona termina donde la luz del sol no logra penetrar el agua. Su capa intermedia es el *metalimnion*, o *termoclina*, mientras que la capa más profunda es denominada *hipolimnion*. Mientras mayor sea la diferencia de temperatura entre las capas, más difícilmente se pueden mezclar sus aguas. A medida que pasa el año y ayudados por la acción del viento y la disminución de la temperatura, estas capas pueden llegar a circular o entrar en una etapa de mezclado. En algunos lagos, puede presentarse un período de estratificación más, durante el invierno, aunque en este caso la capa superior será más fría que la inferior.

En Fig. 10., se muestran las capas en las que se dividen un lago según su estratificación térmica y su penetración de luz, que va íntimamente relacionada de la identificación del límite entre la capa *epilimnion* y la capa *metalimnion*.

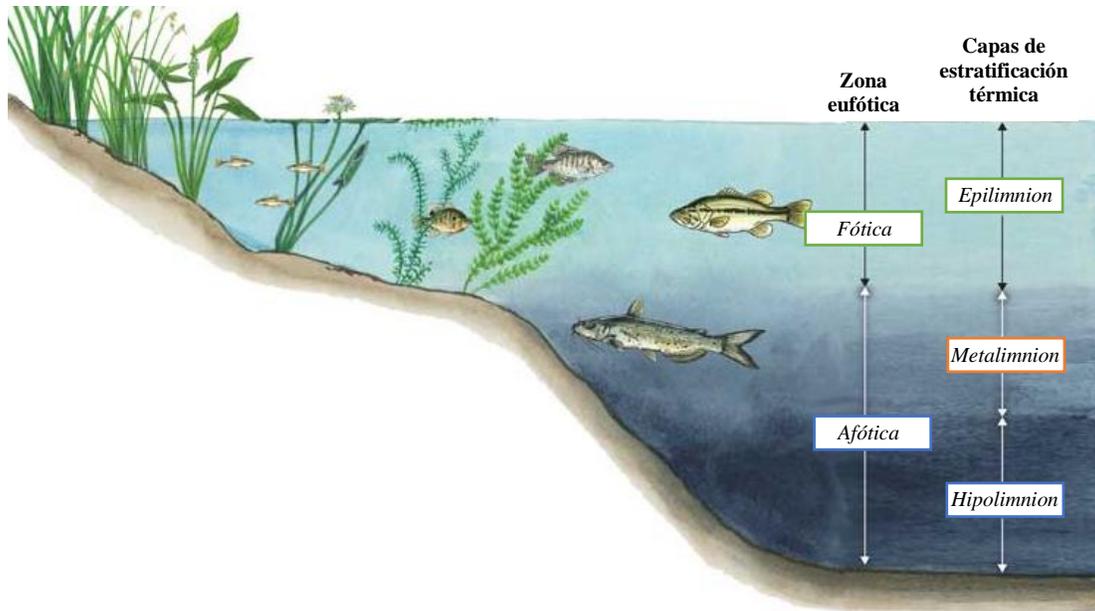


Fig. 10. Estratificación térmica de un lago y zonas de identificación (Kasko Marine, 2022).

La temperatura afecta directamente muchos de los procesos biológicos y fisicoquímicos, incluyendo a los nutrientes que se encuentran en el agua. En especial, afecta la solubilidad de muchos elementos y principalmente el oxígeno disuelto. En condiciones normales, a medida que aumenta la temperatura, la solubilidad del oxígeno es menor (Chapman, 1992; APHA, 1995).

La temperatura controla el ritmo de los procesos y reacciones químicas y biológicas, determinando parcialmente la concentración de gases disueltos en el agua, incluidos el oxígeno y el dióxido de carbono, e influyendo directamente en la distribución de las especies acuáticas (Mann y Lazier, 1996).

Hutchinson (1957) conservó la palabra termoclina y la consideró como un plano imaginario, localizado a un nivel intermedio entre las dos profundidades donde la tasa de disminución de temperatura es mayor. Esta termoclina plana, yace dentro del *metalimnion* o lo que sería la termoclina de Birge (Cole, 1988). En algunos trabajos como el caso del Embalse San Roque (Degano, M., et al., 2016), se tiene en cuenta el límite superior de la termoclina de Birge, es decir, donde comienza el gradiente de temperatura equivalente a disminución de 1° C con descenso de 1 metro en profundidad que permite distinguir el *epilimnion* del *metalimnion* e *hipolimnion* demostrado en Fig. 11.

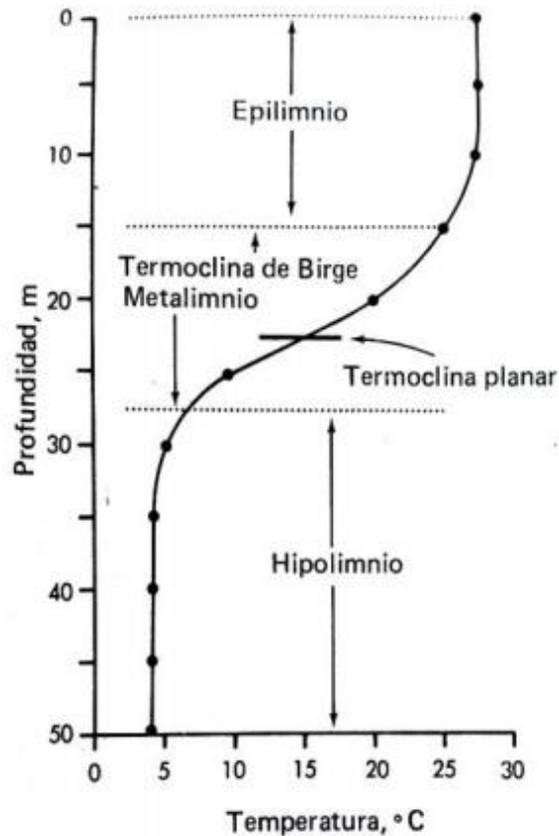


Fig. 11. Ejemplo gráfico del comportamiento de la temperatura cuando los lagos se encuentran estratificados.

La cantidad de oxígeno también pueden afectar la química de un lago. Un lago debe tener una cantidad saludable de oxígeno para mantener la vida. Los lagos que no tienen suficiente oxígeno para mantener la vida son considerados abióticos.

3.2.2 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es uno de los gases más importantes en la dinámica y caracterización de los sistemas acuáticos y puede servir como indicador del grado de contaminación del agua y de la capacidad de ésta para mantener la vida vegetal y animal (Roldán-Pérez 1992), niveles muy bajos pueden ser indicativos de altas concentraciones bacterianas. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal.

Es común observar variaciones diarias y estacionales en los valores de oxígeno en el agua. El oxígeno se mide en partes por millón (ppm) o su equivalente en miligramos por litro (mg/l) y esto puede hacerse con un oxímetro o fijando una muestra de agua para su posterior determinación (Chapman y Kimstach, 1992). Su solubilidad aumenta cuando disminuye la temperatura y la salinidad, lo que afecta el porcentaje de saturación óptimo de oxígeno en un cuerpo de agua (Roldán-Pérez 1992).

Teniendo en cuenta lo anterior, si se presentan valores de anoxia ($< 2,5$ mg/L) en la masa de agua continental, es imposible que sobreviva alguna especie acuática. Algunos ejemplares pueden soportar valores de hipoxia ($< 6,0$ mg/L) y permanecer vivos, pero con repercusiones en todo el organismo. Lo ideal es mantener a los peces en lugares con valores estimados de normoxia ($> 6,0$ mg/L) (Campos, 1997).

3.2.3 Turbidez

Los valores de turbidez sirven para establecer el grado de tratamiento que requiere una fuente de agua, debiendo utilizarse procesos unitarios para hacer más efectiva la eliminación de la contaminación y la obtención de agua en condiciones óptimas para el ser humano y las especies presentes en un cuerpo de agua (Rangel, 2017). Niveles muy altos de turbidez en un periodo corto de tiempo pueden no ser significativos e incluso pueden ser menos problemáticos que un nivel más bajo que persiste por más tiempo, pero en los lagos, las especies persisten bajo estos valores constantemente y un nivel alto de turbidez significa un gran problema para las especies, ya que superar 500 NTU en un lago significa la muerte. Cuando las especies viven en cuerpos de agua donde la turbidez oscila entre 10 - 100 NTU, pueden presentar problemas de estrés, alimentación, entre otros. Cabe mencionar que los valores de turbidez ideales para las especies presentes en los lagos van de 0 a 10 NTU. (Agua en la red, 2018).

3.2.4 Localización geográfica

La situación geográfica condiciona la dinámica de los sistemas lacustres; todo mapa está referido por lo menos a un sistema de coordenadas universal, cuyo objeto es el de dar su ubicación geográfica y con ella la de todos los puntos y detalles contenidos en el mismo, además de facilitar la explotación de las características métricas del mapa. Un sistema de coordenadas geográficas es un método para describir la posición de una ubicación geográfica lacustre en la superficie de la Tierra utilizando mediciones esféricas de latitud y longitud (Bosque, 1992). El sistema de coordenadas es ampliamente usado en los estudios relacionados con los lagos.

Se denomina altitud a la distancia vertical que existe entre cualquier punto de la Tierra con relación al nivel del mar. Para calcular la altitud, se toma como referencia el nivel del mar, y es por ello que la altitud se expresa con una cifra en metros seguida de la abreviatura s. n. m., es decir, m s. n. m. ('metros sobre el nivel del mar') (RAE, 2020).

La latitud en el ámbito geográfico es la distancia que existe entre un punto de la superficie terrestre al ecuador, contada por los grados de su meridiano. Por regla general está comprendido entre -90° y 90° . Los valores negativos son para ubicaciones en el hemisferio sur, y el valor de la latitud es de 0° en el ecuador.

Según el hemisferio, si se encuentra por encima del ecuador se habla de latitud norte y, si es por debajo del ecuador es latitud sur, y se representa de 2 formas: indicando el hemisferio que pertenece la coordenada, por

ejemplo: 20°N o 20°S o acrecentando un valor positivo antes del número para indicar latitud norte y, de ser latitud sur se añade un signo negativo antes del número, por ejemplo: -10° 40' 59'', significa una latitud de 10 grados, 40 minutos y 59 segundos de lat. Sur y de ser con el signo positivo +10° 40' 59'' es una latitud de 10 grados, 40 minutos y 59 segundos de lat. Norte (Read, 2009).

La longitud expresa la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano que se tome como 0° (es decir el meridiano base), tomando como centro angular el centro de la Tierra; habitualmente en la actualidad el meridiano de Greenwich. Se mide desde 0 grados a 180 grados al Este o al Oeste con respecto a Greenwich (Read, 2009).

Convencionalmente, se utilizan ubicaciones absolutas de los datos emitidos por un GPS, como latitud, longitud y altitud para hacer mapas y determinar los límites de espacios terrestres. Se basan en gran medida en los datos proporcionados para la delineación y demarcación de límites adecuados. Estos dispositivos portátiles son siempre una herramienta demasiado útil para el posicionamiento y la delimitación de los cuerpos lacustres.

3.2.5 Profundidad

Se denomina profundidad a la distancia de un elemento con respecto a un plano horizontal de referencia, cuando dicho elemento se encuentra por debajo de la referencia. Este factor es muy importante, debido a que hace que las condiciones de temperatura, turbidez, oxígeno disuelto y presión, entre otros factores, puedan ser radicalmente distintas en diferentes partes del ecosistema acuático, lo que impone severas restricciones a la mayor parte de las formas de vida en aquellos sitios de mayor profundidad (Sánchez, 2007).

Este factor es el más importante porque provoca que las condiciones de temperatura, turbidez, oxígeno disuelto y presión, entre otros factores, sean radicalmente diferentes en algunas partes del ecosistema acuático, lo que impone severas restricciones a la mayoría de las formas de vida en aquellos sitios de mayor profundidad (Sánchez, 2007). En los lagos se deben considerar las capas de estratificación, principalmente la del *epilimnion* y *metalimnion*, contemplando que, dependiendo el lago analizado, en cierta profundidad se encuentra la zona eufótica (Madrigal, X. et al., 2004); y superando esta profundidad, los valores presentados en los demás parámetros comienzan a decrementar hasta cero.

3.3 Especies endémicas del lago de Zirahuén

Es importante mencionar que Zirahuén es hogar de diferentes especies de peces endémicos, los más importantes se muestran en la Tabla 1, junto con sus características (CONABIO, 2005; CONABIO, 2012; CONABIO, 2013). En la tabla se aprecian las diferentes especies presentes en el lago de Zirahuén, así como las condiciones ideales, mínimas y máximas de cada parámetro necesarias para que dichos especímenes puedan habitar el

cuerpo de agua, determinando el uso de cuatro parámetros de suma importancia para la coexistencia de dicha fauna acuática.

Las características mencionadas en la Tabla 1 fueron delimitadas a la obtención de los valores de temperatura, oxígeno disuelto, profundidad y turbidez, los cuales son los parámetros fisicoquímicos considerados de gran importancia en el estudio y monitoreo de los cuerpos lacustres, así como su accesibilidad a los valores de las mediciones obtenidas a través de los sensores descritos con anterioridad.

3.4 Monitoreo de lagos

La necesidad de detectar los cambios que ocurren en el medio ambiente, causados de manera natural o por la actividad humana, se ha incrementado drásticamente en los últimos 50 años (Abarca, F., 2008). El monitoreo acuático es una actividad de suma importancia para el conocimiento del estado de las masas de agua continental, mismas que son fuente básica de recursos para el ser humano y las diferentes actividades económicas dependientes de él. A partir de esta actividad es factible la toma de decisiones para el manejo adecuado de uno de los recursos naturales más importante en la Tierra, ya que a través de los sistemas de monitoreo es posible conocer las características de interés principal siendo de gran apoyo para los especialistas (Spellberg, 1991; Chapman, 1992; Loeb y Spacie, 1994; Mudrock y MacKnight, 1994; Díaz et al., 1995; López y Guzmán, 1995; Shear, 1995; Bain y Stevenson, 1999; De la Lanza, 2000), en este caso, los limnólogos son los encargados de evaluar el estado en el que se encuentra un ecosistema acuático a partir del análisis de los valores obtenidos de las mediciones realizadas sobre algún cuerpo de agua continental. El concepto de monitoreo no debe entenderse como una mera actividad repetitiva por sí sola, sino como un proceso con propósitos y objetivos específicos y con mecanismos de análisis y retroalimentación que permitan mejorar y adaptar este proceso a las necesidades futuras (Spellberg, 1991).

Las mediciones que los limnólogos convencionalmente realizan se rigen bajo normas y estándares de calidad, México cuenta con las Normas Oficiales Mexicanas NMX-AA-003-1980, NMX-AA-007-SCFI-2013 (citar), NMX-AA-012-SCFI-2001, NMX-AA-008-SCFI-2016 (citar), NMX-AA-038-SCFI-2001, entre otras para la recolección de muestras, medición de temperatura, niveles de oxígeno disuelto, pH y turbiedad respectivamente en aguas naturales, solo por mencionar algunas, enfatizando la importancia de la obtención de las mediciones en lapsos cortos de tiempo y de ser posible en sitio.

Estudios relacionados con el análisis y evaluación de los cuerpos de agua en sus respectivos casos de estudio, indican la realización del muestreo en tiempos de medición demasiado elevados, ocasionando la obtención de pocos puntos de análisis, debido a que las mediciones suelen realizarse a lo largo de un día o varios, afectando las variables medidas de acuerdo con el cambio climático, irradiación solar, presión atmosférica, etc.

Tabla 1. Valores ideales, mínimos y máximos de cada parámetro involucrado en la investigación para cada especie endémica del lago Zirahuén.

		<i>Menidia estor</i> (pecado blanco) 			<i>Algansea lacustris</i> (acúmara) 			<i>Chirostoma attenuatum meeki</i> (Charal prieto) 			<i>Micropterus salmoides</i> (Lobina negra) 		
Parámetro		Ideal	Min	Max	Ideal	Min	Max	Ideal	Min	Max	Ideal	Min	Max
Temperatura	°C	20 - 22	15	24	20	14	24	22	-	-	21	10	32
Oxígeno	mg/L	6.5 - 8	4.5	8	6.5	4	7.3	-	4	8	7.5	4	9
Profundidad	m.	8-10	0	14	10- 12	1	14	7 - 11	0	14	4-6	0	7
Turbidez	NTU	0 -5	0	500	0 -5	0	500	0 -5	0	500	0 -5	0	500

Por normatividad, el no realizar las mediciones en un corto periodo de tiempo, afecta la precisión del resultado de las muestras obtenidas.

Para llevar a cabo un monitoreo acuático, es necesario obtener diversas muestras de los cuerpos de agua analizados, es decir, un muestreo, mismas que pueden presentar variaciones en las mediciones obtenidas; para evitar las variaciones en el muestreo, se sugiere implementar un filtrado de datos para preservar la consistencia de la información.

Un programa de monitoreo bien planeado, ejecutado y comunicado es indispensable para entender las dinámicas propias del sistema y sus amenazas, y para poder hacer un manejo adecuado de los humedales, tal que asegure la cantidad y calidad de los servicios ecológicos que ofrecen. En muchos casos, el monitoreo de lagos ha servido para la detección temprana de disturbios al sistema que pudieran haber tenido consecuencias graves para la salud humana (Abarca, F., 2008). Los sistemas y/o dispositivos que permiten la adquisición de las mediciones de los diferentes tipos de parámetros de estudio, es decir un dispositivo de adquisición de datos y un conjunto de software y sistemas computacionales que asistan el proceso de adquisición, caracterización y evaluación, sirven de gran ayuda para realizar un adecuado monitoreo del ecosistema acuático.

CAPÍTULO IV

MODELOS COMPUTACIONALES

4.1 Módulo de adquisición de datos

4.1.1 Análisis paramétrico

La evaluación de la calidad del agua que utiliza el sistema propuesto emplea tres de los nueve parámetros que plantea el índice. Como se mencionó con anterioridad, el cálculo del WQI_{NSF} se puede estimar sumando los resultados y luego ajustando la cantidad de parámetros acorde a las recomendaciones sugeridas por la National Sanitation Foundation, en el caso de tener un menor número de parámetros que el conjunto completo (BASIN, 2005). Además, el índice Biótico Lacustre (IBL) propuesto hace uso de los parámetros anteriormente mencionados derivado del análisis realizado en el Capítulo 3.

Para el diseño del Sistema Acuático de Medición (SAM), es decir el módulo de obtención de datos propuesto y descrito en Fig. 12, se consideró el análisis de intersección del diagrama de Venn mostrado en Fig. 3. El diseño consiste en el dispositivo sumergible (Dispositivo Contenedor Sumergible, DCS) y el software de medición (Sistema de Medición de Parámetros Limnológicos, SMP-L). El DCS incluye una tarjeta de adquisición de datos (DAQ), sensores de oxígeno disuelto, temperatura, turbiedad y nivel de agua, así como de un contenedor sumergible (Modulo Contenedor multiparamétrico, MCTR). El sistema es considerado escalable al permitir el acoplamiento y adición de otros sensores de medición.

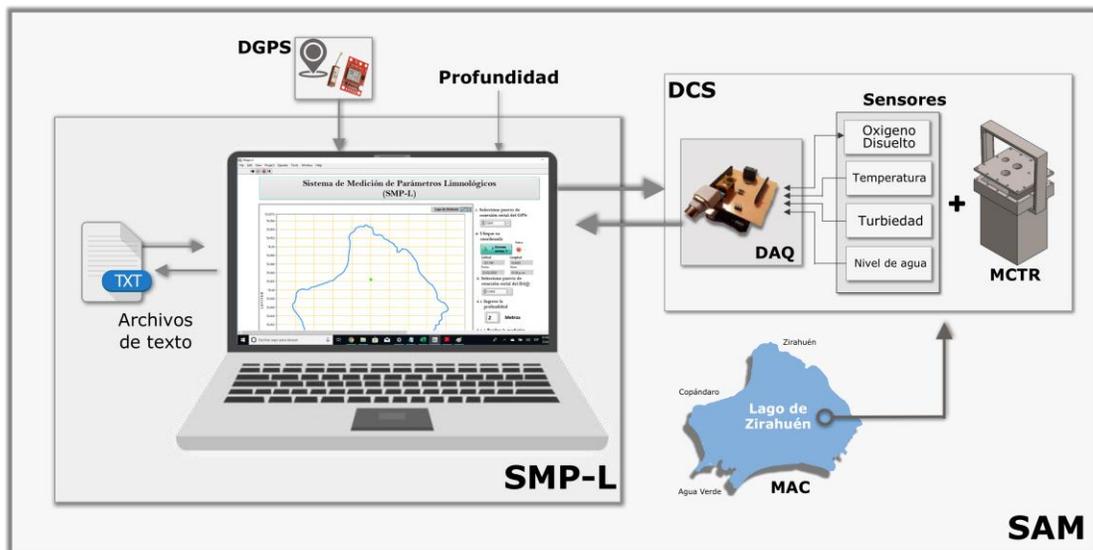


Fig. 12. Diagrama general de interacción y funcionamiento del Sistema Acuático de Medición (SAM).

4.1.2 Tarjeta de adquisición de datos y sensores

Para la Tarjeta DAQ, se utilizó la tarjeta de microcontrolador Arduino Uno basada en un microcontrolador ATmega328. Caracterizada por ser una tarjeta de desarrollo de bajo costo y altas precisiones, ya que contiene todo lo necesario para respaldar el funcionamiento del microcontrolador (Newmark, 2020), ya que posee 14 pines de E/S digitales, 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, un botón de reinicio con un voltaje de funcionamiento a 5 V a través de una conexión USB o con una fuente de alimentación externa, una memoria Flash de 32kB, una SDRAM de 2kB, una EEPROM de 1kB. Tiene un protocolo de comunicación RS232 mediante un puerto serial USB con una velocidad de transmisión desde 300 hasta 115200 baudios con la computadora (Arduino, 2020). El sistema Arduino Uno fue ensamblado junto con una placa de circuito impreso para su acoplamiento con los sensores utilizados y diseñada mediante el software Proteus 8, tal y como se muestra en Fig. 13. La distancia de transmisión de datos entre la tarjeta Arduino Uno y la computadora para el presente proyecto fue mediante un cable USB de 15 metros de longitud.

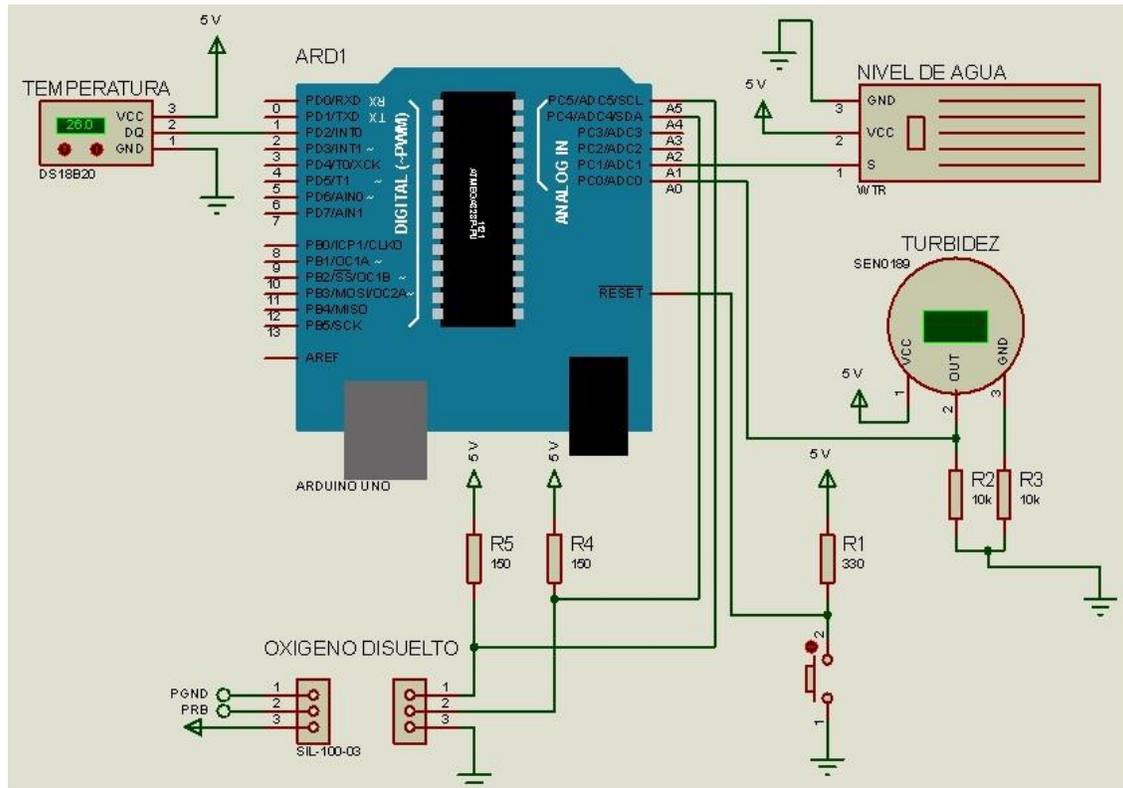


Fig. 13. Diagrama esquemático de la tarjeta de adquisición de datos implementada con Arduino uno. El diseño fue elaborado empleando el simulador Proteus 8.

Parámetros como la temperatura, niveles de oxígeno disuelto, turbiedad del agua y nivel de agua pueden ser medidos con relativa precisión. Esta depende principalmente de las características del sensor descritas por el fabricante, indicando el margen de error introducido por el dispositivo (Tabla 4). Es necesario mencionar, que el nivel de agua es considerado con la intención de detectar filtraciones dentro del módulo contenedor que pudieran atentar contra la integridad del sistema electrónico.

Tabla 2. Características generales de los sensores utilizados para la medición de la temperatura, los niveles de oxígeno disuelto, turbiedad y nivel de agua.

Sensor	Parámetro de medición	Unidad	Rango de operación	Precisión	Voltaje de alimentación	Principales características
DS18B20	Temperatura	°C	55 a 125	±0.5	3 V - 5.5. V	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación digital mediante su cable de datos DQ - Resolución hasta 12 bits
EZO-DO	Niveles de oxígeno disuelto	mg/L	0.01 - 35.99	±0,05	3 V - 5.5. V	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación digital mediante protocolo I2C o RS232. - Requiere compensación de presión. - Cuenta con una membrana galvánica, donde se adhieren las moléculas de oxígeno obteniendo una pequeña diferencia de potencial.
SEN0189	Turbiedad	NTU	5000 a 0	-	5 V	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación análoga (equivalencia entre 0 V – 4.5 V) - Detecta el total de solidos suspendidos en el agua al medir la transmitancia de la luz
HR0043	Nivel de agua	Volts	0 – 5	-	5 V	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación análoga (0 V y 5V) - Indica si existe alguna filtración de agua dentro del dispositivo electrónico

Información recolectada de las hojas de especificaciones de los sensores utilizados (DFROBOT, 2008; Maxim Integrated, 2019; SDR, 2019; Atlas Scientific, 2020).

Las mediciones se realizan mediante la calibración y el acoplamiento de los sensores utilizados para el muestreo y se apegan a las normas oficiales mexicanas NMX-AA-007-SCFI-2013 y NMX-AA-012-SCFI-2001 para la

medición de la temperatura y los niveles de oxígeno disuelto respectivamente, mientras que no existe la norma oficial mexicana para la medición de la turbiedad en sitio.

4.1.3 Contenedor sumergible

El análisis multiparamétrico debe realizarse a diferentes profundidades en la Masa de Agua Continental (MAC), para esto, se diseñó un contenedor con peso suficiente para caer por gravedad, garantizando la seguridad del sistema de adquisición de datos. El material de manufactura principal fue una placa de acero inoxidable tipo 316, debido a su alta resistencia a la corrosión por sustancias salinas (CIMA, 2015), con 3/8" de espesor. A través de la manufactura de la placa, fue posible diseñar la tapa del contenedor de acuerdo con las medidas particulares del fabricante de cada sensor y cable que fueron expuestos al medio acuático; es decir, los sensores de temperatura (\varnothing 5 mm), oxígeno disuelto (\varnothing 15 mm), turbiedad (\varnothing 20 mm) y el cable de comunicación USB 2.0 Hi-Speed Active Extension Repeater (A M/F) de 15 metros (\varnothing 20 mm), mientras que el sensor de nivel de agua se conservará dentro del contenedor para detectar filtraciones. El módulo contenedor, se diseñó conforme a las medidas de la DAQ, es decir, puede almacenar un volumen de hasta 67 cm^3 aproximadamente. Cada parte del contenedor fue unido con soldadura de acero inoxidable mediante electrodos 316-16 1/8". Posteriormente se acoplaron los sensores con la tapa del contenedor, es decir, cada sensor fue adherido a la tapa con silicona automotriz Loctite SI 593 Negra, sin interferir en su funcionamiento. Finalmente, colocando un empaque cuadrado de grafito reforzado con carbono Chesterton 1400 R de 3/16" entre la tapa y el contenedor fueron ensambladas ambas piezas y ajustadas con los 14 tornillos que embonan perfectamente entre cada pieza como se muestra en las diferentes vistas de la Fig. 14. El módulo contenedor sumergible, también cuenta con una solera que permite la manipulación y sujeción de este. El peso total del MCTR es de 3.4 kg.

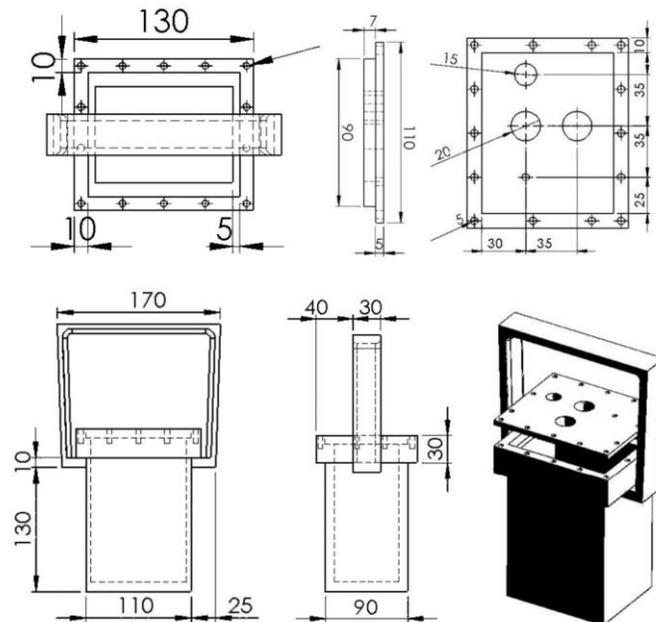


Fig. 14. Vistas frontales, laterales, superiores e isométrico del MCTR con sus respectivas dimensiones.
Fuente: elaboración propia con ayuda del software Solidworks.

4.1.4 Software de medición y evaluación

El software de medición SMP-L se desarrolló obteniendo el mapa vectorial del Lago de Zirahuén mediante archivos geospaciales, proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018). El procesamiento de este tipo de archivos .shp se realizó mediante el software QGIS 3.0, permitiendo convertirlos a formato .txt y posteriormente, incluirlos dentro de la interfaz gráfica de usuario programada en LabVIEW 14.0 2014 SP1 (National Instruments, 2014) mostrada en la Fig. 15. Se implementaron los protocolos necesarios para la transmisión de datos con el componente VISA, el cual hace uso de los puertos COM de comunicación, la visualización de los parámetros muestreados, así como el resultado de la estimación de la evaluación. El sistema de medición muestra las lecturas de ubicación dentro del espacio delimitado por el área de estudio, almacenando fecha, hora, evaluación, valores de los niveles de oxígeno disuelto, temperatura, profundidad, turbiedad, latitud, longitud y nivel de agua si es que existen filtraciones dentro del MCTR en un archivo .txt. EL protocolo de comunicación utilizado entre el GPS y la computadora, así como del MCTR con la computadora fue el RS232, mediante serial USB 2.0. El módulo GPS utilizado fue el NEO-6M, ya que su comunicación con la computadora es sencilla y fácil para obtener las lecturas de altitud y longitud. Cabe mencionar, que se empleó una computadora marca Dell modelo Inspiron 14 serie 5000 con un procesador de 4a generación Intel (R) Core (TM) i5-4210U CPU @ 1.70 GHz, 8.00 GB de memoria RAM, disco duro de estado sólido interno Adata Ultimate SU650 ASU650SS-240GT-R de 240 GB de almacenamiento y un sistema operativo a 64 bits con Windows 10 Home Single Language, versión 17763.1282.

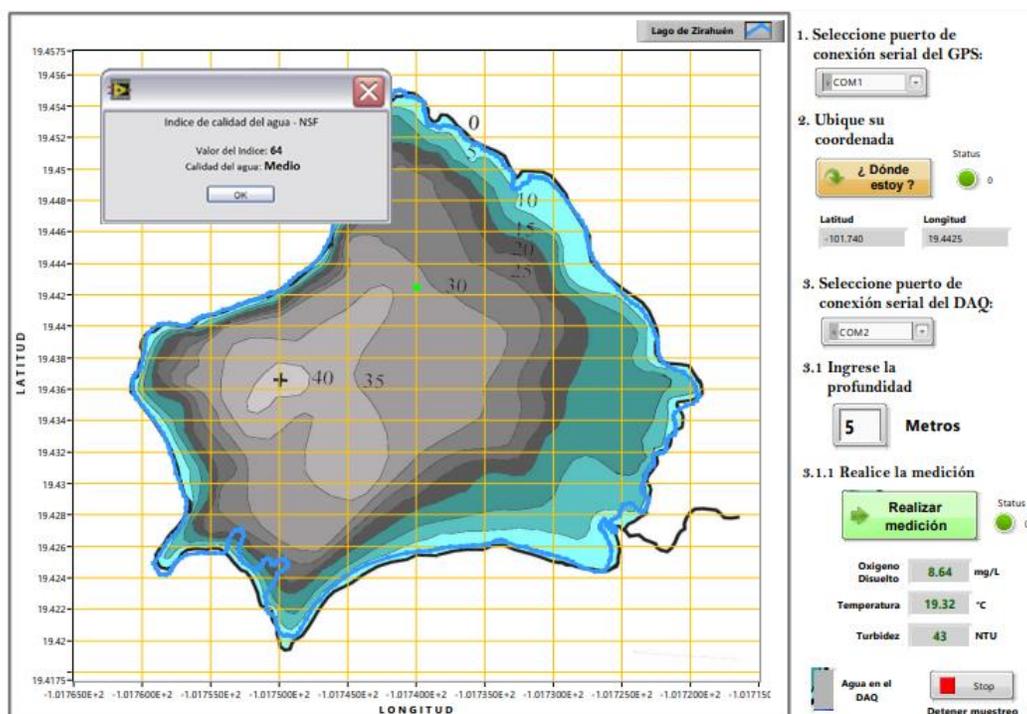


Fig. 15. Interfaz gráfica de Usuario: se puede apreciar el lugar y la posición del GPS al momento del muestreo, los valores de los parámetros de interés y el resultado de la estimación de la evaluación del índice de calidad del agua. Fuente: elaboración propia, captura de pantalla del software de medición y evaluación.

4.1.5 Metodología de implementación

De acuerdo con las normas mexicanas NMX-AA-007-SCFI-2013 y PROY-NMX-AA-012/2-SCFI-2009, se implementó una metodología de medición como lo muestra Fig. 16; el proceso comienza cuando la tarjeta recibe la instrucción de realizar una medición, posteriormente se realiza un promediado de 5 mediciones por cada parámetro involucrado y los valores promediados son enviados al SMP-L mediante el cable de comunicación serial. Finalmente, la estimación del wQI_{NSF} es calculada y los resultados son mostrados como resultado de la evaluación.

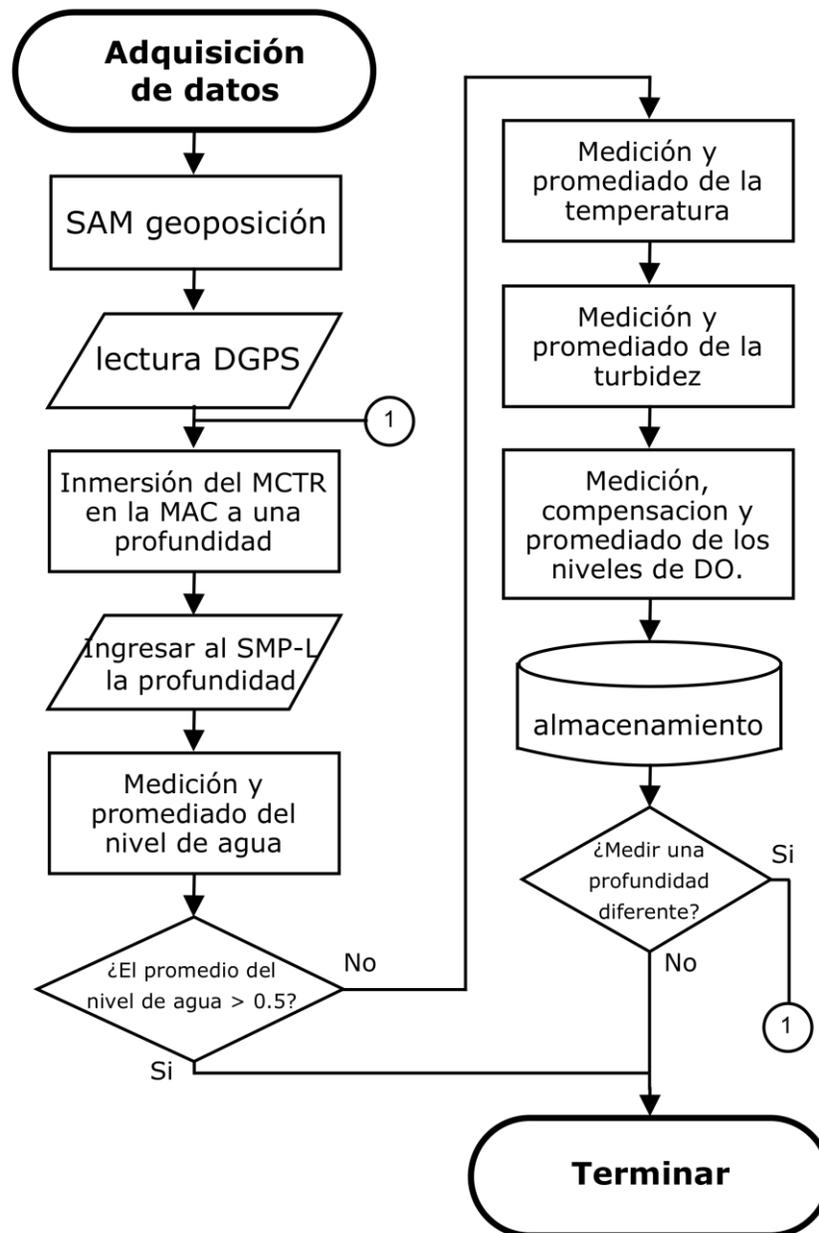


Fig. 16. Diagrama de flujo del proceso de adquisición de datos.

4.2 Modelo IBL – Índice Biótico Lacustre

En este apartado, se muestra el diseño y desarrollo del Modelo IBL – Índice Biótico Lacustre, que será implementado a nivel de software, con el fin de analizar las condiciones bióticas en las que se encuentran los ecosistemas de las aguas continentales con base en un proceso de razonamiento en el caso de estudio: el lago de Zirahuén.

4.2.1 Sistema de inferencia difuso

Los sistemas de inferencia difusa, por sus siglas en inglés FIS (Fuzzy Inference System), proporcionan una relación no lineal entre los parámetros de entrada y los valores de salida. Como se apreció en el Capítulo 3, implican tres conceptos fundamentales: funciones de pertenencia, reglas de inferencia y defuzzificación o agregación.

Los sistemas de inferencia difusa (FIS) proporcionan una relación no lineal entre los parámetros de entrada y los valores de salida. Involucrando tres conceptos fundamentales: funciones de membresía, reglas de inferencia y defuzzificación o agregación. El diagrama conceptual que relaciona los conceptos antes mencionados se muestra en la Fig. 17. Estas etapas se desarrollan de acuerdo con las necesidades actuales de las especies más importantes que viven en el lago de Zirahuén: *Menidia estor*, *Algansea lacustris*, *Chirostoma attenuatum meeki* y *Micropterus salmoides*. Todo ello con el objetivo de definir la puntuación del Índice Biótico Lacustre (LBI_{SCORE}) de una zona de interés general.

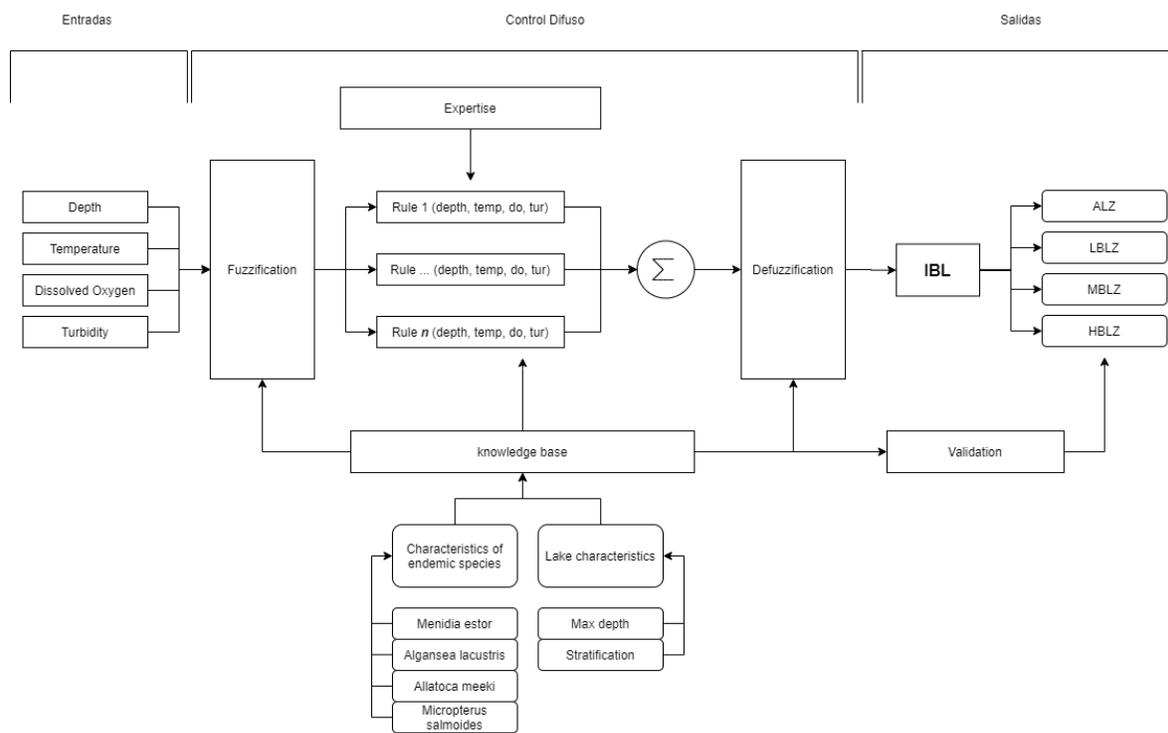


Fig. 17. Diagrama conceptual del modelo de evaluación.

4.2.2 Entradas

Considerando la investigación exhaustiva que se realizó con las diferentes especies presentes en el lago de Zirahuén referente a las condiciones necesarias para que dichos especímenes puedan habitar el cuerpo de agua, se determina el uso de cuatro parámetros de suma importancia mediante las funciones de pertenencia para la coexistencia de dicha fauna acuática, así como los rangos de delimitación para las funciones y la cantidad de funciones de pertenencia que serán necesarias dadas las entradas involucradas.

4.2.3 Funciones de pertenencia

Como se mencionó con anterioridad, no existe un criterio específico para la implementación de las funciones de pertenencia; en el presente estudio, la forma de las funciones difusas es secundaria, sin embargo; por simplicidad y para facilitar el proceso de agregación, se emplearon funciones trapezoidales y triangulares denotadas matemáticamente en las Ecuaciones 17 -28 en la Tabla 6, considerando los rangos de los parámetros de las variables lingüísticas de la Tabla 5.

Tabla 3. Valores de los parámetros involucrados en las funciones de pertenencia.

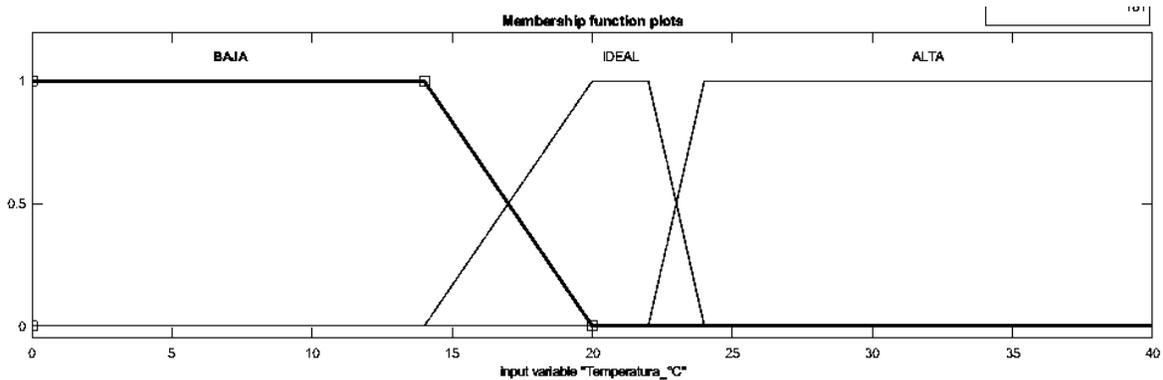
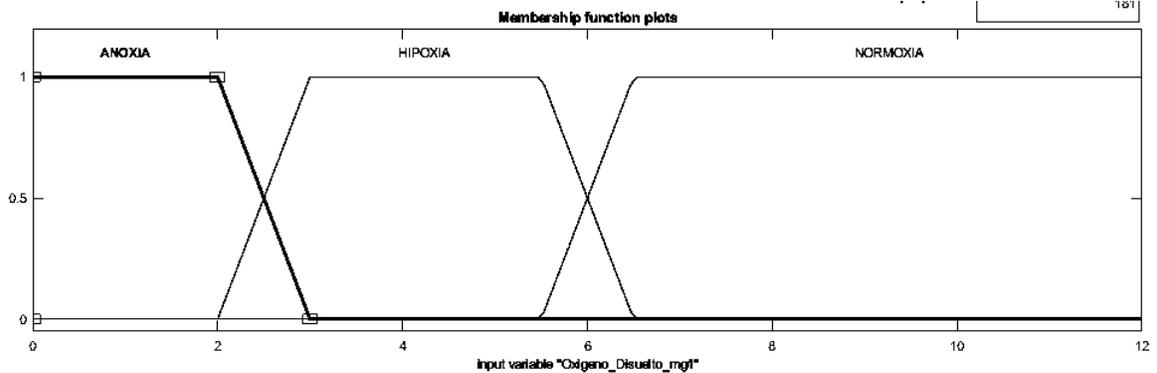
Parámetro	Unidades	Estados		
		Anoxia	Hipoxia	Normoxia
Oxígeno disuelto	mg/L	0 – 2.5	2.5 – 6.0	6.0 – ∞
		Baja	Ideal	Alta
Temperatura	°C	0 – 20	20 – 22	22 – ∞
		Ideal	Normal	Alta
Turbidez	NTU	0 – 5	5 – 50	50 – ∞
		Epilimnion	Ideal	Metalimnion
Profundidad	m	0 – 5	5 – 12	15 – ∞

Tabla 4. Rangos de valores implementados por parámetros, estado, función de membresía implementada por estado en el modelo de evaluación

Parámetros		State	Values ranges	Membership Functions
INPUTS Dissolved Oxygen	mg/L	Anoxia	0 – 2.5	$F_A(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{3-x}{3-2}, 1 \right] \right\}$ (17)
		Hypoxia	2.5 – 6.0	$F_H(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x-2}{3-2}, 1, \frac{5.5-x}{5.5-6.5} \right] \right\}$ (18)
		Normoxia	6.0 – ∞	$F_H(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x-2}{3-2}, 1, \frac{5.5-x}{5.5-6.5} \right] \right\}$ (19)

Temperature	°C	Low	0 – 20	$F_b(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{20 - x}{20 - 14}, 1 \right] \right\}$	(20)
		Ideal	20 – 22	$F_i(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 14}{20 - 14}, 1, \frac{22 - x}{22 - 25} \right] \right\}$	(21)
		High	22 – ∞	$F_a(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 22}{25 - 22}, 1 \right] \right\}$	(22)
Turbidity	NTU	Ideal	0 – 5	$F_i(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{7.5 - x}{7.5 - 2.5}, 1 \right] \right\}$	(23)
		Normal	5 – 50	$F_n(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 2.5}{7.5 - 2.5}, 1, \frac{47.5 - x}{47.5 - 52.5} \right] \right\}$	(24)
		High	50 – ∞	$F_{Al}(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 47.5}{52.5 - 47.5}, 1 \right] \right\}$	(25)
Depth	m	Epilimnio	0 – 5	$F_E(x) = \max \left\{ 0, \min \left[1, \frac{6 - x}{6 - 0} \right] \right\}$	(26)
		Ideal	5 – 12	$F_{Id}(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 4}{6 - 4}, 1, \frac{12 - x}{12 - 14} \right] \right\}$	(27)
		Metalimni	15 – ∞	$F_{Al}(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 13}{15 - 13}, 1 \right] \right\}$	(28)

Las funciones de pertenencia de cada parámetro se visualizan gráficamente en Fig. 18.



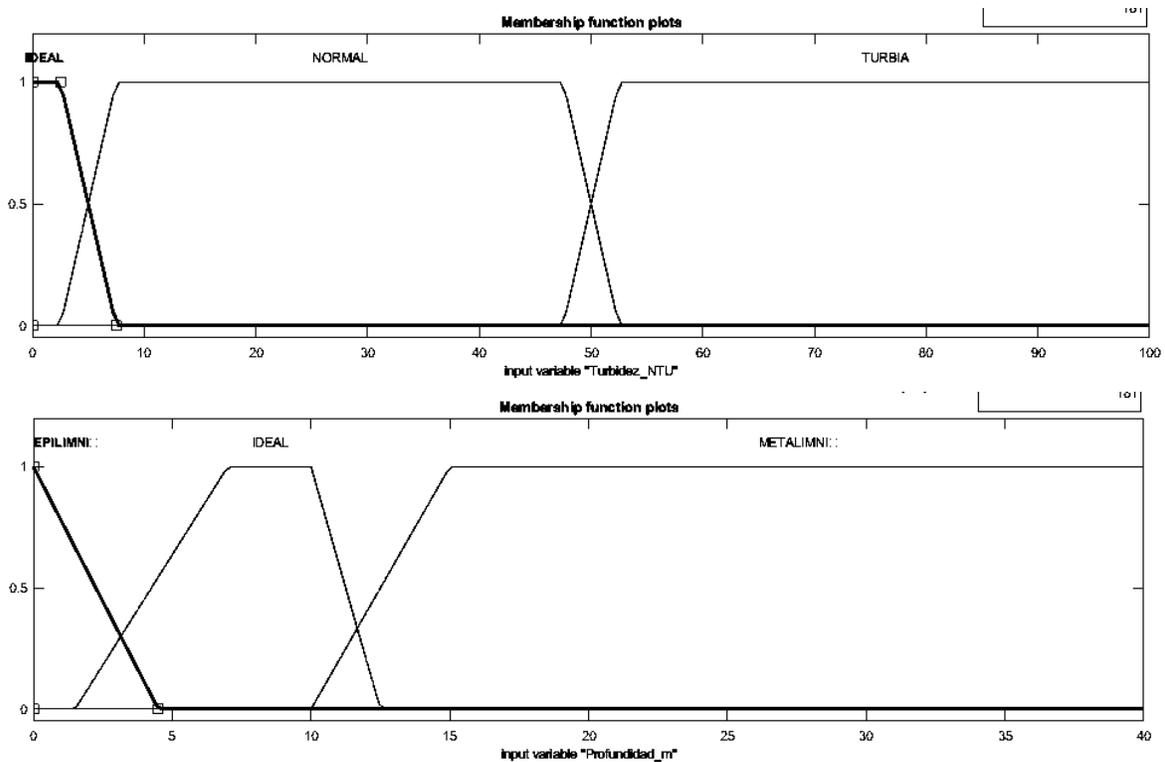


Fig. 18. Descripción gráfica de las funciones de pertenencia.

4.2.4 Reglas de razonamiento

En el proceso de evaluación de las condiciones idóneas para que habiten las especies analizadas en determinado punto, las reglas de inferencia proporcionan una buena evaluación de los parámetros ya que permiten analizar diferentes situaciones que han sido identificadas como buenas o malas para el hábitat. En la mayoría de los casos, los expertos dan una opinión sobre el comportamiento o los efectos de los parámetros cuando se miden ciertos valores; las expresiones utilizadas con frecuencia por los expertos pueden describirse como:

“En un punto cualquiera dentro del lago, si los niveles de oxígeno disuelto son bajos, la temperatura es baja, la turbidez es ideal y la profundidad medida pertenece a la capa del metalimnión, entonces se espera que la cantidad de fauna acuática sea nula”.

En el lenguaje de lógica difusa se podría enunciar como:

Regla R: SI OXIGENO es **anoxia** ^ TEMPERATURA es **baja** ^ TURBIDEZ es **ideal** ^ PROFUNDIDAD es **metalimnion**, ENTONCES IBL es **ZLA** (Zona lacustre abiótica)

Usualmente se suele considerar un conjunto finito de reglas SI-ENTONCES, con la siguiente estructura:

$$R_m: \text{SI } X \text{ is } A_m \text{ ENTONCES } Y \text{ is } B_m \quad m = 1, 2, \dots, n; \quad (29)$$

Donde X , Y son variables (oxígeno disuelto, temperatura, turbidez, profundidad) y A_m, B_m son expresiones lingüísticas (zona lacustre abiótica, zona lacustre biótica baja, zona lacustre biótica media o zona lacustre biótica alta).

Del mismo modo, otras reglas pueden ser enunciadas usando sintaxis similares. La robustez del Sistema depende de la cantidad y la calidad de las reglas de inferencia; para el presente modelo se implementaron 38 reglas que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 5. Reglas de Razonamiento del FIS

REGLA	:	OXIGENO	^	TEMPERATURA	^	TURBIDEZ	^	PROFUNDIDAD	entonces	IBL
1		anoxia		-		-		-		ZLA
2		-		-		-		<i>Metalimni3n</i>		ZLA
3		hipoxia		baja		ideal		<i>Epilimni3n</i>		ZLA
4		hipoxia		baja		normal		<i>Epilimni3n</i>		ZLA
5		hipoxia		baja		alta		<i>Epilimni3n</i>		ZLA
6		hipoxia		Ideal		ideal		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
7		hipoxia		Ideal		normal		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
8		hipoxia		Ideal		alta		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
9		hipoxia		alta		ideal		<i>Epilimni3n</i>		ZLA
10		hipoxia		alta		normal		<i>Epilimni3n</i>		ZLA
11		hipoxia		alta		alta		<i>Epilimni3n</i>		ZLA
12		hipoxia		baja		ideal		<i>Ideal</i>		ZLA
13		hipoxia		baja		normal		<i>Ideal</i>		ZLA
14		hipoxia		baja		alta		<i>Ideal</i>		ZLA
15		hipoxia		Ideal		ideal		<i>Ideal</i>		ZLBM
16		hipoxia		Ideal		normal		<i>Ideal</i>		ZLBM
17		hipoxia		Ideal		alta		<i>Ideal</i>		ZLBB
18		hipoxia		alta		ideal		<i>Ideal</i>		ZLBB
19		hipoxia		alta		normal		<i>Ideal</i>		ZLA
20		hipoxia		alta		alta		<i>ideal</i>		ZLA
21		normoxia		baja		ideal		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
22		normoxia		baja		normal		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
23		normoxia		baja		alta		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
24		normoxia		Ideal		ideal		<i>Epilimni3n</i>		ZLBM
25		normoxia		Ideal		normal		<i>Epilimni3n</i>		ZLBM
26		normoxia		Ideal		alta		<i>Epilimni3n</i>		ZLBM
27		normoxia		alta		ideal		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
28		normoxia		alta		normal		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
29		normoxia		alta		alta		<i>Epilimni3n</i>		ZLBB
30		normoxia		baja		ideal		<i>Ideal</i>		ZLBB
31		normoxia		baja		normal		<i>Ideal</i>		ZLBB
32		normoxia		baja		alta		<i>Ideal</i>		ZLBB
33		normoxia		Ideal		ideal		<i>Ideal</i>		ZLBA

34	normoxia	Ideal	normal	Ideal	ZLBA
35	normoxia	Ideal	alta	Ideal	ZLBM
36	normoxia	alta	ideal	Ideal	ZLBB
37	normoxia	alta	normal	Ideal	ZLBB
38	normoxia	alta	alta	ideal	ZLBB

donde:

- ZLA: Zona Lacustre Abiótica
- ZLBB: Zona Lacustre Biótica Baja
- ZLBM: Zona Lacustre Biótica Media.
- ZLBA: Zona Lacustre Biótica Alta

Las salidas de las reglas difusas son expresiones que se pueden determinar mediante sus respectivas funciones de pertenencia de la siguiente manera:

$$\mu_R = \min\{\mu_{OXIGENO}^i, \mu_{TEMPERATURA}^j, \mu_{TURBIDEZ}^k, \mu_{PROFUNDIDAD}^l\}, \quad (30)$$

donde i, j, k, l es la expresión lingüística que representa el nivel evaluado.

4.2.5 Agregación y defuzzificación

La función de pertenencia del IBL se utiliza para defuzzificar las reglas de inferencia que coincidan con salidas difusas (μ_R) (Rouhparvar & Panahi , 2015).

Tabla 6. Funciones de membresía de las salidas del modelo de evaluación

Parámetros Unidades	Estado	Rango de Valores	Funciones de Membresia
IBL	Zona Lacustre Abiótica	0 – 2.5	$F_{ZLA}(x) = \max\left\{0, \min\left[\frac{3,75 - x}{3,75 - 1,25}, 1\right]\right\}$ (31)
	Zona Lacustre Biótica Baja	2.5 – 5.0	$F_{ZLBB}(x) = \max\left\{0, \min\left[\frac{x - 1,25}{3,75 - 1,25}, 1, \frac{6,25 - x}{6,25 - 3,75}\right]\right\}$ (32)
	Zona Lacustre Biótica Media	5.0 – 7.5	$F_{ZLBM}(x) = \max\left\{0, \min\left[\frac{x - 3,75}{6,25 - 3,75}, 1, \frac{8,75 - x}{8,75 - 6,25}\right]\right\}$ (33)
	Zona Lacustre Biótica Alta	7.5 - 10	$F_{ZLBA}(x) = \max\left\{0, \min\left[\frac{x - 6,25}{8,75 - 6,25}, 1\right]\right\}$ (34)

Las funciones de pertenencia del Índice Biótico Lacustre se visualizan gráficamente en Fig. 19.

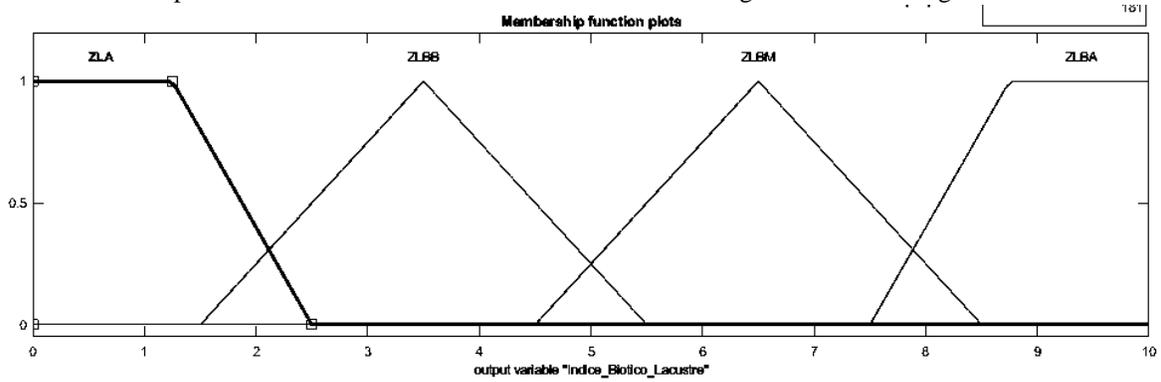


Fig. 19. Funciones de pertenencia del Índice Biótico Lacustre.

Dado que las decisiones se basan en las pruebas de todas las reglas en el sistema, estas funciones son agregadas a un conjunto difuso de salida única, calculándose de la siguiente manera:

$$\mu_{IBL_{out}} = \min\{\mu_R, \mu_{IBL}^l\}, \quad (35)$$

donde l es la función de pertenencia seleccionado.

Finalmente, las funciones de pertenencia truncadas (μ_{IBL}) son combinadas para la creación de una función final ($\mu_{IBL_{out}}$) que será procesada como se muestra en Fig. 20.

La evaluación del FIS utiliza un método defuzzificación empleando la función de pertenencia obtenido en el proceso de agregación. El método de defuzzificación empleado es la función de Centroide (COG), mediante las siguientes ecuaciones:

$$COG(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i \cdot \mu_{out}(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_1} \mu_{out}(x_i)} \quad (36)$$

Con el fin de tener una salida normalizada del resultado es utilizada la siguiente ecuación:

$$IBL = \frac{COG - \min(COG)}{\max(COG) - \min(COG)}, \quad (37)$$

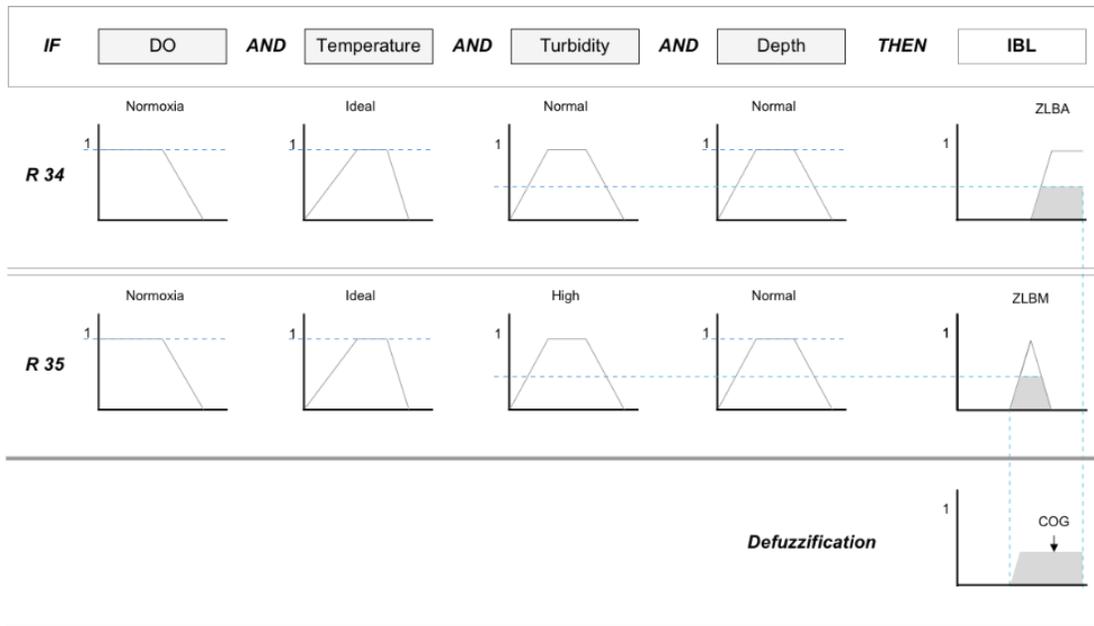


Fig. 20 Diagrama de inferencia difusa para la evaluación del índice biótico lacustre con tres cuatro variables y dos reglas. Reglas 34 y 35 se usan para mostrar el proceso de defuzzificación.

4.3 Índice Biótico Lacustre

La necesidad de implementar herramientas basadas en inteligencia artificial y lógica difusa en dispositivos de bajo costo para abordar este problema es necesaria, por lo que se desarrolló un Índice Biótico Lacustre, IBL, basado en el Sistema de Inferencia Difuso descrito con anterioridad. El Índice propuesto fue entrenado para asociar características ambientales a parámetros ideales para la coexistencia de especies endémicas. Esta solución asume que las complejas relaciones bióticas que vinculan las características de los peces con las condiciones de los ecosistemas acuáticos pueden integrarse en un FIS para obtener una evaluación del medio ambiente.

Con el objetivo de representar el funcionamiento del Sistema de Inferencia Difuso para la evaluación del Índice Biótico Lacustre, se muestra un ejemplo numérico:

Enunciando las reglas de razonamiento 34 y 35 mostradas en la Tabla X y considerando los cuatro parámetros de entrada {oxígeno = 7.0, temperatura = 21, turbidez = 50, profundidad = 10}

Regla 34: Si **oxígeno** es normoxia y **temperatura** es ideal y **turbidez** es alta y **profundidad** es ideal entonces **IBL** es zona lacustre biótica media.

Regla 35: Si **oxígeno** es normoxia y **temperatura** es ideal y **turbidez** es normal y **profundidad** es ideal entonces **IBL** es zona lacustre biótica alta.

Matemáticamente las reglas pueden ser representadas como:

$$\begin{aligned} \mathbf{R34:} \quad \mu_{R34} &= \max\{\min\{\mu_{\text{oxígeno}}^n, \mu_{\text{temperatura}}^i, \mu_{\text{turbidez}}^i, \mu_{\text{profundidad}}^i, 1\}, 0\} \\ &= \max\{\min\{1, 1, 0.5, 1, 1\}, 0\} = 0.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R35:} \quad \mu_{R35} &= \max\{\min\{\mu_{\text{oxígeno}}^n, \mu_{\text{temperatura}}^i, \mu_{\text{turbidez}}^a, \mu_{\text{profundidad}}^i, 1\}, 0\} \\ &= \max\{\min\{1, 1, 0.5, 1, 1\}, 0\} = 0.5 \end{aligned}$$

Donde n es normoxia, i es ideal, a es alta y $\mu_{R34, R35}$ son las funciones de pertenencia de salida para R34 y R35 respectivamente. Por lo tanto:

$$\mu_{out34} = \min\{\mu_{R34}(x), \mu_{ZLBA}(x)\} = 0.5$$

$$\mu_{out35} = \min\{\mu_{R35}(x), \mu_{ZLBM}(x)\} = 0.5$$

Los sistemas de inferencia difusa se adaptan mejor al mundo real en el que vivimos en comparación con otras implementaciones de técnicas artificiales, e incluso pueden entender y trabajar con nuestras expresiones, como "el agua está muy fría", "los niveles de oxígeno son bajos", "el agua es un poco turbia", etc. La clave de esta adaptación se basa en comprender los cuantificadores de calidad para nuestras inferencias (en los ejemplos anteriores, "muy", "bajo" y "un poco"), es decir, se utilizan cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales y cuando se trata de definiciones y conocimientos no estrictamente definidos (imprecisos o subjetivos).

Los sistemas basados en inferencia difusa imitan la forma en que los humanos toman decisiones, con la ventaja de ser mucho más rápidos, robustos y tolerantes a las entradas de datos de imprecisiones y ruidos; porque permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y lo verdadero, manipulando conceptos vagos, como "caliente" o "turbio", y permite a los especialistas construir dispositivos que juzgan la información difícil de definir.

Todos los organismos que viven en ecosistemas acuáticos dependen del agua para su subsistencia y crecimiento e interactúan con otros elementos abióticos que les permiten vivir y reproducirse, determinando qué organismos están creciendo en cada ecosistema acuático; de ahí la importancia de definir las diferentes zonas en los lagos que son propensas a albergar la vida de las especies presentes en un lago, y un sistema de inferencia difusa puede ayudar a evaluar esas zonas.

4.3.1 Sistema distribuido

Se diseñó un sistema distribuido para obtener los parámetros limnológicos involucrados en el Lago Zirahuén a través del Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos Distribuidos (SMEA-D) que se muestra en la Fig. 21. Este sistema se compone de dos bloques principales: el Sistema de Análisis y Monitoreo Limnológico (SAM-L) y el Dispositivo contenedor sumergible (DCS). El SMEA basa su funcionamiento en dos procesos fundamentales: Adquisición de Datos y Análisis de Datos.

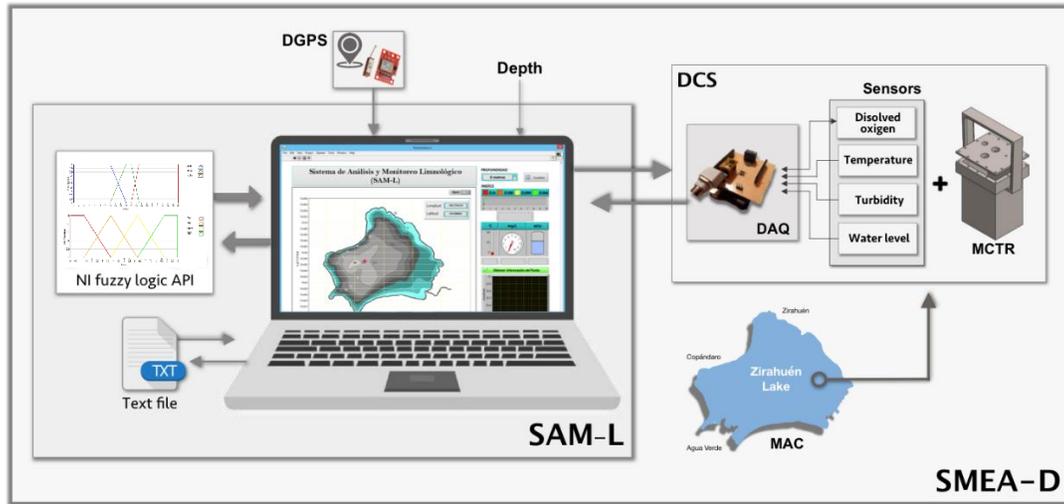


Fig. 21. Diagrama general del Sistema de Monitoreo Distribuido de Ecosistemas Acuáticos (SMEA-D).

a. Adquisición de datos

La Fig. 22. muestra el diagrama de flujo del proceso de adquisición de datos, comienza cuando la adquisición de datos se ingresa en la plataforma de software; el SAM-L obtiene geoposiciones del dispositivo GPS (DGPS) que entrega constantemente los valores de lectura obtenidos, obien el SAM-L alcanza un punto geoposicionado , el Módulo Contenedor Triparamétrico (MCTR) se sumerge en la masa de agua continental (MAC) para colocarlo a cierta profundidad, vale la pena mencionar que la profundidad está determinada por la longitud vertical total del MCRT graduado en metros (m) de cable de acero sumergido en el cuerpo de agua continental, esta medida se ingresa a mano en el SAM-L. Cuando el MCTR está geoposicionado y sumergido a la profundidad deseada, la tarjeta de adquisición de datos (DAQ), está lista para medir 5 muestras por cada cuatro sensores involucrados en el SMEA: Niveles de oxígeno disuelto (mg/L) a través del sensor D.O. Sonda de Atlas Scientific, Grados de temperatura en centígrados (°C) acoplando el sensor DS18B20, Turbidez en NTU con el sensor SEN0189 y Nivel de agua a través del sensor GA3068 para medir si hay agua filtrada dentro del dispositivo, si es cierto que el proceso de adquisición de datos ha finalizado para preservar el dispositivo teológico dentro del MCTR, de lo contrario, continúe con las medidas. Los sensores Il fueron acoplados y controlados por el microcontrolador 18F4550, el DAQ cuenta con una conexión USB para establecer comunicación en serie con el ordenador y así, realizar el almacenamiento y transmisión de los datos obtenidos al SAM-L. Luego, el SAM-L indica al DAQ leer las muestras, compensar los niveles de oxígeno disuelto afectados por la profundidad y promediar las 5 muestras por medición del sensor; todas las medidas fueron impulsadas tomando en cuenta las normas oficiales mexicanas NMX-AA-007-SCFI-2000, NMX-AA-012-SCFI-2001 y NMX-AA-038-SCFI-2001 relacionadas con las mediciones de calidad del agua. Finalmente, los datos obtenidos se almacenan en un archivo de texto plano para su posterior análisis.

b. Análisis de datos

Para visualizar la información recogida por el DCS, el SAM-L lee el almacén de mediciones en el archivo de texto plano y luego analiza los datos obtenidos utilizando la API de lógica difusa de National Instruments (NI fuzzy logic API), que contiene un modelo de sistema de inferencia difusa que nos permite evaluar las condiciones bióticas de puntos georreferenciados específicos a diferentes profundidades mediante un indicador que integra los valores obtenidos de cada parámetro analizado en una puntuación final, con una escala de 0 a 10; El indicador propuesto se llama Índice Biótico Lacustre (LBI). La Fig. 22 muestra el diagrama de flujo del proceso de análisis de datos.

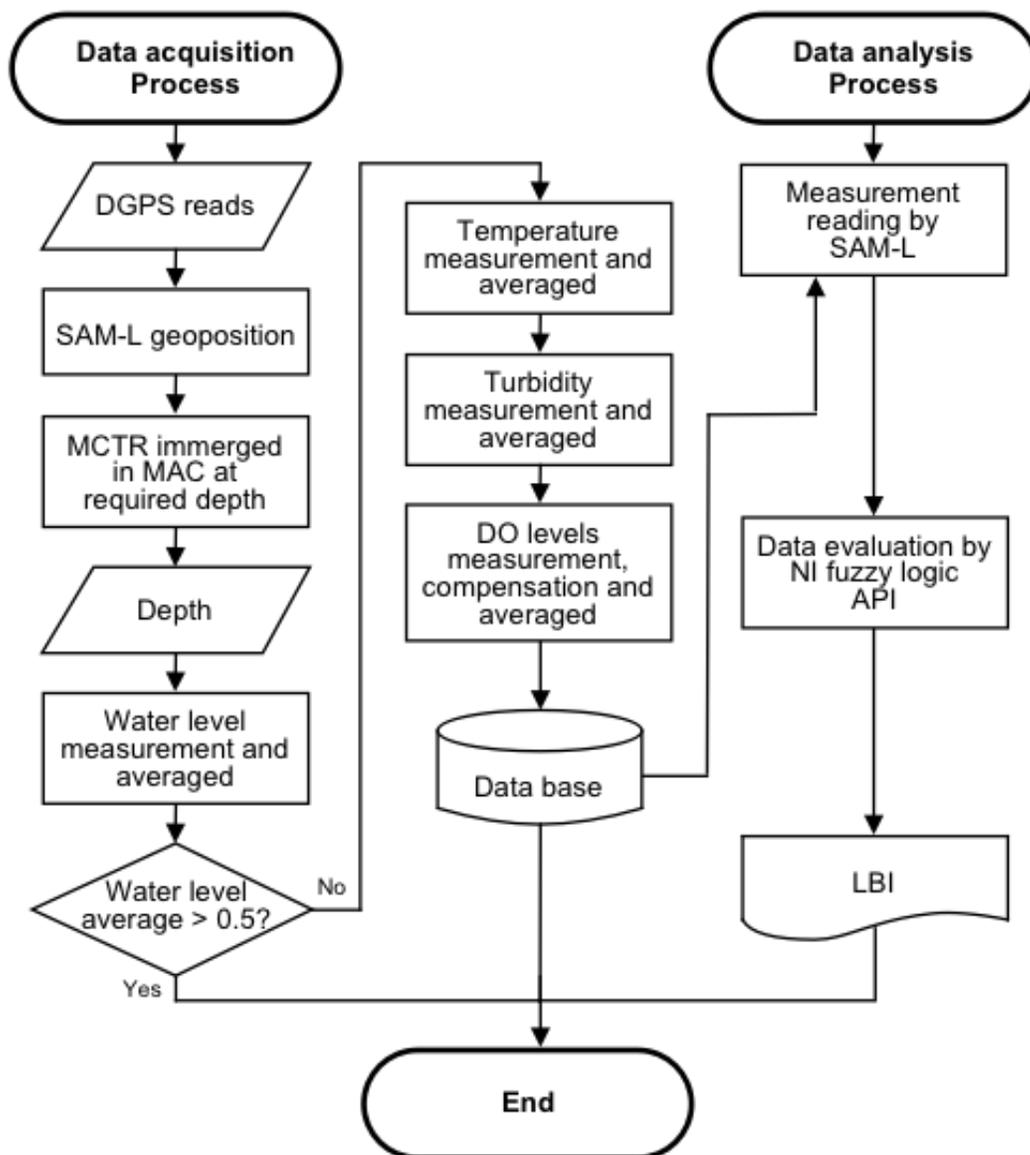


Fig. 22. Diagrama de flujo del proceso de adquisición y evaluación de datos.

4.4 Modelo de clasificación de capas de estratificación

El modelo de reconocimiento de patrones cuenta con 5 bloques necesarios que permiten identificar el comportamiento de un lago respecto a su régimen térmico, es decir, si es lago se encuentra en su etapa de estratificación durante el verano o bien, si se encuentra mezclado durante el otoño y la primavera. El presente modelo aún no considera todas las etapas del *turnover* durante cada estación del año, ya que el modelo no considera el comportamiento del lago cuando la estación del año se encuentra en invierno. El modelo comprende los bloques de medición, agrupamiento y segmentado, extracción de características, clasificación y post-procesamiento, donde su interrelación se puede ver reflejada en el diagrama a bloques de la Fig. 23.

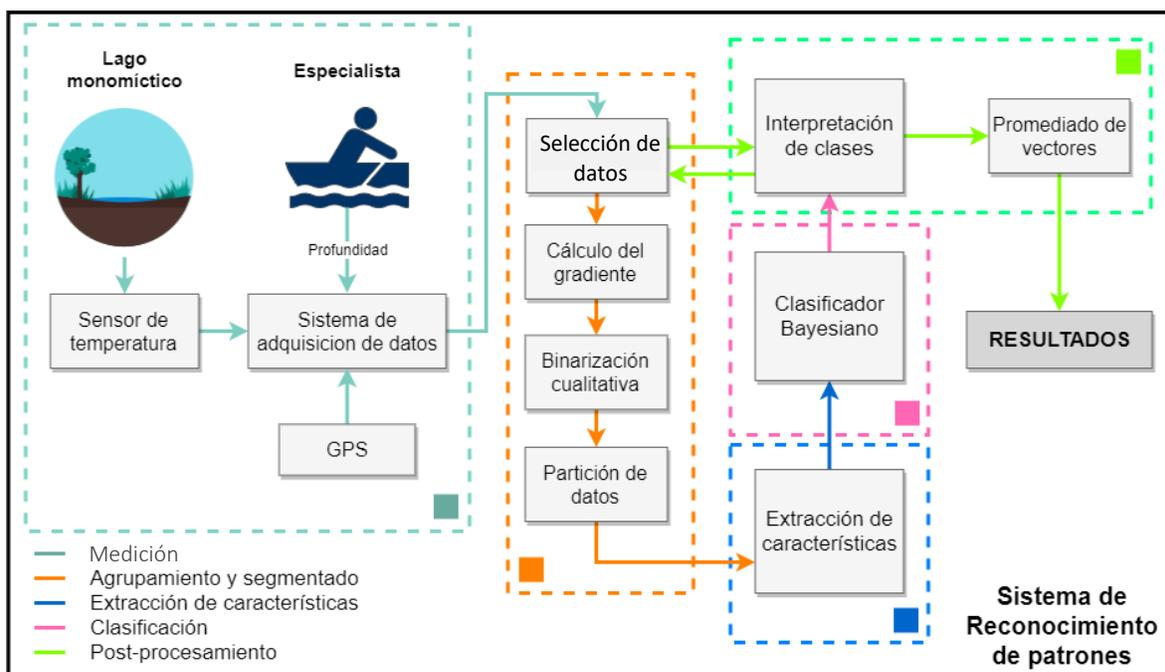


Fig. 23. Diagrama de interacción del modelo propuesto para reconocimiento de patrones en el comportamiento de la temperatura de un lago.

4.4.1 Descripción del modelo

a. Medición

Mediante un sistema de medición es posible obtener las lecturas de un sensor de temperatura, las mediciones se pueden realizar de dos posibles maneras; la primera, si se conoce la ubicación geográfica del punto donde se encuentra la profundidad máxima del lago se posiciona en la zona guiándose del GPS, realizar w mediciones sobre el eje vertical del lago mediante el DCS, desde la profundidad $0m$ hasta la profundidad máxima alcanzada. La segunda, si se desconoce la profundidad máxima del lago, se procede a realizar mediciones diversas a diferentes profundidades del lago, así como en distintos puntos geográficos dentro del lago mediante el uso del GPS.

En todas las mediciones obtenidas se debe registrar fecha, hora, posición geográfica, profundidad de la medición, así como su temperatura para conformar el conjunto de datos con el que trabajará el modelo de reconocimiento de patrones.

b. Segmentación y agrupamiento

El bloque de segmentación y agrupamiento necesita de 4 procedimientos para realizar su función:

1. *Selección de datos:* una vez obtenido el conjunto de datos de w mediciones, debe ser procesado por el bloque de selección de datos, el cual se encarga de:
 - Ordenar – Las mediciones obtenidas se ordenan ascendentemente con respecto a la profundidad.
 - Seleccionar – Se procede a realizar la selección de todas las temperaturas registradas en una sola profundidad en específica, y se eliminan los valores máximos y mínimos del total de temperaturas por profundidad
 - Promediar – Se promedia el total de temperaturas por nivel de profundidad para obtener así, una temperatura asociada a un único nivel de profundidad, obteniendo un total de n mediciones.
2. *Cálculo del gradiente:* una vez obtenido el conjunto de datos final con n mediciones de describen las definiciones relacionadas con el cálculo del gradiente.

En todo lo siguiente, $\bar{z} = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ es el vector que representa la medición ordenada ascendentemente de n niveles de profundidad, y $\bar{t} = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ es el vector de mediciones de temperaturas asociadas a \bar{z} .

Definición 1. Sean \bar{z} y \bar{t} el vector que representa la medición ordenada ascendentemente de los niveles de profundidad y el vector de mediciones de temperaturas asociadas a \bar{z} respectivamente. Se define la *matriz de comportamiento térmico* como:

$$\bar{z} \circ \bar{t} = \begin{bmatrix} z_1 & t_1 \\ z_2 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ z_n & t_n \end{bmatrix} \quad (38)$$

Definición 2. Sea $\bar{z} \circ \bar{t}$ la *matriz de comportamiento térmico* de \bar{z} y \bar{t} . Se define el *gradiente térmico lacustre* ∇T dado por:

$$\nabla T_i = \frac{|t_i - t_{i+1}|}{z_{i+1} - z_i} \text{ para } 1 \leq i < n \quad (39)$$

3. *Binarización cualitativa:* es el proceso donde se obtiene un vector de tamaño $n - 1$, donde cada elemento del vector indica si existe un cambio de temperatura considerado entre un nivel de profundidad y su consecuente cuando su valor es 1, y 0 si no se aprecia un cambio de temperatura considerable. La definición posterior es empleada para denotar el proceso de binarización.

Definición 3. Sea $\bar{z} \circ \bar{t}$ la matriz de comportamiento térmico de \bar{z} y \bar{t} . El *vector cualitativo* $\bar{q} = (q_1, q_2, \dots, q_{n-1})$ se define por el valor de cada una de sus coordenadas que se obtienen mediante:

$$q_i = \begin{cases} 0, & \text{si } \nabla T_i < \mu \\ 1, & \text{si } \nabla T_i \geq \mu \end{cases} \quad (40)$$

donde μ es un umbral que denota el límite permitido de factor de cambio de la temperatura con respecto a la profundidad en el lago.

4. *Partición de datos:* cuando el proceso de binarización cualitativa termina, se obtiene el vector cualitativo \bar{q} , el cual, es particionado cada m elementos sucesivos. La definición siguiente es empleada en el proceso de partición de datos.

De aquí en adelante nos referiremos a m como la *cantidad de elementos de partición*.

Definición 4. Sea \bar{q} el vector cualitativo correspondiente a $\bar{z} \circ \bar{t}$, y $m \in \mathbb{Z}$ con $0 < m < n$. Se define la *matriz de partición* P como una matriz de tamaño $m \times (n - m)$ dada por:

$$P = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & \dots & q_{n-m} \\ q_2 & q_3 & q_4 & \dots & q_{n-m+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_m & q_{m+1} & q_{m+2} & \dots & q_{n-1} \end{bmatrix} \quad (41)$$

c. Extracción de características

Para comenzar el proceso de extracción de características es necesario conocer los diferentes comportamientos de la temperatura dentro de un lago de tipo monomítico cálido, y para ello, nos referimos al marco teórico, en donde claramente se pueden apreciar la dinámica de un lago monomítico cálido; cuando el lago se encuentra completamente estratificado en las estaciones de primavera-verano y se aprecian las 3 capas de estratificación: *epilimnion*, *metalimnion* e *hipolimnion*. Como la literatura lo indica, en el *metalimnion* se encuentra la termoclina, gráficamente, el *metalimnion* comienza cuando empieza a descender la temperatura muy rápidamente con respecto de la profundidad, considerando un factor de cambio μ y termina cuando el descenso de temperatura comienza a ser constante entre una profundidad y otra, es decir, el factor de cambio μ es próximo a 0. Cuando el lago se encuentra mezclado durante las estaciones de otoño-invierno, el factor del cambio es constante y cercano a 0, ya que la temperatura de la superficie, así como la del fondo también son constantes. Derivado de lo anterior las siguientes definiciones son empleadas para obtener los vectores que permiten identificar el comportamiento de temperatura entre la capa del *epilimnion* y el *metalimnion*, así como el comportamiento de temperatura entre la capa del *metalimnion* y la capa del *hipolimnion* dado m .

Definición 5. Sea $k = m$. Se define el *vector superior objetivo* $\bar{O}^S = (o^S_1, o^S_2, \dots, o^S_k)$ de la siguiente manera:

$$o^s_i = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 < i \leq k/2 \\ 1, & \text{si } k/2 < i \leq k \end{cases} \quad (42)$$

Definición 6. Sea $k = m$ se define el vector inferior objetivo $\bar{O}^I = (o^I_1, o^I_2, \dots, o^I_k)$ de la siguiente manera:

$$o^I_i = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 < i \leq k/2 \\ 0, & \text{si } k/2 < i \leq k \end{cases} \quad (43)$$

Considerando el régimen térmico de un lago monomítico cálido durante su etapa de estratificación y mezclado, la Fig. 24. demuestra los comportamientos de la temperatura y las características que se requieren clasificar conforme \bar{O}^S y \bar{O}^I .

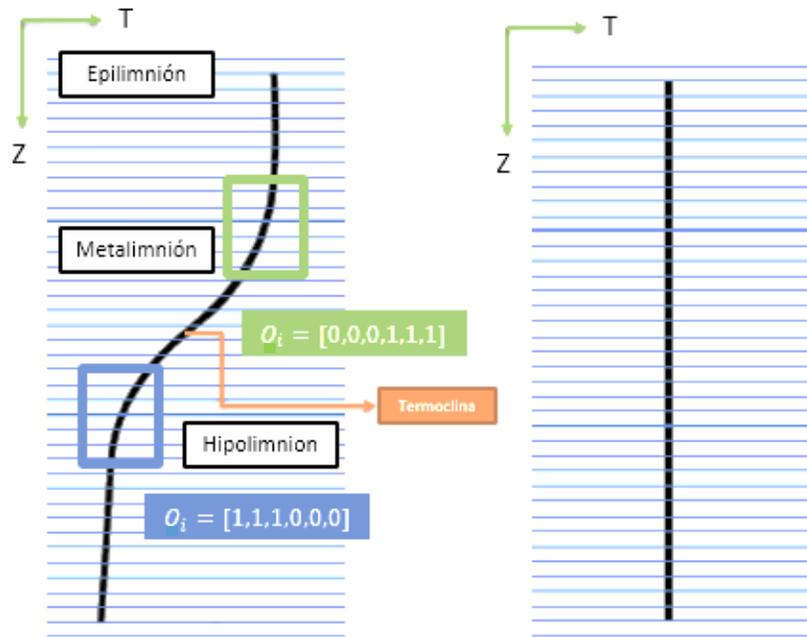


Fig. 24. Características gráficas de un lago de tipo monomítico cálido en su etapa de estratificación y mezcla.

d. Clasificador Naïve-Bayes

El clasificador se denota de la siguiente manera.

Sea C la variable aleatoria que denota la clase de una instancia y sea $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ un vector de variables aleatorias que denote los valores de los atributos observados. Sea c representando una etiqueta de clase particular y sea $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ un vector que representa valores particulares de atributos observados. Para predecir la clase de una instancia de prueba \bar{x} , el teorema de Bayes se utiliza para calcular la probabilidad (Chandra et al., 2007):

$$p(C = c | \bar{X} = \bar{x}) = \frac{p(C = c)p(\bar{X} = \bar{x} | C = c)}{p(\bar{X} = \bar{x})} \quad (44)$$

Posteriormente, predecir la clase de la instancia de prueba con la probabilidad mas alta. $\bar{X} = \bar{x}$ representa el evento donde $X_1 = x_1 \wedge X_2 = x_2 \wedge \dots \wedge X_m = x_m$. $p(\bar{X} = \bar{x})$ puede ser ignorado ya que es invariante a través de las clases, entonces la ecuación X1 se describe como:

$$p(C = c | \bar{X} = \bar{x}) \propto p(C = c)p(\bar{X} = \bar{x} | C = c) \quad (45)$$

$p(C = c)$ y $P(\bar{X} = \bar{x} | C = c)$ son calculados a partir del conjunto de datos de entrenamiento. Como atributos X_1, X_2, \dots, X_m son condicionalmente independientes de cada uno para las clases dadas, entonces la ecuación x2 se describe como:

$$p(C = c | \bar{X} = \bar{x}) \propto p(C = c) \prod_{i=1}^m p(X_i = x_i | C = c) \quad (46)$$

Lo cual es sencillo para las instancias de prueba y para calcularlas de acuerdo con el conjunto de datos de entrenamiento. Los clasificadores que utilizan la Ecuación 46 se llaman clasificador de Naïve-Bayes.

El clasificador Naïve-Bayes puede soportar tanto atributos categóricos como numéricos. Por cada atributo discreto $P(X_i = x_i | C = c)$ en la Ecuación 46 es modelado por un numero real positivo entre 0 y 1, y las probabilidades pueden ser calculadas con una buena precisión razonable a partir de la frecuencia de las instancias $C = c$ y la frecuencia de instancias con $X_i = x_i \wedge C = c$ en el conjunto de datos de entrenamiento. Este acercamiento de estimación de probabilidades se le denomina acercamiento básico. La estimación de Laplace y M-estimación suelen utilizarse para calcular las probabilidades de la Ecuación 46.

En la estimación de Laplace:

$$p(C = c): \frac{n_c + l}{N + a * l} \quad (47)$$

donde n_c es el número de instancias que satisfacen $C = c$, N es el numero de instancias de entrenamiento, a es el número de clases y $l = 1$

En M-estimación:

$$p(X_i = x_i | C = c): \frac{(n_{ci} + r * p)}{n_c + r} \quad (48)$$

donde n_{ci} es el número de instancias que satisfacen $X_i = x_i \wedge C = c$, n_c es el numero de instancias que satisfacen $C = c$, p es la probabilidad a priori de $p(X_i = x_i)$ y $r = 2$.

En contraste, por cada atributo numérico la probabilidad $p(X_i = x_i | C = c)$ es modelada por alguna distribución de probabilidad continua, por ejemplo, una probabilidad de densidad Gaussiana, a través del rango de los valores de los atributos (John, G. and Langley, P., 2013).

Un atributo discreto X_i^c es formado por cada atributo numérico X_i y cada valor de X_i^c corresponde a un intervalo dado por $(a_i, b_i]$ de X_i . Si $x_i \in (a_i, b_i]$ entonces $p(X_i = x_i | C = c)$ en la Ecuación 46, es calculada por:

$$p(X_i = x_i | C = c) \approx p(a_i < x_i \leq b_i | C = c) \quad (49)$$

El cálculo es el mismo para atributos discretos mencionados anteriormente. Usando la Ecuación 49 se tiene:

$$p(X_i = x_i | C = c) \propto p(C = c) \prod_{i=1}^m p(a_i < x_i \leq b_i | C = c) \quad (50)$$

Derivado de lo anterior, para atributos numéricos de una instancia de prueba $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, el cálculo de la probabilidad se calcula con la Ecuación 50.

Considere $\bar{z} \circ \bar{t}$ la matriz de comportamiento térmico de \bar{z} y \bar{t} , y P la matriz de partición. P está dada por:

$$P = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & \dots & q_{n-m} \\ q_2 & q_3 & q_4 & \dots & q_{n-m+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_m & q_{m+1} & q_{m+2} & \dots & q_{n-1} \end{bmatrix}$$

Sea $\bar{e}_i = (q_i, q_{i+1}, \dots, q_{i+m})$ el vector que corresponde a la columna i de P. P infiere un conjunto de vectores dado por $T = \{\bar{e}_1, \bar{e}_2, \dots, \bar{e}_{n-m}\}$. Se define el *conjunto de clasificación* $S = \{c_1, c_2, \dots, c_{n-m}\}$, donde c_i corresponde a la clase de \bar{e}_i .

e. Post-procesamiento

Una vez obtenido el conjunto de clasificación S, se recuperan los valores de temperatura y de profundidad de interés indicados por las clases encontradas. Es posible obtener dichos valores a través del índice de S considerando las siguientes definiciones:

A partir desde este momento se considera a como la cantidad de clases de tipo c encontradas en el vector de clasificación S e i como el índice donde el vector de clasificación \bar{S} es igual a la clase de tipo c .

Definición 7. Sea \bar{S} el vector de clasificación, $\bar{z} \circ \bar{t}$ la matriz de comportamiento térmico y m la cantidad de elementos de partición. El *vector promedio de temperatura de la clase c* \overline{PT}^c se define mediante:

$$PT^c_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{i+j} \quad \text{con } 1 \leq k \leq a \quad (51)$$

Definición 8. Sea $\bar{\mathbf{S}}$ el vector de clasificación, $\bar{\mathbf{z}} \circ \bar{\mathbf{t}}$ la matriz de comportamiento térmico y m la cantidad de elementos de partición. El *vector promedio de profundidad de la clase c* $\overline{\mathbf{PZ}}^c$ se define mediante:

$$PZ^c_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m z_{i+j} \quad \text{con } 1 \leq k \leq a \quad (52)$$

Una vez obtenidos $\overline{\mathbf{PT}}^c$ y $\overline{\mathbf{PZ}}^c$, se calcula el promedio de todos los elementos de $\overline{\mathbf{PT}}^c$ por clase:

$$t^c = \frac{1}{k} \sum_{w=0}^{k-1} PT^c_g \quad (53)$$

donde t^c indica el valor de la temperatura promedio por cada clase. La misma forma se calcula el promedio de todos los elementos de $\overline{\mathbf{PZ}}^c$:

$$z^c = \frac{1}{k} \sum_{w=0}^{k-1} PZ^c_g \quad (54)$$

donde z^c indica el valor de la profundidad promedio por cada clase.

4.4.2 Algoritmos

Se desarrollaron los algoritmos necesarios mostrados en las Tabla 10, 11, 12 y 14 para la identificación de las distintas capas de estratificación dentro de un lago de tipo monomítico cálido durante su etapa de estratificación considerando las Definiciones anteriores, mientras que el algoritmo mostrado en la Tabla 13 indica el proceso de entrenamiento del clasificador Naïve-Bayes. Los algoritmos desarrollados permiten identificar los valores de temperatura y profundidad de cada una de las capas encontradas.

Tabla 7. Algoritmo de entrenamiento en el proceso de clasificación de capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido.

Algoritmo 1.1: Clasificación de las diferentes capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido. (Entrenamiento).

Entradas:
 w : total de mediciones.
 \bar{r} : Vector que representa la medición ordenada ascendentemente de n niveles de profundidad
 \bar{v} : Vector que representa las mediciones de temperaturas asociadas a \bar{r}
 μ : umbral de cambio de temperatura permitido.
 m : cantidad de elementos de partición menor que w .

Salidas:
 X : conjunto de entrenamiento.
 C : conjunto de clasificación.

Procedimiento Entrenar ($w, \bar{r}, \bar{v}, \mu, m$):

Inicializar;
 ∇V : vector del gradiente térmico lacustre de tamaño $w - 1$.
 \bar{p} : vector cualitativo de tamaño $w - 1$.
 Q : matriz de partición de tamaño $m \times (w - n)$.
 \bar{e} : vector de vectores de tamaño m .

Obtener $\bar{r} \circ \bar{v}$.

Obtener $\nabla V (\bar{r} \circ \bar{v})$:
Para $i \leftarrow 1$ Hasta w con *Paso 1* Hacer:
 $\nabla V_i = |v_i - v_{i+1}| / r_{i+1} - r_i$
Fin Para.

Obtener $\bar{p} (\nabla V)$:
Para $i \leftarrow 1$ Hasta $w - 1$ con *Paso 1* Hacer:
 Si $\nabla V_i < \mu$ entonces:
 $p_i \leftarrow 0$
 Si No Si $\nabla V_i \geq \mu$ Entonces:
 $p_i \leftarrow 1$
 Fin Si.
Fin Para.

Obtener $Q (\bar{p}, m)$:
Para $i \leftarrow 1$ Hasta m con *Paso 1* Hacer:
 Para $j \leftarrow 1$ Hasta $w - m$ con *Paso 1* Hacer:

$Q_{i,j} \leftarrow p_{i+j}$

Fin Para.

Fin Para.

Obtener \bar{O}^S y $\bar{O}^I (m)$:

Para $i \leftarrow 1$ Hasta m con *Paso 1* Hacer:

Si $i \leq m/2$ Entonces:

$O^S_i \leftarrow 0$

$O^I_i \leftarrow 1$

Si No Entonces:

$O^S_i \leftarrow 1$

$O^I_i \leftarrow 0$

Fin Si.

Fin Para.

Obtener $X (Q)$:

Para $i \leftarrow 1$ Hasta $w - m$ con *Paso 1* Hacer:

Para $j \leftarrow 1$ Hasta m con *Paso 1* Hacer:

$\bar{e}_i \leftarrow$ concatenar $Q_{i,j}$

Fin Para.

$X \leftarrow \bar{e}_i$

Fin Para.

Obtener $C (X, \bar{O}^S, \bar{O}^I)$:

Para $i \leftarrow 1$ Hasta $w - m$ con *Paso 1* Hacer:

Si $T_i == \bar{O}^S$ Entonces:

$C_i \leftarrow 1; C_{i-1} \leftarrow 1; C_{i+1} \leftarrow 1$

Si No Si $T_i == \bar{O}^I$ Entonces:

$C_i \leftarrow 2; C_{i-1} \leftarrow 2; C_{i+1} \leftarrow 2$

Si No

$C_i \leftarrow 0$

Fin Si

Fin Para.

Obtener $F (C, X)$:

Regresar T, S .

Fin procedimiento.

Tabla 8. Algoritmo de pre-procesamiento de datos en la etapa de clasificación de capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido.

Algoritmo 1.2: Clasificación de las diferentes capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido. (Pre-procesamiento)

Entradas:

U : conjunto de mediciones de profundidad y temperatura.

Salidas:

\bar{z} ° \bar{t} : matriz de comportamiento térmico

Procedimiento Preprocesar (U):

Ordenar U ascendentemente con respecto a la profundidad.

$m \leftarrow$ Obtener subconjunto de U con el 5% de valores mínimos de temperatura.

$M \leftarrow$ Obtener subconjunto de U con el 5% de valores máximos de temperatura.

Eliminar del conjunto U los subconjuntos m y M .

$\bar{z} \leftarrow$ concatenar cada nivel de profundidad encontrado en U

$n \leftarrow$ longitud de \bar{z}

 Inicializar \bar{t} de tamaño n .

 Para $i \leftarrow 1$ Hasta n con *Paso 1* Hacer:

$t_i \leftarrow$ Promediar temperaturas en z_i

 Fin Para.

 Obtener \bar{z} ° \bar{t}

Fin Procedimiento.

Tabla 9. Algoritmo de procesamiento de datos en la etapa de clasificación de capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido.

Algoritmo 1.3: Clasificación de las diferentes capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido. (Procesamiento)

Entradas:

n : longitud de \bar{z} .
 $\bar{z} \circ \bar{t}$: matriz de comportamiento térmico.
 μ : umbral de cambio de temperatura permitido.
 m : cantidad de elementos de partición menor que n .
 X : conjunto de entrenamiento.
 C : conjunto de clasificación.

Salidas:

Y : conjunto de prueba.

Procedimiento Clasificar ($n, \bar{z} \circ \bar{t}, \mu, m, T, C$):

Inicializar;

∇T : vector del gradiente térmico lacustre de tamaño $n - 1$.
 \bar{q} : vector cualitativo de tamaño $n - 1$.
 P : matriz de partición de tamaño $m \times (n - m)$.
 \bar{d} : vector de vectores de tamaño m .

Obtener $\nabla T (\bar{z} \circ \bar{t})$:

Para $i \leftarrow 1$ Hasta n con *Paso 1* Hacer:
 $\nabla T_i = |t_i - t_{i+1}| / z_{i+1} - z_i$
 Fin Para.

Obtener $\bar{q} (\nabla T)$:

Para $i \leftarrow 1$ Hasta $n - 1$ con *Paso 1* Hacer:
 Si $\nabla T_i < \mu$ entonces:
 $q_i \leftarrow 0$
 Si No Si $\nabla T_i \geq \mu$ Entonces:
 $q_i \leftarrow 1$
 Fin Si.
 Fin Para.

Obtener $P (\bar{q}, m)$:

Para $i \leftarrow 1$ Hasta m con *Paso 1* Hacer:
 Para $j \leftarrow 1$ Hasta $n - m$ con *Paso 1* Hacer:
 $P_{i,j} \leftarrow q_{i+j}$
 Fin Para.
 Fin Para.

Obtener $Y (P)$:

Para $i \leftarrow 1$ Hasta $n - m$ con *Paso 1* Hacer:
 Para $j \leftarrow 1$ Hasta n con *Paso 1* Hacer:
 $\bar{d}_i \leftarrow$ concatenar $P_{i,j}$
 Fin Para.
 $Y \leftarrow$ agregar \bar{d}_i
 Fin Para.

Fin Procedimiento.

Tabla 10. Algoritmo de clasificación basado en Elkhoukhi, H. et. al. (2022) en el proceso de identificación de capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido

Algoritmo 1.4: Clasificación de las diferentes capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido. (Clasificación Naïve-Bayes)

Entradas:

X : conjunto de entrenamiento.
 C : conjunto de clasificación.
 Y : conjunto de prueba.

Salidas:

S : conjunto clasificado.

Procedimiento Clasificar (X, C, Y):

Mientras X_i hacer:

 Para $i \leftarrow 1$ Hasta $w - m$ con *Paso 1* Hacer:

 Estimar $p(C = c_i)$ con instancia en X .

 Para $j \leftarrow 1$ Hasta $w - m$ con *Paso 1* Hacer:

 Para $k \leftarrow 1$ Hasta 3 con *Paso 1* Hacer:

 Estimar $p(X_j = x_{j,k} | C = c_i)$

 Fin Para.

 Fin Para.

 Fin Para.

Fin Mientras.

Mientras Y_i hacer:

$S_i \leftarrow$ Obtener la probabilidad condicional mas alta calculada para cada clase

Terminar

Regresar S

Fin procedimiento.

Tabla 11. Algoritmo de post-procesamiento de datos en la etapa de clasificación de capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido.

Algoritmo 1.5: Clasificación de las diferentes capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido. (Post-Procesamiento)

Entradas:

S : conjunto clasificado.

Salidas:

t^1 : Temperatura máxima de la capa epilimnion

z^1 : Profundidad máxima de la capa epilimnion

t^2 : Temperatura máxima de la capa metalimnion

z^2 : Profundidad máxima de la capa metalimnion

Procedimiento Postprocesar (S, m, n):

$a \leftarrow 0$

$b \leftarrow 0$

Para $i \leftarrow 1$ Hasta $n - m$ con *Paso 1* Hacer:

Si $S_i = 1$ Entonces:

$a \leftarrow a + 1$

$\bar{a}_a \leftarrow i$

Si No Si $S_i = 2$ Entonces:

$b \leftarrow b + 1$

$\bar{b}_b \leftarrow i$

Fin Si.

Fin Para.

Para $i \leftarrow 1$ Hasta a con *Paso 1* Hacer:

Inicializar $PT^1_i \leftarrow 0$.

Inicializar $PZ^1_i \leftarrow 0$.

Para $j \leftarrow 1$ Hasta a con *Paso 1* Hacer:

Para $k \leftarrow 1$ Hasta m con *Paso 1* Hacer:

$PT^1_i \leftarrow PT^1_i + t_{a+j+m}$

$PZ^1_i \leftarrow PZ^1_i + z_{a+j+m}$

Fin Para.

Fin Para.

$PT^1_i \leftarrow PT^1_i / m$

$PZ^1_i \leftarrow PZ^1_i / m$

Fin Para.

Para $i \leftarrow 1$ Hasta b con *Paso 1* Hacer:

Inicializar $PT^2_i \leftarrow 0$.

Inicializar $PZ^2_i \leftarrow 0$.

Para $j \leftarrow 1$ Hasta b con *Paso 1* Hacer:

Para $k \leftarrow 1$ Hasta m con *Paso 1* Hacer:

$PT^2_i \leftarrow PT^2_i + t_{b+j+m}$

$PZ^2_i \leftarrow PZ^2_i + z_{b+j+m}$

Fin Para.

Fin Para.

$PT^2_i \leftarrow PT^2_i / m$

$PZ^2_i \leftarrow PZ^2_i/m$

Fin Para.

Inicializar $t^1 \leftarrow 0$.
 Inicializar $z^1 \leftarrow 0$.
 Para $i \leftarrow 1$ Hasta a con *Paso 1* Hacer:
 $t^1 \leftarrow t^1 + PT^1_i$
 $z^1 \leftarrow z^1 + PZ^1_i$

Fin Para.
 $t^1 \leftarrow t^1/a$
 $z^1 \leftarrow z^1/a$

Inicializar $t^2 \leftarrow 0$.
 Inicializar $z^2 \leftarrow 0$.
 Para $i \leftarrow 1$ Hasta b con *Paso 1* Hacer:
 $t^2 \leftarrow t^2 + PT^2_i$
 $z^2 \leftarrow z^2 + PZ^2_i$

Fin Para.
 $t^2 \leftarrow t^2/a$
 $z^2 \leftarrow z^2/a$

Regresar t^1, z^1, t^2, z^2 .
 Fin **procedimiento**.

4.4.3 Interpretación de resultados

El modelo es capaz de identificar las diferentes capas de estratificación de un lago de tipo monomítico cálido, indicando profundidad y temperatura mínima y máxima de cada capa de estratificación encontrada como se muestra en la Tabla 15. Es importante mencionar que si el conjunto de clasificación S no cuenta con al menos dos clases contiguas de tipo 1 o 2, se considera que el lago se encuentra en su etapa de mezcla.

Tabla 12. Valores mínimos y máximos de profundidad y temperatura por etapas identificadas en el lago monomítico cálido.

	<i>Epilimnion</i>		<i>Metalimnion</i>		<i>Hipolimnion</i>	
	Profundidad	Temperatura	Profundidad	Temperatura	Profundidad	Temperatura
Min.	z_0	t_0	z^1	t^1	z^2	t^2
Máx.	z^1	t^1	z^2	t^2	z_n	t_n

4.4.4 Ejemplificación del modelo

Para poder emplear el clasificador Bayesiano, es necesario entrenarlo mediante una técnica de aprendizaje supervisado.

Para poder entrenar el clasificador bayesiano, es necesario considerar y extraer las características del comportamiento del régimen térmico de un lago de tipo monomítico. Por lo tanto, se llevan a cabo los procedimientos del cálculo del gradiente, binarización cualitativa y partición de datos con $m = 4$ del conjunto de datos mostrado en la Tabla 16, la cual describe el comportamiento de la temperatura de un lago monomítico estratificado. También, se muestran los valores de los vectores \bar{r} , \bar{v} , ∇V y \bar{p} del conjunto de datos de entrenamiento con $w = 30$ y $\mu = 0.4$. Los valores mencionados fueron obtenidos mediante las Ecuaciones 38 - 40.

Tabla 13. Descriptores de un lago de tipo monomítico cálido estratificado para utilizados en el proceso de entrenamiento del clasificador: total de mediciones w , valores numéricos del vector \bar{r} que representa la medición ordenada ascendentemente de w niveles de profundidad, valores numéricos del vector \bar{v} que representa las mediciones de temperatura relacionadas con \bar{r} , valores numéricos del vector del gradiente térmico lacustre ∇V , así como los valores binarios del vector cualitativo \bar{p} .

Medición	\bar{r}	\bar{v}	∇V	\bar{p}	Medición	\bar{r}	\bar{v}	∇V	\bar{p}
1	0	21.25	-	-	16	15	14.7	0.8	1
2	1	21.25	0	0	17	16	14.0	0.7	1
3	2	20.94	0.31	0	18	17	13.4	0.6	1
4	3	20.94	0	0	19	18	12.8	0.6	1
5	4	20.69	0.25	0	20	20	12.0	0.8	1
6	5	20.69	0	0	21	21	11.90	0.1	0
7	6	20.62	0.07	0	22	22	11.82	0.08	0
8	7	20.62	0	0	23	23	11.0	0.09	0
9	8	20.56	0.06	0	24	23	10.95	0.1	0
10	9	20.44	0.12	0	25	24	10.90	0.07	0
11	10	18.25	2.19	1	26	25	10.80	0.08	0
12	11	17.5	0.75	1	27	26	10.51	0.07	0
13	12	17.0	0.5	1	28	27	10.41	0.07	0
14	13	16.0	1.0	1	29	28	9.0	0.07	0

Considerando $m = 4$ para realizar las particiones del vector \bar{p} del conjunto de datos de entrenamiento, se procede a obtener la matriz de partición Q de acuerdo con la ecuación 41.

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Empleando las ecuaciones 42 y 43, se obtiene el vector superior objetivo el cual será identificado como vector perteneciente a la Clase 1 y el vector inferior objetivo, identificado como vector perteneciente a la Clase 2.

$$\bar{\theta}^S = (0,0,1,1) \quad \text{y} \quad \bar{\theta}^I = (1,1,0,0)$$

Debido al aprendizaje supervisado del presente clasificador, es necesario identificar las clases de las columnas objetivo de Q de acuerdo con $\bar{\theta}^S = (0,0,1,1)$ y $\bar{\theta}^I = (1,1,0,0)$.

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{0} & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \boxed{1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{0} & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \boxed{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{1} & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \boxed{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & \boxed{1} & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & \boxed{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

El conjunto de vectores que infiere Q esta dado por

$$X = \left\{ \begin{array}{l} (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), \\ (0,0,0,1), (0,0,1,1), (0,1,1,1), (1,1,1,1), (1,1,1,1), (1,1,1,1), \\ (1,1,1,1), (1,1,1,1), (1,1,1,1), (1,1,1,1), (1,1,1,0), (1,1,0,0), \\ (1,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), \\ (0,0,0,0), (0,0,0,0) \end{array} \right\}$$

Este conjunto de vectores se utilizará como conjunto de entrenamiento.

Si un vector en X es igual a $\bar{\theta}^S$, entonces corresponderá a un vector de la clase 1, si es igual a $\bar{\theta}^I$ corresponderá a un vector de la clase 2, en cualquier otro caso corresponderá a un vector de la clase 0. Luego, el conjunto de clasificación C , está dado por:

$$C = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \mathbf{1}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \mathbf{2}, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

Como cada columna se caracteriza por una serie de atributos y tratándose de un procesamiento de clasificación supervisado, dichas instancias se encuentran etiquetadas, es decir, se definió la clase que le corresponde tal y como se aprecia en la Tabla 17.

Tabla 14. Significado y atributo identificado de cada clase.

Instancia	Significado	Atributo	Clase
1	Patrón sin variación	x x x x	0 - SIN
2	Limite <i>epilimnion</i>	0 0 1 1	1 - EPI
3	Limite <i>hipolimnion</i>	1 1 0 0	2 - HYPO

Posteriormente, se calculan las probabilidades a priori, para el presente ejemplo será 1 dividido entre el número de clases. En este caso, se considera cada clase equiprobable. Por tanto:

$$p(SIN) = \frac{1}{3} = 0,33 \quad p(EPI) = \frac{1}{3} = 0,33 \quad p(HYPO) = \frac{1}{3} = 0,33$$

Para cada clase, realizar un recuento de los valores de atributos que toma cada instancia, es decir obtener la frecuencia de cada clase. Se distribuye cada clase por separado para eficiencia y descripción del algoritmo tal y como se muestra en la Tabla 18. Por tanto, tenemos un conjunto de 26 instancias y 3 posibles clases para entrenar al clasificador Naïve-Bayes.

Tabla 15. Tablas de frecuencia de cada clase por cada atributo identificado.

	0 - SIN			1 - EPI			2 - HYPO		
Frecuencia	xxxx	0011	1100	xxxx	0011	1100	xxxx	0011	1100
	24	0	0	0	1	0	0	0	1

Enseguida se aplica la estimación de Laplace mediante la Ecuación 47 para que los valores en cero no generen una clasificación errónea, los resultados de la aplicación anterior se aprecian en la Tabla 19.

Tabla 16. Tablas de frecuencia de cada clase por cada atributo identificado con ajuste mediante la estimación de Laplace.

	0 - SIN			1 - EPI			2 - HYPO		
Frecuencia	xxxx	0011	1100	xxxx	0011	1100	xxxx	0011	1100
	25	1	1	1	2	1	1	1	2

Posteriormente, los valores anteriores se normalizan a través de la Ecuación 48 para obtener un rango de valores [0,1] mostrados en la Tabla 20.

Tabla 17. Tablas de frecuencia normalizada de cada clase por cada atributo identificado.

	0 - SIN			1 - EPI			2 - HYPO		
Frecuencia	xxxx	0011	1100	xxxx	0011	1100	xxxx	0011	1100
	0.925	0.037	0.037	0.25	0.5	0.25	0.25	0.25	0.5

Una vez entrenado el clasificador, es decir, una vez obtenidas las probabilidades de las clases, es necesario obtener el conjunto de datos de prueba Y y clasificarlo. Para ello, se mostrará todo el proceso necesario; desde el pre-procesamiento de las mediciones muestreadas hasta la obtención del conjunto clasificado.

Las mediciones realizadas en el lago de Zirahuén se describen en la Tabla 21.

Tabla 18. Mediciones realizadas en el lago de Zirahuén considerando fecha, hora, latitud, longitud, profundidad y temperatura.

Medición	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Profundidad (m)	Temperatura (°C)
1	5/4/2018	12:03 PM	19.4422758	-101.74933	0	21.25
2	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	4	20.56
3	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	4	20.56
4	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	5	20.5
5	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	5	20.5
6	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	6	20.5
7	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	6	20.5
8	5/4/2018	12:05 PM	19.4422758	-101.74933	8	20.44
9	5/4/2018	12:05 PM	19.4422758	-101.74933	8	20.44
10	5/4/2018	12:05 PM	19.4422758	-101.74933	10	20.06
11	5/4/2018	12:05 PM	19.4422758	-101.74933	10	20.06
12	5/4/2018	12:13 PM	19.4404291	-101.752696	0	0
13	5/4/2018	12:13 PM	19.4404291	-101.752696	0	20.94
14	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	2	20.87
15	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	2	20.87
16	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	4	20.69
17	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	4	20.62
18	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	5	20.56
19	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	5	20.56
20	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	6	20.56
21	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	6	20.56

22	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	8	20.37
23	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	8	20.31
24	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	10	19.69
25	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	10	19.56
26	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	12	18.87
27	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	12	18.81
28	5/4/2018	12:16 PM	19.4404291	-101.752696	13	18.56
29	5/4/2018	12:16 PM	19.4404291	-101.752696	13	18.56
30	5/4/2018	12:25 PM	19.4386634	-101.754121	0	21.06
31	5/4/2018	12:25 PM	19.4386634	-101.754121	5	20.62
32	5/4/2018	12:25 PM	19.4386634	-101.754121	5	20.62
33	5/4/2018	12:26 PM	19.4386634	-101.754121	10	19.75
34	5/4/2018	12:26 PM	19.4386634	-101.754121	10	19.56
35	5/4/2018	12:26 PM	19.4386634	-101.754121	13	18.69
36	5/4/2018	12:26 PM	19.4386634	-101.754121	13	18.5
37	5/4/2018	12:35 PM	19.43447	-101.75424	0	22.31
38	5/4/2018	12:37 PM	19.43447	-101.75424	0	22.56
39	5/4/2018	12:37 PM	19.43447	-101.75424	0	22.56
40	5/4/2018	12:49 PM	19.427665	-101.753215	0	21.44
41	5/4/2018	12:49 PM	19.427665	-101.753215	2	21.12
42	5/4/2018	12:49 PM	19.427665	-101.753215	2	21.12
43	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	4	20.87
44	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	4	20.81
45	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	5	20.75
46	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	5	20.75
47	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	6	20.69
48	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	6	20.69
49	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	8	20.44
50	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	8	20.44
51	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
52	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
53	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
54	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
55	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
56	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
57	5/4/2018	12:59 PM	19.428859	-101.751466	0	21.25
58	5/4/2018	12:59 PM	19.428859	-101.751466	2	20.94
59	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	2	20.87
60	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	4	20.69
61	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	4	20.69
62	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	5	20.62
63	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	5	20.62
64	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	6	20.56

65	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	6	20.56
66	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	8	20.44
67	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	8	20.44
68	5/4/2018	1:01 PM	19.428859	-101.751466	10	20.31
69	5/4/2018	1:01 PM	19.428859	-101.751466	10	20.31
70	5/4/2018	1:01 PM	19.428859	-101.751466	13	18.25
71	5/4/2018	1:01 PM	19.428859	-101.751466	13	18
72	5/4/2018	1:09 PM	19.43173	-101.749156	0	21.44
73	5/4/2018	1:09 PM	19.43173	-101.749156	0	21.37
74	5/4/2018	1:09 PM	19.43173	-101.749156	0	21.25
75	5/4/2018	1:09 PM	19.43173	-101.749156	0	21.25
76	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	2	20.87
77	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	2	20.81
78	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	4	20.62
79	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	4	20.56
80	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	5	20.5
81	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	5	20.5
82	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	6	20.37
83	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	6	20.37
84	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	8	20.31
85	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	8	20.31
86	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	10	20.25
87	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	10	20.25
88	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	13	18.62
89	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	13	18.44
90	5/4/2018	1:25 PM	19.437235	-101.746635	0	21.5
91	5/4/2018	1:25 PM	19.437235	-101.746635	5	20.69
92	5/4/2018	1:25 PM	19.437235	-101.746635	5	20.69
93	5/4/2018	1:25 PM	19.437235	-101.746635	10	20.25
94	5/4/2018	1:26 PM	19.437235	-101.746635	10	20.25
95	5/4/2018	1:26 PM	19.437235	-101.746635	13	18.5
96	5/4/2018	1:26 PM	19.437235	-101.746635	13	18.31
97	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	0	22
98	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	5	21.06
99	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	5	20.94
100	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	10	20.25
101	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	10	20.06
102	5/4/2018	1:47 PM	19.44543	-101.744907	13	18.37
103	5/4/2018	1:47 PM	19.44543	-101.744907	13	18.06

El total de mediciones obtenidas fueron 103.

Selección de datos.

Una vez obtenido el conjunto de datos de 103 mediciones, se ordena de manera ascendente con respecto de los valores de la profundidad y se elimina el 5% de las mediciones de temperatura para valores mínimos y el 5% de las mediciones para valores máximos, En la Tabla 22. se observa el ordenamiento ascendente de las mediciones por profundidad y las mediciones eliminadas se muestran sombreadas.

Tabla 19. Mediciones obtenidas del lago de Zirahúen Ordenadas de manera ascendente con respecto a la profundidad mostrada, sombreadas se encuentran las mediciones máximas y mínimas que no se tomaron en consideración.

Medición	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Profundidad	Temperatura
1	5/4/2018	12:03 PM	19.4422758	-101.74933	0	21.25
2	5/4/2018	12:13 PM	19.4404291	-101.752696	0	0
3	5/4/2018	12:13 PM	19.4404291	-101.752696	0	20.94
4	5/4/2018	12:25 PM	19.4386634	-101.754121	0	21.06
5	5/4/2018	12:35 PM	19.43447	-101.75424	0	22.31
6	5/4/2018	12:37 PM	19.43447	-101.75424	0	22.56
7	5/4/2018	12:37 PM	19.43447	-101.75424	0	22.56
8	5/4/2018	12:49 PM	19.427665	-101.753215	0	21.44
9	5/4/2018	12:59 PM	19.428859	-101.751466	0	21.25
10	5/4/2018	1:09 PM	19.43173	-101.749156	0	21.44
11	5/4/2018	1:09 PM	19.43173	-101.749156	0	21.37
12	5/4/2018	1:09 PM	19.43173	-101.749156	0	21.25
13	5/4/2018	1:09 PM	19.43173	-101.749156	0	21.25
14	5/4/2018	1:25 PM	19.437235	-101.746635	0	21.5
15	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	0	22
16	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	2	20.87
17	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	2	20.87
18	5/4/2018	12:49 PM	19.427665	-101.753215	2	21.12
19	5/4/2018	12:49 PM	19.427665	-101.753215	2	21.12
20	5/4/2018	12:59 PM	19.428859	-101.751466	2	20.94
21	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	2	20.87
22	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	2	20.87

23	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	2	20.81
24	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	4	20.56
25	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	4	20.56
26	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	4	20.69
27	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	4	20.62
28	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	4	20.87
29	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	4	20.81
30	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	4	20.69
31	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	4	20.69
32	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	4	20.62
33	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	4	20.56
34	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	5	20.5
35	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	5	20.5
36	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	5	20.56
37	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	5	20.56
38	5/4/2018	12:25 PM	19.4386634	-101.754121	5	20.62
39	5/4/2018	12:25 PM	19.4386634	-101.754121	5	20.62
40	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	5	20.75
41	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	5	20.75
42	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	5	20.62
43	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	5	20.62
44	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	5	20.5
45	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	5	20.5
46	5/4/2018	1:25 PM	19.437235	-101.746635	5	20.69
47	5/4/2018	1:25 PM	19.437235	-101.746635	5	20.69
48	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	5	21.06
49	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	5	20.94
50	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	6	20.5
51	5/4/2018	12:04 PM	19.4422758	-101.74933	6	20.5
52	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	6	20.56

53	5/4/2018	12:14 PM	19.4404291	-101.752696	6	20.56
54	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	6	20.69
55	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	6	20.69
56	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	6	20.56
57	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	6	20.56
58	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	6	20.37
59	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	6	20.37
60	5/4/2018	12:05 PM	19.4422758	-101.74933	8	20.44
61	5/4/2018	12:05 PM	19.4422758	-101.74933	8	20.44
62	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	8	20.37
63	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	8	20.31
64	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	8	20.44
65	5/4/2018	12:50 PM	19.427665	-101.753215	8	20.44
66	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	8	20.44
67	5/4/2018	1:00 PM	19.428859	-101.751466	8	20.44
68	5/4/2018	1:10 PM	19.43173	-101.749156	8	20.31
69	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	8	20.31
70	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
71	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
72	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
73	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
74	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
75	5/4/2018	12:51 PM	19.427665	-101.753215	9	20.31
76	5/4/2018	12:05 PM	19.4422758	-101.74933	10	20.06
77	5/4/2018	12:05 PM	19.4422758	-101.74933	10	20.06
78	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	10	19.69
79	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	10	19.56
80	5/4/2018	12:26 PM	19.4386634	-101.754121	10	19.75
81	5/4/2018	12:26 PM	19.4386634	-101.754121	10	19.56
82	5/4/2018	1:01 PM	19.428859	-101.751466	10	20.31

83	5/4/2018	1:01 PM	19.428859	-101.751466	10	20.31
84	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	10	20.25
85	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	10	20.25
86	5/4/2018	1:25 PM	19.437235	-101.746635	10	20.25
87	5/4/2018	1:26 PM	19.437235	-101.746635	10	20.25
88	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	10	20.25
89	5/4/2018	1:46 PM	19.44543	-101.744907	10	20.06
90	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	12	18.87
91	5/4/2018	12:15 PM	19.4404291	-101.752696	12	18.81
92	5/4/2018	12:16 PM	19.4404291	-101.752696	13	18.56
93	5/4/2018	12:16 PM	19.4404291	-101.752696	13	18.56
94	5/4/2018	12:26 PM	19.4386634	-101.754121	13	18.69
95	5/4/2018	12:26 PM	19.4386634	-101.754121	13	18.5
96	5/4/2018	1:01 PM	19.428859	-101.751466	13	18.25
97	5/4/2018	1:01 PM	19.428859	-101.751466	13	18
98	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	13	18.62
99	5/4/2018	1:11 PM	19.43173	-101.749156	13	18.44
100	5/4/2018	1:26 PM	19.437235	-101.746635	13	18.5
101	5/4/2018	1:26 PM	19.437235	-101.746635	13	18.31
102	5/4/2018	1:47 PM	19.44543	-101.744907	13	18.37
103	5/4/2018	1:47 PM	19.44543	-101.744907	13	18.06

Posteriormente, es necesario promediar los valores de temperatura por nivel de profundidad, obteniendo la Tabla 23. donde se muestra el número de medición, el vector \bar{z} ordenado ascendentemente que representa los n niveles de profundidad y el vector \bar{t} que representa las temperaturas asociadas a \bar{z} .

Tabla 20. Descriptores promediados del lago de Zirahuén representados por \bar{z} y \bar{t} .

Medición	\bar{z}	\bar{t}
1	0	21.25
2	2	20.93
3	4	20.67
4	5	20.66
5	6	20.54
6	8	20.39
7	9	20.31
8	10	20.04
9	12	18.84
10	13	18.37

Una vez obtenido el conjunto de datos final con $n = 10$ mediciones se procede a realizar el cálculo del gradiente térmico lacustre.

Cálculo del gradiente.

Se obtiene la matriz de comportamiento térmico mediante Ecuación 38:

$$\bar{z} \circ \bar{t} = \begin{bmatrix} 0 & 21.25 \\ 2 & 20.93 \\ 4 & 20.67 \\ 5 & 20.66 \\ 6 & 20.54 \\ 8 & 20.39 \\ 9 & 20.31 \\ 10 & 20.04 \\ 12 & 18.84 \\ 13 & 18.37 \end{bmatrix}$$

Se obtiene el gradiente térmico lacustre mediante la Ecuación 39.

$$\nabla T = \begin{bmatrix} 0.158 \\ 0.133 \\ 0.012 \\ 0.119 \\ 0.071 \\ 0.084 \\ 0.266 \\ 0.602 \\ 0.466 \end{bmatrix}$$

Binarización cualitativa.

Posteriormente se obtiene el vector cualitativo a través de la Ecuación 40 considerando $\mu = 0.4$.

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Partición de datos.

Considerando 4 elementos ($m = 4$) para realizar las particiones del vector \bar{q} , se procede a obtener la matriz de partición del conjunto de datos de prueba P de acuerdo con la ecuación 41.

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

El conjunto de vectores que infiere P este dado por

$$Y = \{(0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,1), (0,0,1,1)\}$$

Este conjunto de vectores se utilizará como conjunto de prueba.

Para ejemplificar el proceso de clasificación, se procede a utilizar $\mathbf{d}_6 = (q_6, q_7, q_8, q_9)$ como instancia a clasificar.

Para cada clase disponible, se determinan los valores de probabilidad de cada valor de los atributos de $\bar{\mathbf{d}}_6 = (0,0,1,1)$ tal y como se muestra en la Tabla 16, tomando en consideración la Tabla X.

Tabla 21. Tabla de frecuencias normalizadas del atributo $\bar{\mathbf{d}}_6$

	SIN 0 0 1 1	EPI 0 0 1 1	HYPO 0 0 1 1
Patrón	1/27	2/4	1/4
Resultado	0.037	0.5	0.25

Para cada clase se calcula su probabilidad mediante la fórmula de la Ecuación 46

$$p(\text{SIN} | 0011) = 0.33 \cdot (0.037) = 0.01221$$

$$p(\text{EPI} | 0011) = 0.33 \cdot (0.5) = \mathbf{0.165}$$

$$p(\text{HYPO} | 0011) = 0.33 \cdot (0.25) = 0.0825$$

Como la clase más probable es 1 - EPI, se clasifica la instancia como "Limite *epilimnion*".

Para garantizar un mejor aprendizaje, las columnas adyacentes de cada columna objetivo se les asigna la clase de la columna objetivo.

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Luego, considerando Y , el conjunto de clasificación S , estaría dado por:

$$C = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 2, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

Con el nuevo conjunto de clasificación y empleando el conjunto de prueba para clasificar cada vector en Y

$$Y = \{(0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,0), (0,0,0,1), (0,0,1,1)\}$$

El conjunto clasificado S es:

$$S = \{0, 0, 0, 0, 1, 1\}$$

Una vez obtenido el conjunto de clasificación S , se recuperan los valores de temperatura indicados por las clases encontradas empleando La ecuación 51, es decir, para la clase 1, considerando $a = 2$:

$$PT^1_1 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 t_{5+j}$$

$$PT^1_1 = \frac{1}{4}(t_6 + t_7 + t_8 + t_9) = \frac{1}{4}(20.39 + 20.31 + 20.04 + 18.84) = 19.895$$

$$PT^1_2 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 t_{5+j}$$

$$PT^1_2 = \frac{1}{4}(t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}) = \frac{1}{4}(20.31 + 20.04 + 18.84 + 18.37) = 19.39$$

Posteriormente, usando la Ecuación 53 se promedian los valores obtenidos para la temperatura:

$$t^1 = \frac{19.895 + 19.39}{2} = 19.6425$$

Ahora, se recuperan los valores de los niveles de profundidad indicados por las clases encontradas empleando la ecuación 52, es decir, para la clase 1, considerando $a = 2$:

$$PZ^1_1 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{4+j}$$

$$PZ^1_1 = \frac{1}{4}(t_6 + t_7 + t_8 + t_9) = \frac{1}{4}(8 + 9 + 10 + 12) = 9.75$$

$$PZ^1_2 = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{5+j}$$

$$PZ^1_2 = \frac{1}{4}(t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}) = \frac{1}{4}(9 + 10 + 12 + 13) = 11$$

Posteriormente, usando la ecuación 54 se promedian los valores obtenidos para los niveles de profundidad:

$$z^1 = \frac{9.75 + 11}{2} = 10.375$$

Por lo tanto, el presente ejemplo muestra los resultados en la Tabla 25. tomando en consideración la Tabla 15:

Tabla 22. Resultados del proceso de clasificación de las diferentes capas de estratificación del lago Zirahuén.

	<i>Epilimnion</i>		<i>Metalimnion</i>		<i>Hipolimnion</i>	
	Profundidad m.	Temperatura °C	Profundidad m.	Temperatura °C	Profundidad m.	Temperatura °C
Min.	$z_1 = 0$	$t_1 = 21.25$	$z^1 = 10.375$	$t^1 = 19.6425$	—	—
Máx.	$z^1 = 10.375$	$t^1 = 19.6425$	—	—	—	—

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Muestreo y obtención de la base de datos

Se realiza un muestreo de 8 puntos geográficos en el lago de Zirahuén considerando son los puntos en promedio que los limnólogos utilizan al muestrear (Madrigal, X. et al., 2004; Guridi & Torres, 2010; Mendoza, R. et al., 2015), se seleccionaron estos puntos geográficos en específico ya que los puntos P0, P2, P6, P7 concuerdan con algunos puntos de medición de investigaciones anteriores (de Paz, Y. et al., 2009; Bernal-Brooks et al., 2002; Martínez-Almeida y Tavera, 2005; Mendoza, R. et al., 2015;) y la principal razón debido a las consideraciones esenciales del INAPESCA por conocer el área, ya que se trata de una zona de tránsito de lanchas recreativas no motorizadas facilitando las pruebas de funcionamiento del equipo. La visualización de los puntos sobre un mapa geográfico se representa en Fig. 25.



Fig. 25. Lago de Zirahuén con puntos geográficos de muestreo debidamente etiquetados.

Se realizó el muestreo sobre dichos puntos con la intención de conocer los niveles de oxígeno disuelto, temperatura y turbiedad a diferentes profundidades, limitados por la distancia del cable serial utilizado para la comunicación entre dispositivos.



Fig. 26. Estudio de campo llevado a cabo en el Lago de Zirahuén el día 4 de mayo de 2018.

El conjunto de mediciones se realizó el día 4 de mayo del año 2018 desde las 12:03 hasta las 13:47 horas, empleando una lancha a remos para no mezclar el agua del sitio, tal y como se aprecia en la Figura 10. Se midieron los 8 puntos geográficos apreciables en la Figura 9 con sus respectivas coordenadas y etiquetas. El muestreo de cada punto se realizó en un promedio de 2 minutos y de 4 a 8 mediciones por sitio a través de la inmersión del MCTR en el lago de Zirahuén como la simulación descrita gráficamente en Fig. 27. El conjunto de datos resultante tiene un total de 49 mediciones muestreadas durante ese intervalo de tiempo.

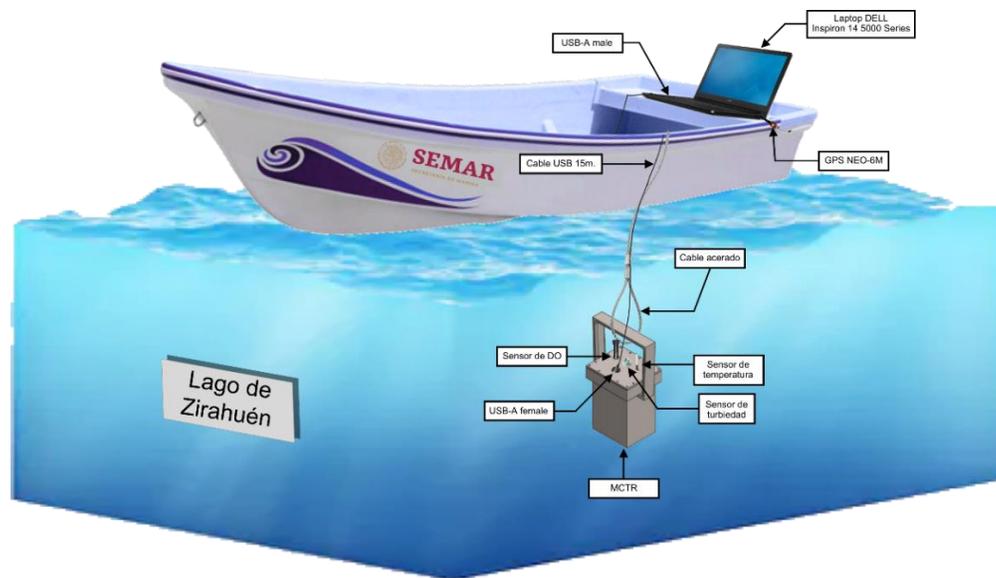


Fig. 27. Ilustración demostrativa referente al proceso de adquisición de muestras en el lugar de estudio; la ilustración comprende cada elemento de suma importancia para la obtención de los parámetros de interés.

5.2 Análisis medioambiental

5.2.1 Módulo de adquisición de datos

Los valores de los niveles de oxígeno disuelto, los grados de la temperatura y las unidades de turbiedad por punto obtenidos, así como las profundidades evaluadas sobre los diferentes puntos geográficos, son mostrados en la Tabla 26. En ésta se aprecian los valores obtenidos al evaluar la calidad del agua de los diferentes puntos muestreados acorde al wQI_{NSF} .

Tabla 23. Resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos de los 8 puntos geográficos muestreados a diferentes profundidades del Lago de Zirahuén debidamente etiquetados, incluyendo horarios de medición, así como la presión absoluta, porcentaje de saturación de oxígeno Disuelto y el valor de calidad del agua según el

$$wQI_{NSF}$$

Punto Geográfico	Hora	Profundidad (m)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)	Presión absoluta (ATM)	Saturación DO (%)	wQI_{NSF}
P0	12:03 p. m.	0	11.71	21.25	34.68	1.00	131.6	77
Latitud	12:04 p. m.	4	10.99	20.56	36.15	1.39	87.4	81
19.4422758	12:04 p. m.	5	10.19	20.5	36.15	1.49	75.6	76
Longitud	12:04 p. m.	6	9.70	20.5	36.15	1.58	67.5	71
-101.7493304	12:05 p. m.	8	9.58	20.44	36.88	1.78	59.2	63
	12:05 p. m.	10	8.95	20.06	36.88	1.92	50.7	58
P1	12:13 p. m.	0	10.35	20.94	39.07	1.00	115.6	79
Latitud	12:14 p. m.	2	9.98	20.87	39.07	1.20	93.0	81
19.4404291	12:14 p. m.	4	9.85	20.69	39.07	1.39	78.5	76
Longitud	12:14 p. m.	5	9.45	20.56	39.07	1.49	70.1	71
-101.7526956	12:14 p. m.	6	9.36	20.56	39.07	1.58	65.2	66
	12:15 p. m.	8	8.87	20.37	38.34	1.78	54.8	59
	12:15 p. m.	10	8.42	19.69	38.34	1.97	46.2	57

	12:16 p. m.	13	6.24	18.56	38.34	2.26	29.2	43
P2	12:25 p. m.	0	9.77	21.06	37.60	1.00	109.4	81
Latitud	12:25 p. m.	5	9.60	20.62	38.34	1.49	71.3	72
19.4386634	12:26 p. m.	10	8.64	19.75	38.34	1.97	47.5	54
Longitud	12:26 p. m.	13	6.60	18.69	38.34	2.26	30.9	43
-101.7541212								
P3	12:49 p. m.	0	10.86	21.44	39.80	1.00	122.5	78
Latitud	12:49 p. m.	2	10.69	21.12	39.07	1.20	100.1	84
19.427665	12:50 p. m.	4	10.52	20.87	40.54	1.39	84.1	79
Longitud	12:50 p. m.	5	10.33	20.75	39.80	1.49	77.0	76
-101.753215	12:50 p. m.	6	10.06	20.69	40.54	1.58	70.2	72
	12:50 p. m.	8	9.79	20.44	39.80	1.78	60.5	64
	12:51 p. m.	10	8.62	20.31	39.07	1.97	50.4	57
P4	12:59 p. m.	0	9.47	21.25	39.80	1.00	106.4	81
Latitud	12:59 p. m.	2	9.44	20.94	39.80	1.20	88.0	78
19.428859	01:00 p. m.	4	9.38	20.69	39.80	1.39	74.7	72
Longitud	01:00 p. m.	5	9.26	20.62	39.80	1.49	68.8	69
-101.751466	01:00 p. m.	6	9.21	20.56	40.54	1.58	64.1	64
	01:00 p. m.	8	9.30	20.44	40.54	1.78	57.5	59
	01:01 p. m.	10	8.74	20.31	39.80	1.97	48.5	54
	01:01 p. m.	13	5.64	18.25	39.80	2.26	26.2	41
P5	01:09 p. m.	0	9.56	21.25	41.27	1.00	107.4	80
Latitud	01:10 p. m.	2	9.50	20.87	40.54	1.20	88.5	79
19.43173	01:10 p. m.	4	10.02	20.56	40.54	1.39	79.6	76
Longitud	01:10 p. m.	5	10.54	20.5	41.27	1.49	78.1	74
-101.749156	01:10 p. m.	6	9.59	20.37	41.27	1.58	66.5	67
	01:10 p. m.	8	9.45	20.31	41.27	1.78	58.3	60
	01:11 p. m.	10	9.86	20.25	41.27	1.97	54.7	57
	01:11 p. m.	13	6.82	18.62	39.80	2.26	31.9	43
P6	01:25 p. m.	0	9.33	21.5	40.54	1.00	105.4	81
Latitud	01:25 p. m.	5	10.66	20.69	42.00	1.49	79.3	75
19.437235	01:25 p. m.	10	8.32	20.25	42.74	1.97	46.2	51
Longitud	01:26 p. m.	13	6.95	18.5	41.27	2.26	32.4	43
-101.746635								
P7	01:46 p. m.	0	10.58	22	36.88	1.00	120.6	76
Latitud	01:46 p. m.	5	10.64	20.94	38.34	1.49	79.6	74
19.44543	01:46 p. m.	10	10.51	20.06	38.34	1.97	58.1	59
Longitud	01:47 p. m.	13	5.02	18.37	38.34	2.26	23.4	39
-101.744907								

En los resultados podemos apreciar que la calidad del agua según el wQI_{NSF} en la mayoría de los puntos geográficos es *buena* desde la superficie hasta los 5 metros de profundidad, *media* pasando los 5 y hasta los 10 metros evaluados y *mala* al alcanzar los 13 metros; se puede apreciar que estos valores se encuentran directamente relacionados con la saturación del DO, ya que al considerarse constante la variación de la temperatura de cada punto y al observarse que los valores de la turbiedad permanecen casi constantes, se le atribuye en gran medida a la variación de los niveles de DO presentes en el lago.

Tanto en México como en distintas partes del mundo la gestión de los lagos no ha sido una actividad totalmente exitosa (Sigala et al., 2017), se han hecho muchos avances respecto a las descargas de desechos de fuentes puntuales controlables, no obstante, diversas fuentes de contaminación dentro de la cuenca y en el ambiente son menos manejables y deben seguir siendo objeto de intensas investigaciones. Para poder controlar un ambiente, es necesario conocer su comportamiento y caracterizarlo. La Tabla 27 muestra el comportamiento de los niveles de oxígeno disuelto, saturación de DO, temperatura, turbiedad y calidad del agua obtenidos a partir de un promediado de la cantidad de puntos muestreados a las diferentes profundidades y con su respectiva desviación estándar. Se puede apreciar que indistinto a su variación, la valoración del índice de calidad del agua se mantiene dentro de los rangos deseados sin cambiar su evaluación.

Tabla 24. Comportamiento de los niveles de Oxígeno Disuelto, temperatura, turbiedad y calidad del agua obtenido a partir del promediado de las distintas mediciones muestreadas a diferentes profundidades en el lago de Zirahuén con su respectiva desviación estándar.

Profundidad (m)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	DO _{SAT} (%)	Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)	wQI_{NSF} (unidades)
0	10.2 ± 0.772	114.87 ± 8.796	21.34 ± 0.303	38.70 ± 2.039	79 ± 1.853
2	9.9 ± 0.501	92.39 ± 4.826	20.95 ± 0.102	39.62 ± 0.608	81 ± 2.118
4	10.2 ± 0.555	80.87 ± 4.411	20.67 ± 0.114	39.22 ± 1.630	77 ± 3.070
5	10.1 ± 0.529	74.98 ± 4.011	20.65 ± 0.137	39.35 ± 1.715	73 ± 2.477
6	9.6 ± 0.293	66.71 ± 2.096	20.54 ± 0.104	39.51 ± 1.829	68 ± 2.844
8	9.4 ± 0.309	58.05 ± 1.932	20.40 ± 0.053	39.37 ± 1.577	61 ± 2.053
10	9.0 ± 0.721	50.28 ± 3.957	20.09 ± 0.231	39.35 ± 1.754	56 ± 2.546
13	6.2 ± 0.685	29.00 ± 3.255	18.50 ± 0.149	39.32 ± 1.091	42 ± 1.479

La Figura 28 muestra gráficamente el comportamiento de los parámetros, resaltando las líneas de tendencia que pueden ser apreciadas en las gráficas que caracterizan al lago de Zirahuén. Mediante un algoritmo de ajuste de curvas, se obtuvieron las ecuaciones que describen el comportamiento de cada parámetro, permitiendo tener un cálculo aproximado de acuerdo con la profundidad deseada. Para el caso de la saturación de oxígeno disuelto se tiene:

$$f_{DO} = e^{\frac{47439 - 1000 p}{9888}} \quad (56)$$

donde p es la profundidad. De la misma manera para el caso de la temperatura se tiene:

$$f_{temp} = e^{\frac{5(5551 - 20 p)}{9009}} \quad (57)$$

En el caso de la turbiedad, la ecuación de la curva se expresa de la siguiente manera:

$$f_{turb} = \frac{20(50 p - 48831)}{24601} \quad (58)$$

Finalmente, para la estimación de la calidad del agua, la ecuación correspondiente se describe a continuación:

$$f_{wQI} = e^{\frac{8221 - 100 p}{1821}} \quad (59)$$

Por otra parte, cada gráfica tiene como dato el coeficiente de determinación (R^2), el cual significa que un coeficiente cercano a 1 se ajustaría perfectamente a los datos medidos; en el presente trabajo se tienen valores de ajuste muy cercanos a la unidad, lo cual es indicativo de un bajo nivel de error (RMSE).

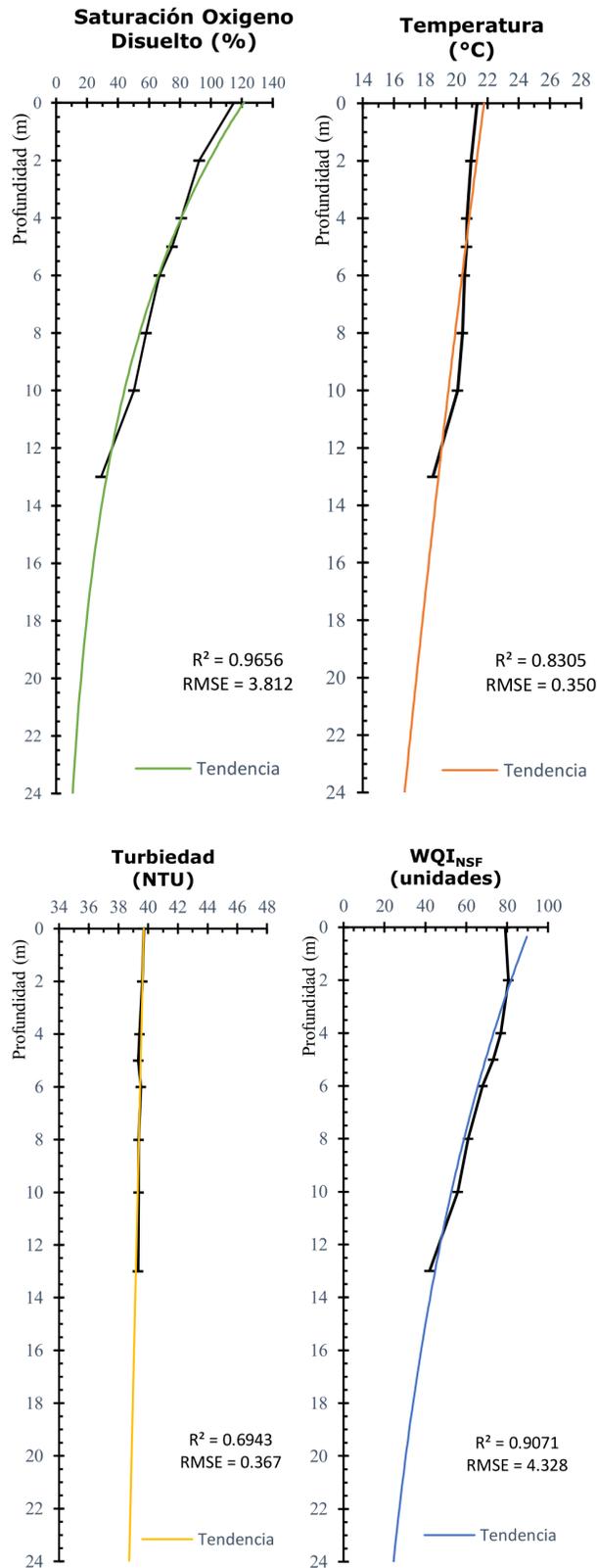


Fig. 28. Comportamiento de la temperatura, saturación de oxígeno disuelto, turbiedad y calidad del agua a diferentes profundidades. Las gráficas muestran el comportamiento característico de un lago oligotrófico.

De acuerdo con Mendoza et al. (2015) en un punto de muestreo denominado “CNVG” realizado el 11 de mayo de 2014 en un intervalo de 7 horas, muestra una calidad del agua mala al realizar mediciones de saturación de oxígeno disuelto; menciona que la profundidad promedio de donde se obtuvieron las muestras fue a los 22 m de profundidad, cabe mencionar que en el mes de mayo, debido a la naturaleza del lago, éste se encuentra completamente estratificado, así que tomando como referencia el modelo de estimación de la Ecuación 59 de acuerdo con el muestreo realizado en únicamente 2 minutos y debido a la presión absoluta estándar, la temperatura en ese punto y a los niveles de oxígeno disuelto, el 20.43% de saturación de oxígeno disuelto, es parte del comportamiento del lago; si evaluamos la profundidad muestreada empleando la Ecuación 59, a esa profundidad nos arroja un $16.87\% \pm 4.16$ indicando una muy mala calidad del agua en ese punto, es decir, de acuerdo a la Ecuación 59 con un resultado en el índice de 21.9 unidades.

En el trabajo de muestreo del Lago de Zirahuén elaborado en mayo de 2014 por Mendoza et al. (2015), se menciona una super saturación de oxígeno disuelto presente en el lago que puede ser dañina para las especies; sin embargo, no menciona la profundidad en la que se muestrea dicho punto. Dentro de los resultados mostrados en la Tabla 27, en la zona superficial del lago, es decir, antes de los 50 cm de profundidad obtenemos súper saturación en todos los puntos muestreados debido a los altos valores de temperatura en la superficie. Esto se debe a la casi nula presión absoluta no estándar, equivalente a la presión atmosférica de la zona geográfica y a los niveles de oxígeno disuelto presentado en la superficie. Es preciso mencionar, que es difícil encontrar especies endémicas a menos de 1 metro de profundidad en el lago de Zirahuén (CONABIO, 2005; CONABIO, 2012a; CONABIO, 2012b; CONABIO, 2013a; CONABIO, 2013b), y de acuerdo con la naturaleza de las especies al localizarse de 7 a 12 metros de profundidad, la calidad del agua para las especies endémicas del lago es considerada de buena a media. A pesar de estas consideraciones, la evaluación de la calidad del agua en el lago, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SALUD, 2000), no es considerada apta para el consumo humano, ya que excede por 33 NTUs de calidad aproximadamente.

La escasa información limnológica está disponible para la mayoría de los cuerpos de agua más pequeños, pero incluso para los lagos mejor caracterizados, los resultados son a menudo difíciles de comparar, ya que los estudios se llevan a cabo siguiendo diferentes metodologías y/o solo muestran resultados sobre algunas características fisicoquímicas específicas (Sigala et al., 2017). No obstante, el presente trabajo realiza una comparativa de los valores analizados del lago de Zirahuén por diversos autores en 3 puntos de gran relevancia, misma que puede ser apreciada en la Tabla 28.

Tabla 25. Mediciones comparativas de 3 puntos geográficos similares analizados por diferentes autores en distintos años, pero en la misma época del año con su respectivo.

Punto de referencia	P7			P2				P6				
Fecha	04-may-18	11-may-14	jul-98	04-may-18	11-may-14	01-jul-05	2000-2001	04-may-18	11-may-14	Mar-09	2009	jul-98
Profundidad m	5	-	-	5	-	5	-	13	22	40	42	28
DO_{SAT} %	79.6	72.58	86.59	71.3	71.67	83.5	87.2	32.4	20.43	5.71	5.45	15.43
Temperatura C	22	22	22.5	20.6	21.3	20	20.2	18.5	17.7	19.5	17	16.1
Turbiedad NTU	36.8	2.4	-	38.3	2.6	0.5	-	41.27	3.1	-	-	1.5
wQI_{NSF} u.	74	85	92	72	84	88	89	43	48	30	29	35
Palabra asociada	buena	buena	excelente	buena	buena	buena	buena	mala	mala	mala	mala	mala
Referencia	Tabla 4	Mendoza et al., 2015	Bernal-Brooks et al., 2002	Tabla 4	Mendoza et al., 2015	Rendon et al., 2009	Martínez y Tavera, 2005	Tabla 4	Mendoza, et al., 2015	Vergara et al., s.f	Rendon et al., 2009	Bernal-Brooks et al., 2002

Los valores obtenidos de dichos sitios fueron utilizados para poder calcular la saturación de oxígeno disuelto, y así poder estimar la evaluación del wQI_{NSF} . Claramente se puede apreciar la degradación del lago durante el transcurso de los años, ya que en los estudios realizados sobre la superficie en el año 1998, se aprecia una valoración de calidad del agua como excelente con un valor de 92 unidades; un estudio contiguo, en el año 2014, cambió la calidad del agua a buena con una valoración de 85 unidades, mientras que el análisis realizado por el presente trabajo, evalúa el punto de interés P7 como buena calidad del agua con una evaluación de 9 unidades debajo de la evaluación del año 2014; el mismo comportamiento puede verse reflejado en el punto de interés P2 yendo de 89 unidades en el año 2000 hasta 72 unidades en el año 2018; sin embargo, la calidad del agua evaluada por los autores mencionados en la Tabla 6, es considerada buena.

En el punto P6 se aprecia que, a mayor profundidad, menor es la evaluación de la calidad del agua. Todos los autores coincidieron que, de acuerdo con la máxima profundidad alcanzada en sus mediciones, la calidad del agua donde la saturación del oxígeno disuelto es baja, se considera como mala. Es importante mencionar que los valores medidos referente a la turbiedad del agua, difieren mucho de un estudio a otro; no obstante, no

impacta considerablemente en el indicador de la calidad del agua ya que aún se encuentra dentro de los parámetros aceptables.

El dispositivo SAM realiza mediciones de parámetros y estimaciones de calidad del agua en menos de 2 minutos por punto muestreado, reflejando una gran ventaja sobre aquellas metodologías donde hacen uso de dispositivos tales como GarminGPS, GARMIN GPSMAP 62 stc, multiparameter HACH, sonda YSI model55, Horiba ES-14, Horiba ES-1, oxímetro YSI 51B, Hydrolab Quanta G y botellas de VanDorn (Mendoza et al., 2015; Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000; Rendon et al., 2009; Vergara et al., s.f; Martínez-Almeida y Tavera, 2005; Sigala et al., 2017). En estos dispositivos las mediciones son obtenidas de forma independiente por parámetro, registradas y posteriormente reportadas mediante el manejo y análisis de datos, una vez que su análisis de laboratorio fue terminado tal y como lo indica el ciclo de monitoreo para la valoración de la calidad del agua (ECE, 1996) en un amplio periodo de tiempo. Algunos dispositivos mencionados con anterioridad se componen de sensores de elevado costo, muy precisos y muy bien calibrados e inclusive con mayor capacidad para evaluar otros parámetros. Sin embargo, únicamente realizan mediciones de manera independiente de cada parámetro e inclusive no cuentan con la capacidad de realizar estimaciones en caso de fallo o de alguna medición faltante debido a que el dispositivo no pueda tener acceso o se encuentre limitado para realizarla. Tampoco tienen la capacidad de relacionar los parámetros medidos al realizar estimaciones respecto la calidad del agua al instante.

El presente trabajo realiza estimaciones del wQI_{NSF} únicamente relacionando tres parámetros medidos, como lo sugiere la NSF, en un corto periodo de tiempo con la intención de facilitar a los operadores de muestreo y a los expertos el análisis por separado de cada uno de los parámetros, automatizando el proceso de muestreo. El sistema también permite analizar por separado los parámetros de oxígeno disuelto, turbiedad y temperatura e inclusive, se utilizan modelos de estimación por separado para poder realizar un análisis más rápido que los estudios convencionales automatizando la caracterización del comportamiento de los parámetros involucrados en los cuerpos de agua de gran tamaño.

Debido a lo complejo que es llevar a cabo un estudio de campo, no siempre se pueden realizar las mediciones de todos los sitios de muestreo. Debido a esto se crearon modelos matemáticos de estimación de parámetros considerando el caso de que el sistema no fuera capaz de acceder a una zona o un sensor presentara algún fallo. De esta forma, es posible conocer el comportamiento de un parámetro en específico e inclusive de la calidad del agua a cierta profundidad sin medición mediante el seguimiento de su ecuación característica definida.

Este sistema se propone como una herramienta tecnológica de apoyo, manteniendo la reducción de costos al sacrificar la precisión de los sensores ya que se tratan de sensores de uso comercial. Sin embargo, el sistema permite la integración de sensores de uso industrial y de más sensores para la medición del pH, sólidos totales, entre otros, representando una mayor inversión ya que el costo de producción se elevaría, aunque no se descarta dicha integración como trabajo a futuro

5.2.2 Modelo difuso

El análisis del ecosistema acuático depende de la profundidad y los valores obtenidos de cada parámetro, en cada uno de los puntos geográficos. Con la ayuda del modelo difuso, se obtiene un Índice Biótico Lacustre que permite la clasificación de cada punto en zonas; Zona Lacustre Abiótica (ALZ), Zona Lacustre Biótica Baja (LBLZ), Zona Lacustre Biótica Media (MBLZ) y Zona Lacustre Biótica Alta (ZLBA). Esta clasificación evalúa si la zona cuenta con las condiciones ideales para sostener la vida de las especies endémicas que habitan como en el lago Zirahuén.

Además, el índice de calidad del agua proporcionado por la Fundación Nacional de Saneamiento wQI_{NSF} es el indicador más utilizado que estandariza un método para comparar la calidad del agua de las masas de agua internacionales, demostrando ser eficiente para la evaluación y conservación de estas. Cabe mencionar, que se puede ajustar, aunque no cuenta con los nueve parámetros propuestos; sumando los resultados de los parámetros con sus respectivos pesos y ajustando el índice normalizándolo con el total de parámetros analizados. Por lo tanto, el desempeño del LBI propuesto se valida mediante análisis de regresión entre LBI y con el wQI_{NSF} como Munguía et al. (2007) lo menciona.

De acuerdo con los parámetros involucrados como la profundidad, los niveles de oxígeno disuelto, la temperatura y la turbidez, la Tabla 29 muestra la evaluación IBL obtenida con su respectiva puntuación para cada punto geográfico analizado. Además, se muestra la evaluación de wQI_{NSF} obtenido a partir de los parámetros ya mencionados en los puntos indicados.

Tabla 26. Ocho puntos de medición ubicados en el lago Zirahuén, a diferentes profundidades; puntuado por el IBL según la profundidad, los niveles de oxígeno disuelto, la temperatura y la turbidez como parámetros limnológicos.

Punto Geográfico	Profundidad (m)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)	Presión Absoluta (ATM)	DO Saturación (%)	wQI_{NSF}	Dpalabra descriptiva	Puntaje IBL	Clase
P0 Latitud 19.4422758 Longitud -101.7493304	0	11.71	21.25	34.68	1.00	131.6	77	Good	3.5	LBLZ
	4	10.99	20.56	36.15	1.39	87.4	81	Good	7.21	MBLZ
	5	10.19	20.5	36.15	1.49	75.6	76	Good	8.9	HBLZ
	6	9.70	20.5	36.15	1.58	67.5	71	Good	9	HBLZ
	8	9.58	20.44	36.88	1.78	59.2	63	Media	9.05	HBLZ
	10	8.95	20.06	36.88	1.92	50.7	58	Media	9.05	HBLZ
P1 Latitud 19.4404291 Longitud	0	10.35	20.94	39.07	1.00	115.6	79	Good	3.5	LBLZ
	2	9.98	20.87	39.07	1.20	93.0	81	Good	3.5	LBLZ
	4	9.85	20.69	39.07	1.39	78.5	76	Good	7.21	MBLZ
	5	9.45	20.56	39.07	1.49	70.1	71	Good	8.95	HBLZ

-101.7526956	6	9.36	20.56	39.07	1.58	65.2	66	Media	9	HBLZ
	8	8.87	20.37	38.34	1.78	54.8	59	Media	9.05	HBLZ
	10	8.42	19.69	38.34	1.97	46.2	57	Media	8.5	HBLZ
	13	6.24	18.56	38.34	2.26	29.2	43	Bad	1.05	ALZ
P2	0	9.77	21.06	37.60	1.00	109.4	81	Good	3.5	LBLZ
Latitud	5	9.60	20.62	38.34	1.49	71.3	72	Good	8.95	HBLZ
19.4386634	10	8.64	19.75	38.34	1.97	47.5	54	Media	8.6	HBLZ
Longitud	13	6.60	18.69	38.34	2.26	30.9	43	Bad	1.05	ALZ
-101.7541212										
P3	0	10.86	21.44	39.80	1.00	122.5	78	Good	3.5	LBLZ
Latitud	2	10.69	21.12	39.07	1.20	100.1	84	Good	3.5	LBLZ
19.427665	4	10.52	20.87	40.54	1.39	84.1	79	Good	7.21	HBLZ
Longitud	5	10.33	20.75	39.80	1.49	77.0	76	Good	8.95	HBLZ
-101.753215	6	10.06	20.69	40.54	1.58	70.2	72	Good	9	HZBL
	8	9.79	20.44	39.80	1.78	60.5	64	Media	9.05	HZBL
	10	8.62	20.31	39.07	1.97	50.4	57	Media	9.05	HZBL
P4	0	9.47	21.25	39.80	1.00	106.4	81	Good	3.5	LBLZ
	2	9.44	20.94	39.80	1.20	88.0	78	Good	4.5	LBLZ
Latitud	4	9.38	20.69	39.80	1.39	74.7	72	Good	7.21	MBLZ
19.428859	5	9.26	20.62	39.80	1.49	68.8	69	Media	8.95	HBLZ
Longitud	6	9.21	20.56	40.54	1.58	64.1	64	Media	9	HBLZ
-101.751466	8	9.30	20.44	40.54	1.78	57.5	59	Media	9.05	HBLZ
	10	8.74	20.31	39.80	1.97	48.5	54	Media	9.05	HBLZ
	13	5.64	18.25	39.80	2.26	26.2	41	Bad	0.94	ALZ
P5	0	9.56	21.25	41.27	1.00	107.4	80	Good	3.5	LBLZ
	2	9.50	20.87	40.54	1.20	88.5	79	Good	3.5	LBLZ
Latitud	4	10.02	20.56	40.54	1.39	79.6	76	Good	7.21	HBLZ
19.43173	5	10.54	20.5	41.27	1.49	78.1	74	Good	8.95	HBLZ
Longitud	6	9.59	20.37	41.27	1.58	66.5	67	Media	9	HBLZ
-101.749156	8	9.45	20.31	41.27	1.78	58.3	60	Media	9.05	HBLZ
	10	9.86	20.25	41.27	1.97	54.7	57	Media	9.05	HBLZ
	13	6.82	18.62	39.80	2.26	31.9	43	Bad	1.05	ALZ
P6	0	9.33	21.5	40.54	1.00	105.4	81	Good	3.5	MBLZ
Latitud	5	10.66	20.69	42.00	1.49	79.3	75	Good	8.95	HBLZ
19.437235	10	8.32	20.25	42.74	1.97	46.2	51	Media	9.05	HBLZ
Longitud	13	6.95	18.5	41.27	2.26	32.4	43	Bad	1.05	ALZ
-101.746635										
P7	0	10.58	22	36.88	1.00	120.6	76	Good	3.5	LBLZ
Latitud	5	10.64	20.94	38.34	1.49	79.6	74	Good	8.95	HBLZ

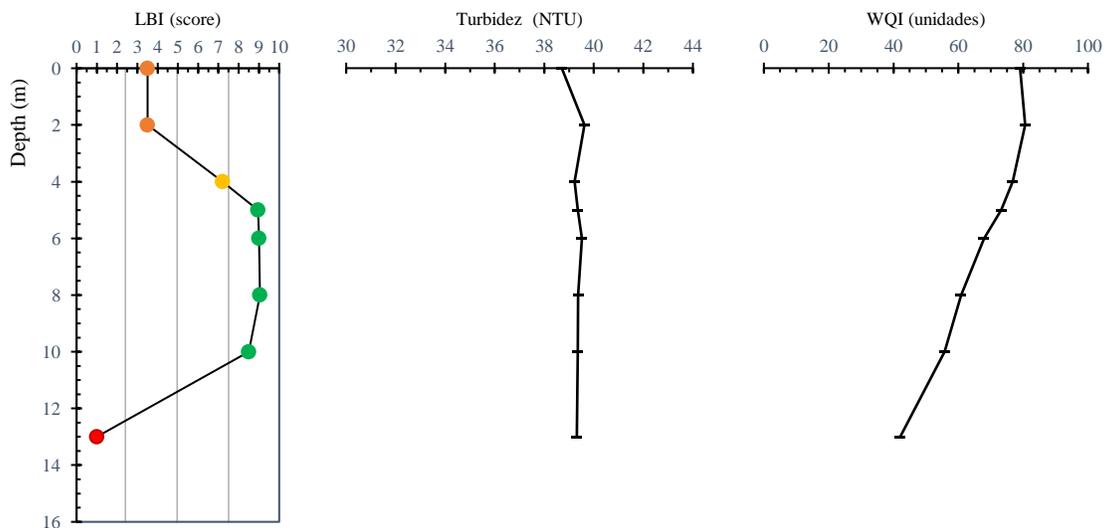
19.44543	10	10.51	20.06	38.34	1.97	58.1	59	Media	9.05	HBLZ
Longitud -101.744907	13	5.02	18.37	38.34	2.26	23.4	39	Bad	1.05	ALZ

Para comprender el comportamiento general del objeto de estudio, se aprecia en la Tabla 30 el promedio de las mediciones y evaluaciones de todos los puntos analizados en diferentes puntos, donde se puede apreciar la desviación estándar obtenida por cada muestra de profundidad de los parámetros involucrados, así como las evaluaciones generales el LBI_{SCORE} y wQI_{NSF} .

Tabla 27. Comportamiento de los niveles de oxígeno disuelto, temperatura, turbidez, calidad del agua y LBI obtenidos a partir del promedio de las mediciones muestreadas a diferentes profundidades en el Lago Zirahuén con su respectiva desviación estándar.

Profundidad (m)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	wQI_{NSF} (unidades)	LBI_{SCORE} (puntos)
0	10.2 ± 0.772	21.34 ± 0.303	38.70 ± 2.039	79 ± 1.853	3.5
2	9.9 ± 0.501	20.95 ± 0.102	39.62 ± 0.608	81 ± 2.118	3.5
4	10.2 ± 0.555	20.67 ± 0.114	39.22 ± 1.630	77 ± 3.070	7.21
5	10.1 ± 0.529	20.65 ± 0.137	39.35 ± 1.715	73 ± 2.477	8.95
6	9.6 ± 0.293	20.54 ± 0.104	39.51 ± 1.829	68 ± 2.844	9
8	9.4 ± 0.309	20.40 ± 0.053	39.37 ± 1.577	61 ± 2.053	9.05
10	9.0 ± 0.721	20.09 ± 0.231	39.35 ± 1.754	56 ± 2.546	8.5
13	6.2 ± 0.685	18.50 ± 0.149	39.32 ± 1.091	42 ± 1.479	0.995 ± 0.055

Fig. 29. muestra el comportamiento de los niveles de oxígeno disuelto, la temperatura, la turbidez, LBI_{SCORE} y wQI_{NSF} en relación con la profundidad del lago.



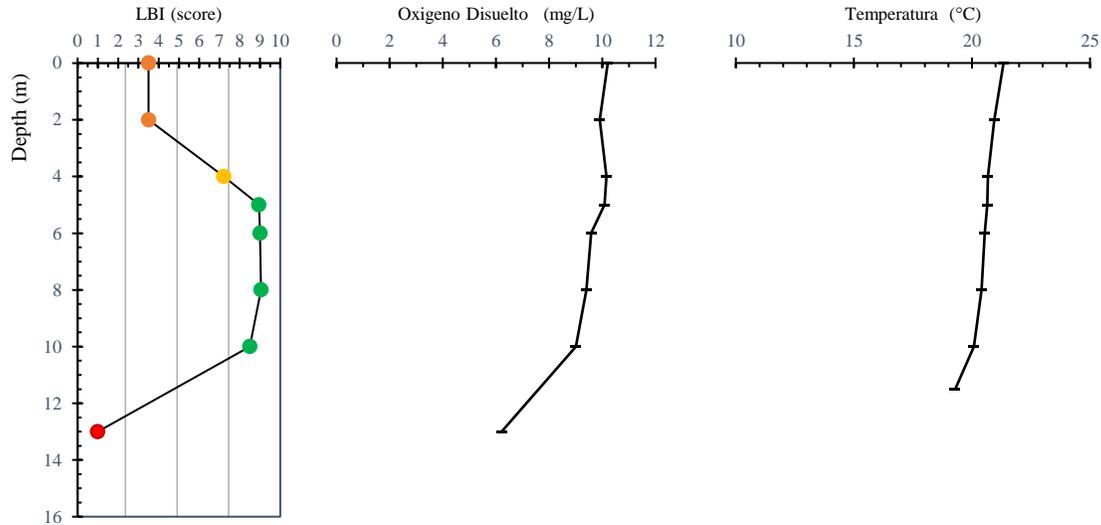


Fig. 29. Gráficos de comportamiento de los parámetros involucrados en el diseño del índice propuesto, puntuación obtenida por el LBI en relación con los valores mostrados, así como la evaluación de la calidad del agua en el lago Zirahuén. Lo anterior con respecto a la profundidad analizada.

De acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 30 y los gráficos observados en Fig.38, de 0 a 10 m la temperatura es ideal para la proliferación de las especies mencionadas, por lo que la temperatura en este intervalo no es un factor determinante en la masa de agua. De 0 a 3 metros, según la evaluación del LBI, resultó ser una zona biótica lacustre baja, ya que tiene una puntuación de 3,5, lo que probablemente se deba a la sobresaturación de oxígeno disuelto. Debido a la puntuación presentada, no se considera un buen lugar para encontrar biota ya que las especies pueden sufrir enfermedades debido a la sobresaturación de los niveles de OD, aunque no se descarta la presencia de pocos ejemplares a esa profundidad. De 3 a 4 metros la puntuación obtenida por el LBI fue de 7,21, por lo que se considera una zona lacustre biótica media, presentando una medida de 10 mg/L de oxígeno disuelto, por lo que el porcentaje de saturación disminuye con respecto a la profundidad indicando que es posible encontrar un mayor número de biotas, es decir, algunos ejemplares. De los 5 a los 11 m de profundidad la consideramos como una zona lacustre biótica alta ya que tiene una puntuación de 8,5 a 9,05 según el LBI en este rango de profundidad encontraremos una alta densidad poblacional con respecto a los otros rangos de profundidad mencionados anteriormente y en general en toda la masa de agua. A los 11 metros de profundidad no se obtuvieron mediciones, pero por el comportamiento mostrado en la gráfica de la Fig. 6, se considera una zona lacustre biótica media ya que tiene una puntuación de 6,23 según el LBI considerando niveles de oxígeno disuelto de 8 mg/L; por el comportamiento de los niveles de oxígeno disuelto podemos estimar que a partir de los 11 m de profundidad la saturación de oxígeno disuelto va disminuyendo, así como la temperatura y por tanto la densidad de población también. A los 12 metros de profundidad no hay registro de mediciones, sin embargo, de acuerdo al comportamiento de los parámetros y al LBI en Fig. 38, se considera una zona biótica lacustre baja, ya que los niveles de oxígeno disuelto son de 7 mg/L con un puntaje de 2.75 de acuerdo al LBI, por lo que son pocas las especies que se pueden encontrar a esta profundidad, cabe mencionar que la turbiedad en la columna de agua muestra un comportamiento constante, por lo que no se

consideraría un factor determinante para este cuerpo de agua. Finalmente, cuando se realiza la evaluación del IBL a 13 metros de profundidad, la puntuación obtenida en los diferentes puntos geográficos fue de 0,995 +/- 0.055 indicando que se trata de una zona lacustre baja, ya que el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es bajo y la temperatura también es baja en comparación con otras profundidades, por esta razón no es posible encontrar especies a esta profundidad debido a la insuficiencia de DO que puede causar la muerte de las especies acuáticas en adultos y juveniles, la reducción en el crecimiento y / o huevos y larvas mal logrados, A medida que la profundidad aumenta, la división de la zona eufótica se hace más evidente y al pasar esta zona, el alimento de las especies ya es escaso, pues la penetración de los rayos solares alcanza sólo el 1% y al no haber luz solar, el proceso de fotosíntesis es nulo, por lo tanto no hay proliferación de fitoplancton y flora acuática.

a. Validación IBL

Como Munguía et. al. (2007) mencionado, si no existen otros índices ya probados para la región y tipo de sistemas acuáticos en estudio, como el Lago Zirahuén, la opción es buscar relaciones entre índices que midan la calidad ambiental a través del análisis de regresión. Realizando el análisis de regresión del índice de calidad del agua wQI_{NSF} versus LBI_{SCORE} , se calculó una regresión polinómica de segundo grado que relaciona el comportamiento del índice con respecto a la calidad del ecosistema, Fig. 30. Se presenta.

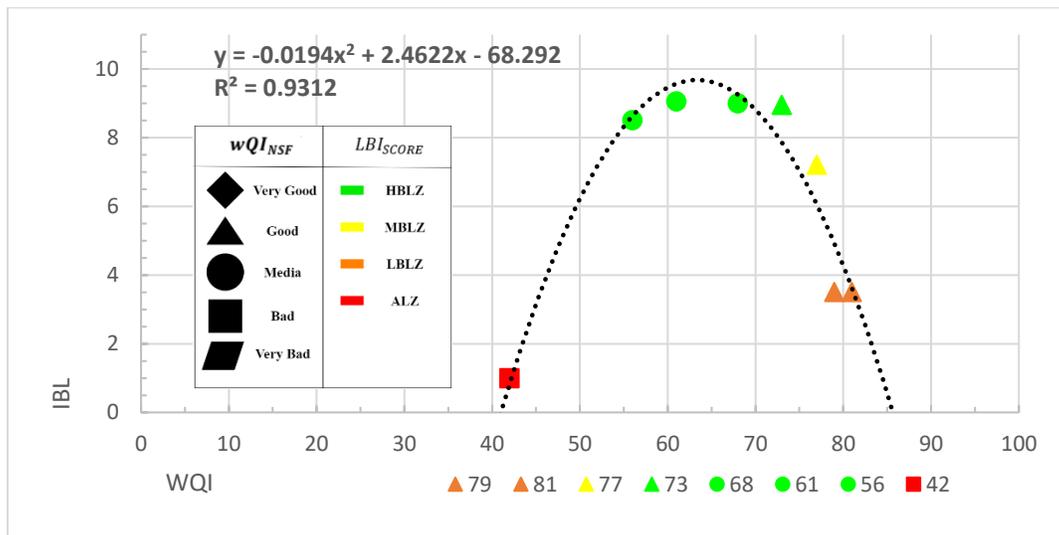


Fig. 30. Análisis de regresión gráfica que relaciona wQI_{NSF} frente a LBI_{SCORE}

La figura revela una regresión polinómica de 2 grado descrita por la Ecuación 60:

$$LBI_{SCORE} = -0.0194(wQI_{NSF})^2 + 2.4622(wQI_{NSF}) - 68.292 \quad (60)$$

La ecuación indica que es posible modelar el comportamiento del LBI_{SCORE} cuando se conoce la calidad del agua del lago Zirahuen. Se obtiene el coeficiente de determinación $R^2 = 0.9312$, puede representar valores entre 0 y 1, señalando qué proporción de la variabilidad total del LBI_{SCORE} puede ser explicada por el wQI_{NSF} , por lo que se considera una medida de la capacidad predictiva del modelo propuesto por la Ecuación 41, es decir, cuanto más se acerque el valor a 1, más preciso es el modelo, por lo que el modelo descrito por la Ecuación 60 puede considerarse preciso para describir el comportamiento de LBI_{SCORE} con respecto a wQI_{NSF} .

Cabe mencionar que Scardi et al. (2008) construyeron un sistema experto basado en una implementación de redes neuronales en relación con un conjunto de descriptores abióticos, tales como la elevación del cuerpo de agua, la profundidad, la saturación de DO, la temperatura, por mencionar algunos a través de dichos descriptores, proponen estimar el estado ecológico para cualquier cuerpo de agua en su respectivo caso de estudio. En un ejemplo mencionado, donde los parámetros indicados como descriptores abióticos obtuvieron valores como profundidad = 1,2 m, temperatura = 16,49, turbidez = 8 NTU, así como porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, por mencionar algunos, se obtuvo un porcentaje de pertenencia del 73,3 % a un estado evaluado como bueno en la zona analizada con un EQR de 0,807; El EQR es exigido por la Directiva Marco Europea del Agua como base para la clasificación del estado ecológico. Considerando el ejemplo proporcionado, se evalúa el LBI_{SCORE} , sin embargo, los niveles de oxígeno disuelto deben ser calculados considerando la elevación, la temperatura y el porcentaje de saturación de OD para realizar la conversión como indican Forstner y Gnaiger (1983). Obteniendo los valores mostrados en la Tabla 31.

Tabla 28. Descriptores abióticos y evaluación de Scardi et. al, y LBI_{SCORE}

	Descriptor abiótico				Evaluaciones	
	Profundidad (m)	DO (mg/L)	Temperatura (°C)	Turbiedad (NTU)	Scardi et. al.	LBI_{SCORE}
Valores	1.2	9.31	16.49	8	73.3% good con EQR= 0.807	3.5 - LBLZ

Como LBI_{SCORE} muestran una puntuación de 3,5 al despejar la ecuación 60:

$$wQI_{NSF1} = \frac{-2.4622 - \sqrt{-0.0776 (LBI_{SCORE}) + 0.76296964}}{0.0388} \quad (61)$$

$$wQI_{NSF2} = \frac{-2.4622 + \sqrt{-0.0776 (LBI_{SCORE}) + 0.76296964}}{0.0388} \quad (62)$$

Reemplazando el LBI_{SCORE} en la Ecuación 61, significa que en wQI_{NSF1} , el resultado de la evaluación para el índice de calidad del agua fue de 81,52 unidades. asociando la palabra del índice como "Bueno" al igual que la evaluación emitida por Scardi et.al. relacionada con el estado ecológico del punto analizado. Es posible

comparar ambos índices a través del LBI_{SCORE} . Sin embargo, debería ser una evaluación "Mala" con respecto a la calidad del agua si se evalúa la Ecuación 60 ya que el resultado estimado es de 45,39 unidades. Ambos resultados son validados con respecto a la Fig. 38, por lo que el comportamiento es adecuado e indistinto a la evaluación de la calidad del agua, es posible identificar el área como zona biótica lacustre baja debido a su puntuación. El actual índice propuesto no necesita de múltiples parámetros abióticos para emitir una evaluación de la zona, ya que mientras más parámetros se involucren para evaluar más complejo será el sistema de evaluación. Es importante mencionar que, en el campo de aplicación, al realizar las mediciones de múltiples parámetros a evaluar se convierte en una tarea complicada y de riesgos tanto para el material a realizar las mediciones como para el personal que las realiza, por lo tanto, emitir un índice/modelo que permita evaluar la densidad de especies cualitativamente emitiendo un puntaje con el mínimo de parámetros involucrados es importante.

En consecuencia, es necesario validar el índice propuesto; así, es posible caracterizar la distribución vertical de las especies a lo largo de la profundidad del cuerpo de agua, considerando el trabajo propuesto por Juza, T. et. al. (2012) donde el lago Werbellier tiene características similares a las del lago Zirahuen, ya que su zona eufótica se encuentra aproximadamente a 11 m. de profundidad, además, es un lago mesotrófico, mientras que Zirahuen es considerado un lago de tipo oligo-mesotrófico, por la transición que está sufriendo de un tipo oligotrófico a mesotrófico (De Paz, Y., 2006). El comportamiento de la temperatura y el oxígeno disuelto son similares e incluso en rangos con respecto al lago Zirahuen. Juza, T. et. al. propone obtener una estimación de especies presentes en el lago a partir de una sonda acústica, menciona que la captura de las especies en trampas a diferentes profundidades se realiza durante el mes de septiembre del año 2009 y demuestra que su propuesta de estimación acústica es muy similar a la abundancia en especies cacheadas por trampas. Del análisis del trabajo antes mencionado, se obtuvieron los datos que se muestran en la Tabla 32.

Tabla 29. Comparación entre la evaluación de LBI y Juza T. et. al. Evaluación según la profundidad, los niveles de OD y la temperatura.

Parametros			Evaluación IBL		Evaluación por Juza T. et. al.		
Profundidad (meters)	Niveles DO (mg/L)	Temperatura (°C)	LBI_{SCORE}	Clase	Abundancia de especies (ind/ha)	% Abundancia	Palabra descriptiva
0-3	7.5	17.5	3.5	LBLZ	410	1.38	few
3-6	7.2	17.2	3.5	LBLZ	390	1.31	few
6-9	7	17	5.14	MBLZ	770	2.59	some
9-13	6.5	16	5.14	MBLZ	1200	4.04	enough
13-16	5	9	1.05	ALZ	200	0.67	null

Considerando el porcentaje de abundancia relacionado con la profundidad se correlaciona con el LBI_{SCORE} para saber si la puntuación del índice podría modelar la presencia o ausencia de especies en el lago Werbellier, la correlación se puede apreciar en Fig. 31.

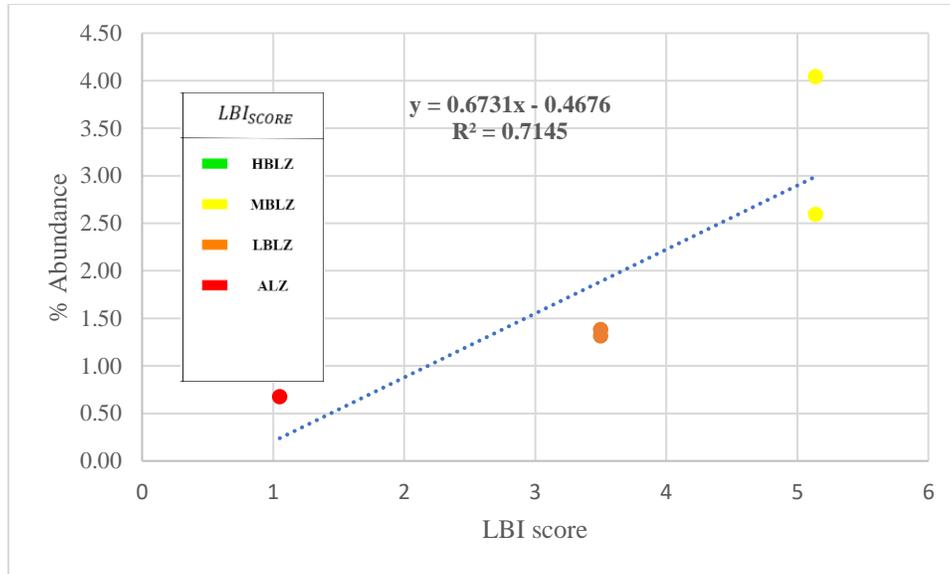


Fig. 31. Correlación lineal entre LBI_{SCORE} y porcentaje de abundancia de especies en el lago Werbellier

Fig. 31. revela la correlación lineal descrita por la ecuación:

$$Abundance_{\%} = 0.6731(LBI_{SCORE}) - 0.4676 \quad (63)$$

Mediante la ecuación 63, es posible correlacionar la abundancia de especies descrita por Scardi et. al. y el LBI_{SCORE} propuesto para describir cualitativamente en qué zona analizada relacionada con la distribución vertical del lago, es posible encontrar especies nulas, pocas, algunas o abundantes en función de la puntuación obtenida por el LBI_{SCORE} . Calculando el coeficiente de determinación de R^2 se obtiene un valor de 0,7145, aunque su ajuste no es demasiado preciso, podría considerarse bueno ya que la dispersión de los puntos correlacionados no se aleja de la línea de tendencia que describe la correlación lineal. Por tanto, la ecuación describe el porcentaje de abundancia de especies evaluado para el lago Werbellier. El compromiso entre simplicidad y precisión (o generalidad), que se aplica a cualquier modelo, o concepto, o método, es la razón por la que el enfoque multimétrico, siendo intrínsecamente simple, no puede ser preciso a gran escala espacial como las evaluaciones de lagos (Scardi et. al., 2008).

Como trabajo futuro se plantea realizar un estudio de recuento de especies en el lago Zirahuén para evaluar el IBL ya que actualmente no existe ningún estudio que caracterice la biota respecto a la profundidad en el lago. Por lo tanto, no es posible encontrar una correlación entre la densidad de especies y el objeto de estudio. Sin embargo, derivado del análisis previo del IBL realizado en el lago Werbellier, y aunque el LBI da una puntuación cuantitativa, también se obtiene una clasificación cualitativa, por lo que es posible identificar la zona donde se encontrará mayor abundancia de especies en un determinado punto analizado del lago Zirahuén.

Así, el comportamiento del lago Zirahuén a lo largo del tiempo se muestra en la Tabla 33. En esta tabla se pueden apreciar los valores de profundidad, niveles de DO, temperatura y turbidez evaluados en 3 puntos geográficos similares en diferentes fechas. También se describe la puntuación obtenida por el LBI_{SCORE} , así

como la clasificación de la zona evaluada. Para realizar la evaluación del **LBI_{SCORE}**, se completaron algunos datos. Los valores estimados completados están subrayados dentro de la tabla, ya que los autores no indicaron la profundidad de los puntos de medición, así como la turbidez, sin embargo, si los puntos geográficos de comparación coinciden con la evaluación de los puntos P7, P2 y P6 según la profundidad, la profundidad se ajusta con respecto a la profundidad analizada en ese punto. En cuanto a los valores de turbiedad, se consideró el mínimo de NTUs exigido en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SALUD, 2000), cuando se trata de agua no apta para consumo humano como es la turbiedad del lago Zirahuen (Gómez Tagle, 2016).

Tabla 30. Evaluación de **LBI_{SCORE}** a diferentes profundidades a través de los años con medidas expuestas por diferentes autores.

Punto de Referencia		P7				P2				P6					
Fecha		04-may-18	11-may-14	jul-98	May-02	04-may-18	11-may-14	01-jul-05	May-02	04-may-18	May-02	11-may-14	Mar-09	2009	jul-98
Profundidad	<i>m</i>	0	<u>0</u>	0	0	5	<u>5</u>	5	<u>5</u>	13	15	22	44	42	28
DO	<i>Mg/l</i>	10.58	4.81	7.5	9.8	9.6	4.82	7.20	9.5	6.95	4.1	6.11	2	1.6	4.39
Temperatura	<i>°C</i>	22	22	22.5	22.1	20.6	21.3	20	21.9	18.5	19.5	17.7	21.5	17	16.1
Turbidez	<i>NTU</i>	36.88	2.4	<u>5</u>	<u>5</u>	38.3	2.6	1	<u>5</u>	41.27	<u>5</u>	3.1	<u>5</u>	<u>5</u>	1.5
LBI_{SCORE}	<i>point</i>	3.5	3.5	3.5	3.5	8.95	3.5	8.95	8.95	1.05	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
Clase		<i>LBLZ</i>	<i>LBLZ</i>	<i>LBLZ</i>	<i>LBLZ</i>	<i>HBLZ</i>	<i>LBLZ</i>	<i>HBLZ</i>	<i>HBLZ</i>	<i>ALZ</i>	<i>ALZ</i>	<i>ALZ</i>	<i>ALZ</i>	<i>ALZ</i>	<i>ALZ</i>
Referencia		Table 29	Mendoza et al., 2015	Bernal-Brooks et al., 2002	Martínez y Tavera, 2005	Table 29	Mendoza et al., 2015	Rendon et al., 2009	Martínez y Tavera, 2005	Table 29	Martínez y Tavera, 2005	Mendoza, et al., 2015	Vergara et al., s.f	Bernal-Brooks et al., 2002	Rendon et al., 2009

La valoración mostrada del **LBI_{SCORE}** en el Lago Zirahuen evaluando las características del mismo lago en diferentes años y diferentes autores demuestran un comportamiento similar en cada punto analizado a diferentes profundidades, es decir, cuando se evaluó el punto P7 desde el año 2002 hasta el 2018 se considera como una Zona Biótica Lacustre Baja ya que el puntaje promedio del **LBI_{SCORE}** fue de 3,5, reflejando el mismo comportamiento con las mediciones actuales obtenidas. Para el punto P2, el área evaluada es considerada como Zona Biótica Lacustre Alta, en al menos 3 de los puntos analizados con un puntaje de 8,95; el muestreo

considerado por Mendoza et al. en el punto de análisis muestra una evaluación como Zona Biótica Lacustre Baja debido al puntaje obtenido que fue de 3,5, ya que probablemente la estimación de la profundidad no fue adecuada. Finalmente, al evaluar las mediciones del punto P6, en los años de 1998 a 2018, a profundidades iguales y mayores a 13 metros, todas las evaluaciones revelaron un puntaje de 0.9 en promedio asociándolo a una Zona Lacustre Abiótica. De la Tabla 33 mostrada con los resultados obtenidos es posible identificar que el lago a través del tiempo ha mostrado el mismo comportamiento con respecto a la evaluación del *LBI_{SCORE}*.

5.2.3 Modelo de reconocimiento de patrones

Se realizaron análisis sobre el modelo de clasificación, el cual nos permitirá conocer valores relacionados con la profundidad mínima y máxima analizada, también temperatura mínima y máxima, sin embargo, los valores más importantes que arroja el clasificador es encontrar tanto el límite superior como inferior del *metalimnion*, recordando que dicha capa es la capa de transición entre el *epilimnion* y el *hipolimnion*.

Los datos arrojados por el clasificador, únicamente muestran el límite superior de la capa *Metalimnio*, es decir que el comportamiento de la temperatura del lago de Zirahuén muestra a un lago estratificado térmicamente, sin embargo no fue posible obtener el límite inferior del *metalimnio* ya que la sonda de medición con la que se realizó el muestreo únicamente alcanzaba los 13 metros, sin embargo, se estimaron los valores de la temperatura en profundidades mayores mediante la siguiente ecuación al despejar x en función de y, es decir, conocer la temperatura en función de la profundidad.

$$Profundidad = -0.3142x^3 + 17.053x^2 - 309.68x + 1895.3 \quad (64)$$

Derivado del modelo de clasificación se procedió a realizar la evaluación con los datos obtenidos de la temperatura con respecto a la profundidad analizada sobre el eje vertical de la columna de agua del Lago de Zirahuén. Los datos estimados mediante la Ecuación 64 se aprecian en la gráfica de Fig. 32.

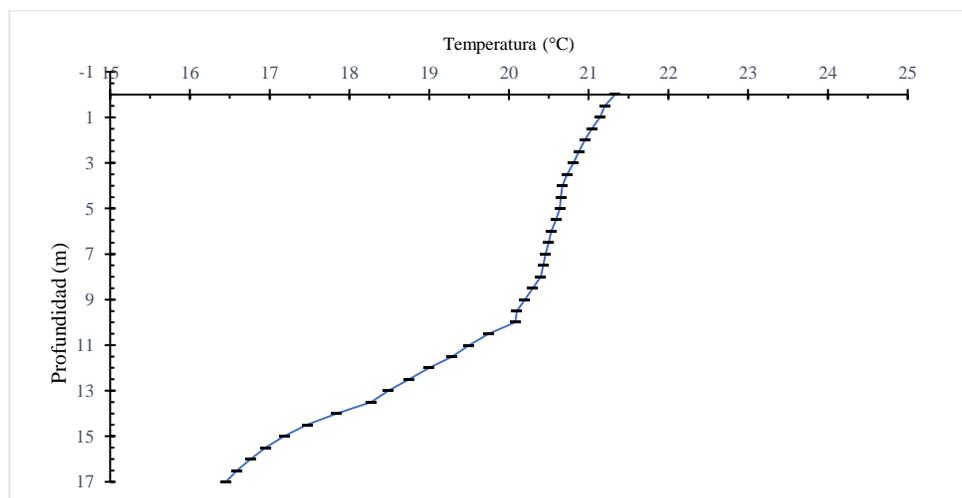


Fig. 32. Visualización grafica del comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad del lago de

Zirahuén

Una vez que se ingresan los valores de la temperatura con respecto a la profundidad, el clasificador muestra los resultados apreciados en la Figura 33.

```
***** CLASSIFICATION *****
[0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0]
----- ACCURACY -----
0.7083333333333334
----- DEPTH & TEMPERATURE SAMPLE -----
[18, 17, 19, 18]
[]
----- P: 0
10.25
19.819999999999997
----- P: 1
9.75
19.988333333333333
----- P: 2
10.75
19.62
----- P: 3
10.25
19.819999999999997
--- LIMITE SUPERIOR METALIMNION ---
DEPTH: 10.25
TEMPERATURE: 19.812083333333333
--- MAX & MIN TEMP ---
21.33
16.45
--- MIN & MAX DEPTH ---
0
17
```

Fig. 33. Terminal del programa en Python desarrollado para la obtención de los resultados, es decir la clasificación y delimitación de los límites de la capa de *metalimnion* en el lago de Zirahuén.

La Tabla 34, muestra el comportamiento de los patrones encontrados en el comportamiento de la temperatura en el lago de Zirahuén, se puede confirmar que en las mediciones 17, 18 y 19 se localiza la Clase, misma que nos indica que si se encuentra la clase continua se trata de que se ha hallado el límite superior del *metalimnion*, indicando que el *epilimnion* se localiza desde los 0 metros hasta los 10.25 m con una temperatura de 19.81 °C. Posterior a ello, se localiza el *metalimnion*, sin embargo no fue posible obtener mayores mediciones, por lo que no fue posible encontrar el límite inferior del *metalimnion* y ende, tampoco hallar el inicio del hipolimnion.

Tabla 31. Listado del número de puntos analizados, profundidad descrita, temperatura y la clasificación asignada dependiente de la profundidad y la temperatura del lago de Zirahuén

Medición	\bar{z}	\bar{t}	S	Medición	\bar{z}	\bar{t}	S
1	0.5	21.2	-	16	8	20.4	0
2	1	21.14	0	17	8.5	20.3	1
3	1.5	21.04	0	18	9	20.2	1
4	2	20.95	0	19	9.5	20.1	1
5	2.5	20.88	0	20	10	20.08	0
6	3	20.81	0	21	10.5	19.75	0
7	3.5	20.73	0	22	11	19.5	0
8	4	20.67	0	23	11.5	19.29	0
9	4.5	20.65	0	24	12	19	0
10	5	20.64	0	25	12.5	18.75	0
11	5.5	20.59	0	26	13	18.49	
12	6	20.53	0	27	13.5	18.27	
13	6.5	20.5	0	28	14	17.84	
14	7	20.46	0	29	14.5	17.47	
15	7.5	20.43	0	30	15	17.18	

Tomando en consideración la Tabla 15 de interpretación de resultados se obtiene:

	<i>Epilimnion</i>		<i>Metalimnion</i>		<i>Hipolimnion</i>	
	Profundidad m.	Temperatura °C	Profundidad m.	Temperatura °C	Profundidad m.	Temperatura °C
Min.	$z_1 = 0.5$	$t_1 = 21.2$	$z^1 = 10.25$	$t^1 = 19.81$	–	–
Máx.	$z^1 = 10.25$	$t^1 = 19.81$	–	–	–	–

Gráficamente, en Fig. 34, se puede apreciar el resultado obtenido por el clasificador, donde claramente se aprecia la división de la capa del *metalimnion*.

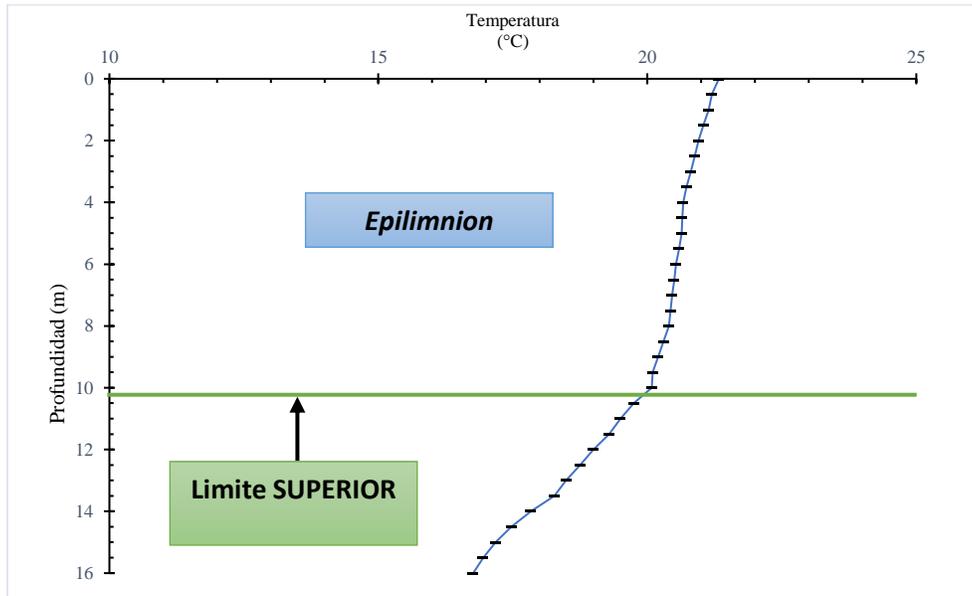


Fig. 34. División de las capas de estratificación del lago de Zirahuén según el modelo de clasificación propuesto.

a. Validación modelo de clasificación

Cabe mencionar que el modelo de clasificación no solo funciona para conocer el estado del régimen térmico del lago de Zirahuén, ya que permite el análisis y la división por capas térmicas de cualquier otro lago. En el ejemplo contiguo, se mostrarán los valores de temperatura obtenidos del Lago San Roque donde gráficamente se puede apreciar el descenso de la temperatura.

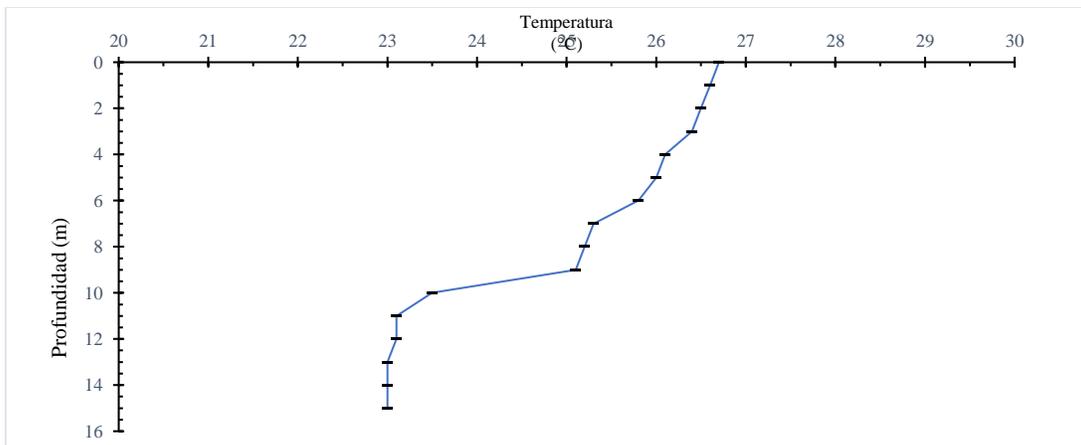


Fig. 35. Visualización grafica del comportamiento de la temperatura con respecto a la profundidad del lago del Embalse San Roque.

Los datos de la Figura 35, fueron ingresados al clasificador, el cual mostro los resultados descritos en la terminal de Python en Fig. 36.

```

***** CLASSIFICATION *****
[0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 2 0 1 1 0 0 2 2 0 0 0 0]
-----
ACCURACY -----
0.5416666666666666
-----
DEPTH & TEMPERATURE SAMPLE -----
[16, 15]
[20, 19]
----- P: 0
9.25
24.408333333333333
----- P: 1
8.75
24.75
---LIMITE SUPERIOR METALIMNION---
DEPTH: 9.0
TEMPERATURE: 24.579166666666666
----- P: 0
11.25
23.166666666666668
----- P: 1
10.75
23.383333333333333
---LIMITE INFERIOR METALIMNION---
DEPTH: 11.0
TEMPERATURE: 23.275
--- MAX & MIN TEMP ---
26.7
23
---MIN & MAX DEPTH ---
0
15.5

```

Fig. 36. Terminal del programa en Python desarrollado para la obtención de los resultados, es decir la clasificación y delimitación de los límites de la capa de *metalimnion* del lago del embalse San Roque.

La Tabla 35, muestra el comportamiento de los patrones encontrados en el régimen de la temperatura en el lago del embalse San Roque, se puede confirmar que el vector de clasificación se confundió en una de las zonas ya que a la profundidad de 9 metros con 24.57 °C de temperatura se encuentra localizado el límite superior de la capa del *metalimnion*, mientras que a una profundidad de 11 metros con una temperatura de 23.27 °C, se localizó el límite inferior de la capa del *metalimnion*. Cabe mencionar que el vector de clasificación obtuvo una

confusión, ya que a la profundidad de 6.25m. el clasificador encontró un patrón que indicaría el inicio de la capa del *metalimnio*, sin embargo, al no encontrar otro patrón adyacente con las mismas características, el clasificador descarto el hallazgo. También tuvo otra confusión a una profundidad de 7.75 m. ya que el patrón encontrado lo clasifico como el límite inferior de la capa del *metalimnio*, pero de la misma manera en la que discrimino el patrón erróneo anterior descrito, al no encontrarse de manera adyacente otro patrón similar, la clasificación fue descartada. Sin embargo, se deja a consideración del lector el plantearse la pregunta si el cuerpo de agua presenta distintas capas de estratificación además de las ya conocidas. La Tabla 35 describe las muestras enumeradas a partir de las cuales se consideran las clases encontradas para comenzar a tomar las mediciones de profundidad y temperatura y posteriormente promediarlas como lo sugiere el modelo.

Tabla 32. Listado del número de puntos analizados, profundidad descrita, temperatura y la clasificación asignada dependiente de la profundidad y la temperatura del lago del embalse San Roque.

Mediciones	\bar{z}	\bar{t}	S	Mediciones	\bar{z}	\bar{t}	S
1	0.5	26.65		16	8	25.2	1
2	1	26.6	0	17	8.5	25.15	0
3	1.5	26.55	0	18	9	25.1	0
4	2	26.5	0	19	9.5	24.3	2
5	2.5	26.45	0	20	10	23.5	2
6	3	26.4	0	21	10.5	23.2	0
7	3.5	26.25	0	22	11	23.1	0
8	4	26.1	0	23	11.5	23.1	0
9	4.5	26.05	0	24	12	23.1	0
10	5	26	1	25	12.5	23	0
11	5.5	25.9	0	26	13	23	
12	6	25.8	0	27	13.5	23	
13	6.5	25.55	2	28	14	23	
14	7	25.3	0	29	14.5	23	
15	7.5	25.25	1	30	15	23	

Gráficamente, en la Fig. 46, se puede apreciar el resultado obtenido por el clasificador, donde claramente se aprecian las capas de división del lago del Embalse San Roque debidamente estratificado, también se muestran las clases de confusión mediante líneas punteadas que mostro el vector de clasificación del modelo propuesto.

Es posible comparar el resultado mostrado por el modelo de clasificación en conjunto con el análisis realizado por Degano, M., et. al. (2016); realizando dicha comparación se encuentra que los resultados obtenidos por el clasificador son exactos tal y como se puede apreciar en las Fig. 37-38.

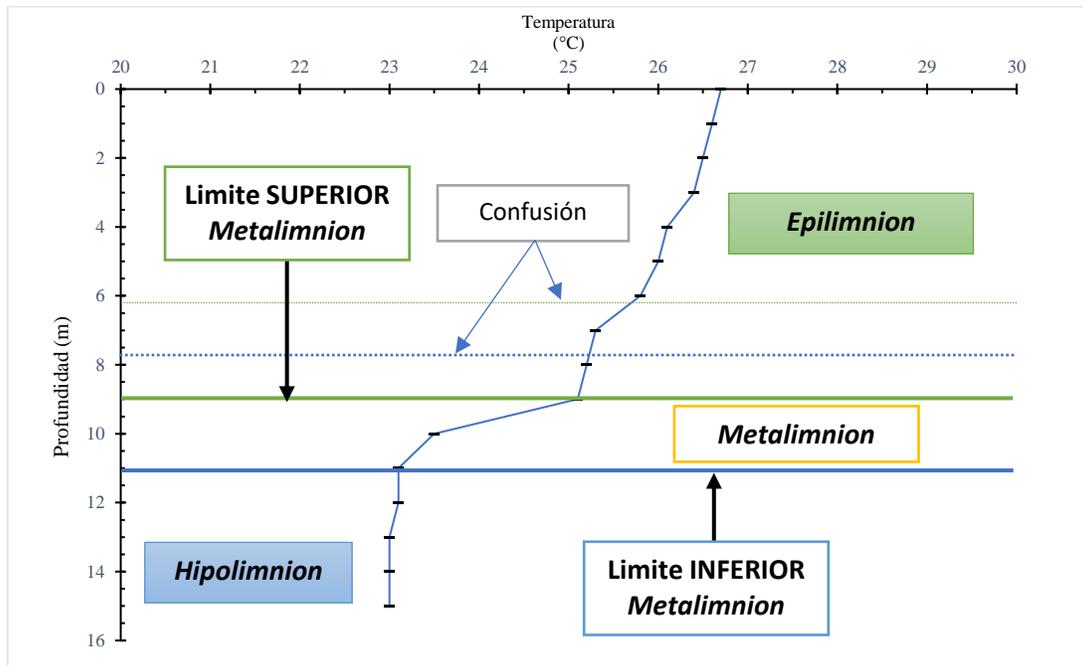


Fig. 37. División de las capas de estratificación del lago de Zirahuén según el modelo de clasificación propuesto.

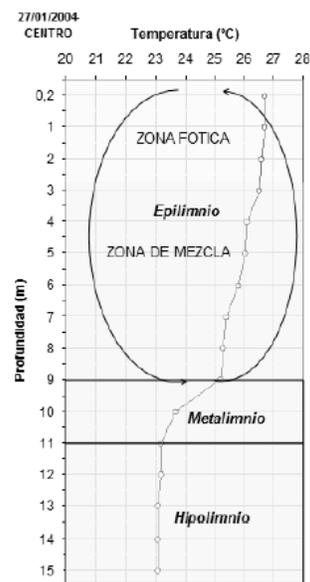


Fig. 38. Zona fótica y zona de mezcla en condiciones típicas de estratificación en el centro del embalse San Roque.

Se concluye que el modelo de clasificación para la identificación de las capas de estratificación en los lagos cumple su objetivo.

CAPÍTULO VI

TRABAJO FUTURO

Como trabajo a futuro se pretende desarrollar un sistema de decisión que permita validar la clasificación del modelo de clasificación del régimen térmico de los lagos, tomando en consideración su geolocalización, el cual permita complementar el Modelo Global de Evaluación Lacustre.

6.1 Sistema de decisión

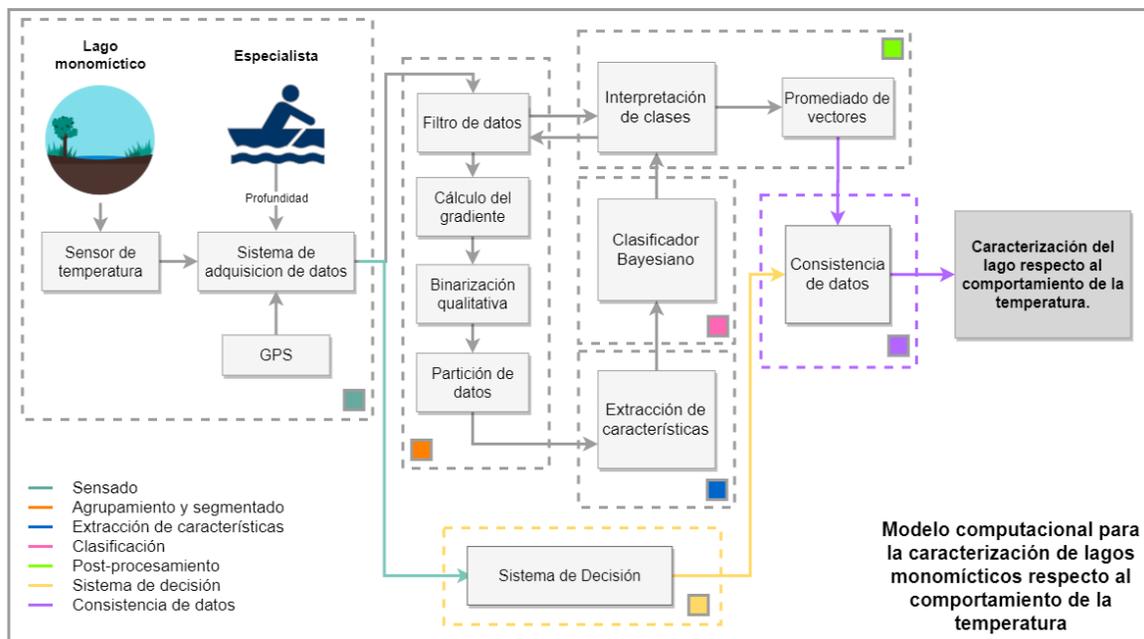


Fig. 39. Modelo de caracterización de un lago de tipo monomictico cálido respecto al comportamiento de su temperatura.

6.1.1 Sistema de decisión

Se tratará de un sistema de inferencia difuso que nos permitirá conocer de acuerdo con la fecha del año, la longitud, la latitud y la altitud saber el tipo del lago que se está caracterizando y las características que debe tener.

6.1.2 Consistencia de Información

Si las características, de acuerdo con el tipo de lago evaluado en el sistema de decisión coincide con la información arrojada por el sistema de reconocimiento de patrones, el módulo de consistencia de la información dictaminara si la caracterización es consistente.

6.2 Modelo Global de Evaluación Lacustre

El modelo global, es un modelo compuesto basado en los sistemas de reconocimiento de patrones e inferencia difusa el cual tiene por objetivo el reconocimiento y caracterización de un lago para facilitar el proceso en la toma de decisiones. La Figura 40. muestra el diagrama de interacción de cada módulo, misma que será detallada en los párrafos contiguos.

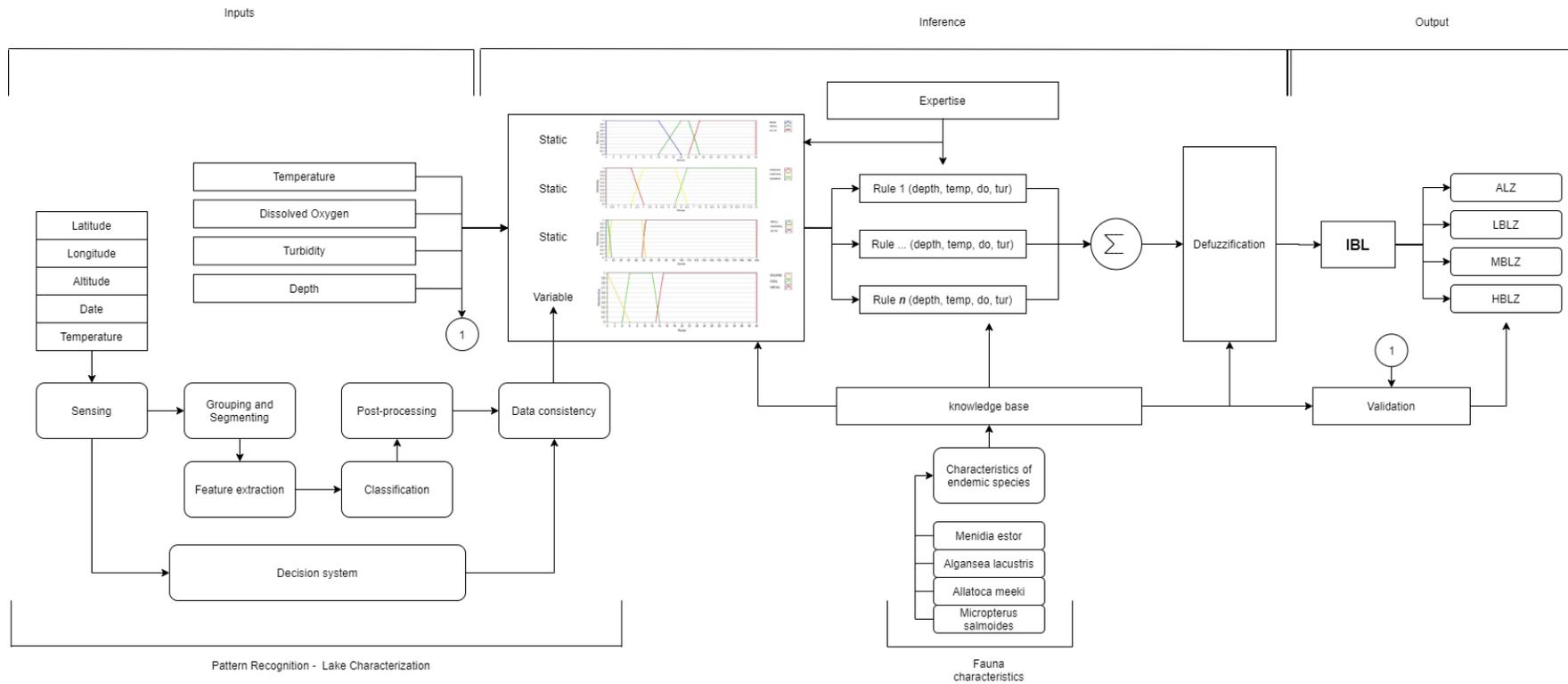


Fig. 40 Diagrama a bloques del modelo global de evaluación y análisis lacustre.

El procedimiento para el funcionamiento del sistema global comienza con la lectura de los valores de la temperatura a lo profundo del lago, es decir, sobre su eje vertical. Una vez culminadas las mediciones se lleva a cabo el reconocimiento de patrones para hallar el comportamiento del lago respecto a su temperatura con el fin de conocer si el lago se encuentra mezclado o estratificado; si el lago se encuentra en su etapa de estratificación se obtienen las capas de estratificación con sus respectivos límites en profundidad y temperatura, en caso contrario, se determina que el lago se encuentra en su etapa de mezcla y por ende el valor de la temperatura será casi constante ante cualquier medición realizada.

No solo la temperatura determina si el lago se encuentra estratificado o no; los valores de geoposicionamiento también determinan el comportamiento del lago. Es por ello, que el módulo sistema de decisión, hace uso de la latitud, longitud, altitud y fecha, para reconocer cualitativamente si nos encontraremos con un lago estratificado o mezclado, si el sistema de decisión coincide con el sistema de reconocimiento de patrones, significa que existe una consistencia en la información, y por lo tanto los datos obtenidos serán las entradas para las funciones de pertenencia de la profundidad en nuestro sistema de inferencia difuso.

Las funciones de pertenencia de los valores de temperatura, los niveles de oxígeno disuelto y turbiedad fueron diseñados con base en las características de las especies endémicas presentes en el cuerpo de agua a estudiar, en el presente caso, fueron promediadas las características generales del lago de Zirahuén.

El sistema de inferencia difuso recibirá como parámetro de entrada mediciones aleatorias de un cuerpo de agua; una vez que los datos de entrada fueron evaluados por sus respectivas funciones de pertenencia; se procede a evaluarlos de acuerdo con las reglas que interfieren de los valores medidos; tanto las reglas de inferencia, como las funciones de pertenencias son aprobadas por un grupo de expertos. Posterior a ello y una vez finalizado el proceso de agregación y defuzzificación, a la salida podremos obtener una evaluación de la zona medida. Si la valoración es aceptada por el módulo de validación, significa que la zona fue validada tanto por un estándar internacional como por el sistema propuesto. Finalmente, y resumiendo el objetivo del sistema global, como productos obtenemos:

- Caracterización del comportamiento de la temperatura en el lago
- Profundidad máxima y profundidad mínima registrada
- Identificación y caracterización del lago a evaluar
- Evaluación biótica de diferentes zonas lacustres
- Evaluación de calidad del agua en diferentes zonas lacustres.

CONCLUSIONES

El trabajo se crea debido a la escasez de herramientas tecnológicas y modelos especializados que permitan la caracterización de los cuerpos de agua continentales, específicamente de los lagos mexicanos. Generalmente se cuenta con la necesidad de realizar mediciones, monitorear constantemente los cuerpos de agua y emitir evaluaciones que les permitan a los especialistas tomar decisiones relacionadas con el correcto manejo del recurso hídrico, así como evitar el deterioro del cuerpo de agua y promover su conservación o mejora. Es bien sabido, que las metodologías actuales son lentas y difíciles e implementar ya que se puede poner en riesgo tanto al especialista como al equipo de instrumentación al momento de realizar el muestreo dentro de cuerpos de agua de gran escala espacial. El presente trabajo busca unir la brecha que actualmente existe entre la hidrobiología y las ciencias computacionales mediante el desarrollo de los modelos previamente descritos.

Por lo tanto, se desarrolla una metodología para realizar muestreos de factores abióticos como lo son los niveles de oxígeno disuelto, temperatura y turbidez en un cuerpo de agua continental mediante un sistema de adquisición de datos sumergible cumpliendo con los objetivos específicos uno y dos del presente trabajo; los parámetros fisicoquímicos fueron analizados con respecto al diagrama de Rawson para el análisis de la calidad del agua mediante el wqi de la nsf, para el modelo difuso que describe el Índice biótico Lacustre el cual obtiene un puntaje que describe la densidad biótica de la zona evaluada así como para el modelo de clasificación de capas de estratificación que mediante la temperatura obtenida sobre el eje vertical del lago se describe su régimen térmico.

El trabajo es novedoso ya que por un bajo costo a los especialistas se les permite la visualización del geoposicionamiento del punto de interés y puedan realizar mediciones de los parámetros fisicoquímicos involucrados en un tiempo estimado de 2 minutos por punto geográfico analizado para el conocimiento de los valores de DO, temperatura y turbidez. También mediante técnicas de inteligencia artificial como la asistencia de un sistema de inferencia difuso que permite la evaluación de zonas lacustres dependiendo de la profundidad por punto geográfico analizada es posible identificar zonas bióticas adecuadas para la supervivencia de especies endémicas específicas del lago de Zirahuén a través del índice biótico lacustre - IBL, sin embargo, es posible modificar el modelo para poder replicarlo en otros tipos de lagos, cumpliendo con el objetivo específico número tres. Inclusive se diseña un modelo que permite la identificación de las distintas capas de estratificación a través de un clasificador bayesiano y todo un conjunto de algoritmos que permiten el preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento de los datos con el fin de delimitar con exactitud las capas del régimen térmico de un lago estratificado, es decir, las capas epilimnion, metalimnion y epilimnion, según sean los datos de entrada, de tal manera que el objetivo número cuatro fue cumplido.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos respecto del análisis realizado sobre el objeto de estudio, es decir el lago de Zirahuén fueron los siguientes: el lago de Zirahuén muestra una evaluación promedio de media a

buena en la mayoría de las mediciones realizadas. Sobre el eje vertical del lago, la temperatura analizada, muestra un lago completamente estratificado, ya que Zirahuén se trata de un lago de tipo monomítico cálido y las mediciones se realizaron en verano, por lo tanto, la calidad del agua pasando los 11 metros comienza a ser mala de acuerdo con su régimen térmico analizado mediante el modelo de clasificación de capas de estratificación. Debido a la limitante de la longitud de la sonda, es decir 13 metros, no fue posible obtener mayores mediciones, sin embargo, mediante los modelos de regresión mostrados en las ecuaciones que describen los comportamientos, tanto de los niveles de oxígeno disuelto, temperatura, turbidez, wQI_{NSF} e IBL es posible predecir el comportamiento de los valores de interés dependientes de la profundidad indicada. El modelo de clasificación de capas de estratificación identifico dos capas en el lago de Zirahuén de los 0 a los 13 metros, la capa del epilimnion y del metalimnion, divididos a una profundidad de aproximadamente 10.5 m., es decir que el límite de la zona fótica se encuentra a ese nivel. El modelo fue validado realizando su procesamiento con los datos de otro lago de mismas características que Zirahuén y los datos arrojados fueron exactos al 100% con los datos indicados por el trabajo consultado.

El IBL mostrado en el Lago de Zirahuén muestra una valoración de zonas con una puntuación arriba de 5 antes de los 10.5 metros, y dicho resultado es congruente con el modelo de clasificación ya que a ese nivel de profundidad termina la zona fótica. El IBL fue validado realizando un modelo de regresión cuadrática con el wQI_{NSF} , ya que la literatura consultada indica que si no existen modelos bióticos utilizados en los cuerpos de agua analizados la forma para validar los modelos propuestos es mediante regresiones matemáticas entre el modelo propuesto y un índice de calidad del agua de interés general.

El presente trabajo es de gran beneficio para los limnólogos ya que les muestra un amplio panorama del lugar de estudio, pueden realizar mediciones en menos tiempo lo que impacta en los resultados de sus análisis ya que se pueden considerar que se realizaron las mediciones con mayor precisión in situ sin necesidad de llevar un muestrario al laboratorio o inclusive contaminar las muestras mediante los métodos convencionales mediante un sistema computacional que cuenta con el modelo difuso que permite la evaluación de zonas lacustres mediante el IBL, cumpliendo con los objetivos específicos cinco y seis. También les ayuda a poder caracterizar el lago analizado y con ello diseñar un plan de acción que permita el manejo adecuado del recurso hídrico. Además se diseñaron algoritmos computacionales que permiten el preprocesamiento de los datos de una manera puntual para garantizar una identificación precisa.

Se concluyen satisfactoriamente los objetivos planteados, ya que se validó que es posible determinar cualitativamente la abundancia de las especies dependiendo la zona del lago analizada y también se demostró que es posible utilizar el modelo de clasificación propuesto para delimitar con exactitud las diferentes capas de estratificación de los lagos.

El proyecto puede ser escalable, ya que es posible obtener dichos datos a partir del acoplamiento de nuevos sensores tales como PH, intensidad lumínica, entre otros de mayor interés para el limnólogo y almacenarlos de la misma manera automática como se hizo en el presente trabajo.

Se espera realizar un muestreo en un periodo determinado de tiempo, para conocer el máximo de puntos geográficos a muestrear considerando una profundidad límite y la distancia entre puntos. Se espera que el presente proyecto sea de gran utilidad para los limnólogos interesados en realizar mediciones rápidas y precisas, ya que en ocasiones las excursiones realizadas para la obtención de muestras suelen ser costosas.

También, es posible modificar el modelo difuso para poder replicarlo en otros tipos de lagos. Se considera necesario la implementación del modelo global para poder tener una mejor caracterización del cuerpo de agua analizado.

El lago de Zirahuén muestra signos de deterioro, por lo que es urgente tomar las medidas necesarias para su conservación. La falta de recursos tecnológicos que provean métodos eficientes de análisis en el ecosistema es una constante que afecta a la investigación de la biodiversidad en el lago, por lo que el presente trabajo se elaboró para ser una herramienta especializada en la evaluación, el análisis y clasificación de zonas lacustres a un costo mínimo.

REFERENCIAS

- Abarca, F. J. (2007). Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. En: Sanchez, O., Herzig, M., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., y Zambrano, L. (eds.). Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México (pp. 113-135). México: Instituto Nacional de Ecología [INE-SEMARNAT].
- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2011). Water quality indices based on bioassessment: the biotic indices. *Journal of water and health*, 9(2), 330-348.
- Alippi, C., Camplani, R., Galperti, C., y Roveri, M. (2011). A robust, adaptive, solar-powered WSN framework for aquatic environmental monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 11(1), 45-55.
- American Public Health Association (APHA) (1995) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th Edition, American Public Health Association, American Water Works Association and Environment Federation Washington DC, USA, 4-91.
- Arango Serna, M., Serna Urán, C., & Gómez Builes, A. (2012, July/Dec). Inferencia difusa aplicada a la ingeniería concurrente para el diseño de productos de manufactura en condiciones de incertidumbre. *Revista ingenierías universidad de medellín*, 11(21).
- Arduino (2020). Arduino - Begin. Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Serial.Begin>.
- Armendáriz, C., y Martínez, A. Y. (2016). Water pollution in Zirahuen Lake (Michoacan, Mexico) (Teaching notes). Teaching-learning experience in a social and environmental chemistry approach, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Atlas Scientific. (2016, August). Environmental Robotics V 3.7. Retrieved from ph EZO Circuit: https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_circuit/ph_EZO_datasheet.pdf
- Ayala, L. (24 de agosto de 2019). Falta dinero para salvar al Lago de Zirahuén, el Espejo de los Dioses. *La Voz de Michoacán*. <https://www.lavozdemichoacan.com.mx/regional/falta-dinero-para-salvar-al-lago-de-zirahuen-el-espejo-de-los-dioses/>
- Bain, M. B., y Stevenson, N. J. (1999). Aquatic habitat assessment: common methods. Maryland, Estados Unidos de América: American Fisheries Society.
- Banderas, A. G., y González, R. (1996). La limnología, una revisión del concepto. *Ingeniería Hidráulica en México*, 11(1), 77-84. Recuperado de http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1253/RIH_041.pdf.

- Barajas J. (2017). Diagnóstico nacional de los principales lagos y embalses mexicanos en los que se realiza la pesca y la acuicultura (investigación interna). Ciudad de México, México: Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria – Cámara de Diputados LXIII Legislatura.
- BASIN, Boulder Area Sustainability Information Network. (2005). The National Sanitation Foundation Water Quality Index. Recuperado de http://bcn.boulder.co.us/basin/watershed/wqi_nsf.html.
- Bates, M. P. (2013). *Interfacing PIC Microcontrollers*. Newnes.
- Bellman, R., & Zadeh, L. (1970). Decision making in a fuzzy environment. *Management Science*(4), 141- 164.
- Bernal-Brooks F.W. y maccrimmon H.R. (2000). Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs. En: Munawar M., Lawrence S.G., Munawar I.R. y Malley D. (eds), *Aquatic Ecosystems of Mexico*. Ecovision World Monograph Series, Backhuys, Leiden, pp. 61–70.
- Bernal-Brooks, F. W., Dávalos-Lind, L., y Lind, O. T. (2002). Assessing trophic state of an endorheic tropical lake: the algal growth potential and limiting nutrients. *Archiv für Hydrobiologie*, 153(2), 323-338. DOI: 10.1127/archiv-hydrobiol/153/2002/323.
- Bhardwaj, J., Gupta, K. K., y Khatri, P. (marzo, 2018). Real Time Assessment of Potable Water Quality in Distribution Network based on Low Cost Multi-Sensor Array. En: *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 331(1), 012027. IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/331/1/012027.
- Bhardwaj, L., Chauhan, A., Ranjan, A., & Jindal, T. (2018). Persistent organic pollutants in biotic and abiotic components of Antarctic pristine environment. *Earth Systems and Environment*, 2(1), 35-54.
- Boehrer, B., y Schultze, M. (2008). Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, 46(2), 1-27. DOI: 10.1029/2006RG000210.
- Bosque-Sendra, J. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid:
- Brown, R. M., maclelland, N. I., Deininger, R. A., y O'Connor, M. F. (1972). A water quality index—crashing the psychological barrier. In *Indicators of environmental quality*, 1, 173-182. DOI: 10.1007/978-1-4684-2856-8_15.
- Brown, R. M., maclelland, N. I., Deininger, R. A., y Tozer, R. G. (1970). A water quality index—do we dare? *Water Sewage Works*, 117(10), 339-343.
- Campos, M. A., Gutiérrez, H. A., & Hernández, D. I. (1997). *Limnología física del lago de Zirahuén, Michoacán, México* (Doctoral dissertation, Tesis Profesional. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich).

- Canadian Council of Ministers of the Environment. 2017. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index, User's Manual – 2017 Update. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- Carbajal-Hernández, J. J., Sánchez-Fernández, L. P., Villa-Vargas, L. A., Carrasco-Ochoa, J. A., & Martínez-Trinidad, J. F. (2013). Water quality assessment in shrimp culture using an analytical hierarchical process. *Ecological indicators*, 29, 148-158.
- Castillo, E. B., Quintana, J. L. M., Mestanza, C. N. V., Silupú, J. C., & Oliva, M. (2018). Análisis morfométrico y batimétrico del lago Pomacochas (Perú). *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 2(2), 90-97.
- Cervantes Pérez, J. (2017). Estaciones y temporadas climáticas.
- Chacón Torres, A., & Múzquiz Iribe, E. (1991). El Lago de Zirahuén, Michoacán, México: reconocimiento ambiental de una cuenca michoacana (No. Folleto 14230).
- Chacón, A., Rosas, C., Rendón, M., y Cruz, O. (2010). Balance hidrológico del lago de Zirahuén. En: Ortiz, C., y Rendón, M. (coordinadores). *Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén* (pp. 35-56). Morevallado, México: ININEE-UMSNH.
- Chapman, D. (1992). *Water quality assessments*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. World Health Organization, United Nations Environment Programme, E & FN Spon, Londres.
- Chapman, D., & Kimstach, V. (1992). *The Selection of Water Quality Variable In: Water Quality Assessments* (Chapman, D. Ed.) Chapman and Hall Ltd.
- Chavez, A. G. T., Morales-Chávez, R., García-González, Y., Francisco, A., & Rojas, G. T. Partición de la precipitación en cultivo de aguacate y bosque de pino-encino en Michoacán, México.
- Cigagna, C., Bonotto, D. M., & Sturaro, J. R. (2014). Bathymetry and study parameters of reservoir morphometric state forest “edmundo navarro de andrade” (FEENA) rio claro / sp. [Batimetria e estudo de parâmetros morfométricos do reservatório da floresta estadual “edmundo navarro de andrade” (FEENA) RIO CLARO/SP] *Geociencias*, 33(4), 720-732.
- CIMA, I. (2015). Acero Inoxidable Tipo 304. Recuperado de <http://www.aceroinoxidable.com/acero-inoxidable-tipo-304-serie-300>.
- Cole, G. A. (1988), *Manual de limnología*, Ed. Hemisferio Sur, Argentina.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2005). *La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado*.

- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2012a). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Menidia estor*.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2012b). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Algansea lacustris*.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2013a). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Allotoca meeki*.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2013b). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Micropterus salmoides*.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2012a). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Menidia estor*.
- Cony, N. L., Ferrer, N. C., Martínez, A., & Cáceres, E. J. (2016). Productividad, estado trófico y dinámica fitoplanctónica en la laguna Sauce Grande y su afluente homónimo (pcia. De Buenos Aires, Argentina). *Biología Acuática*.
- Cony, N. L., Ferrer, N. C., Martínez, A., & Cáceres, E. J. (2016). Productividad, estado trófico y dinámica fitoplanctónica en la laguna Sauce Grande y su afluente homónimo (pcia. De Buenos Aires, Argentina). *Biología Acuática*.
- Crossman, J., & Elliott, J. A. (2018). Bridging the gap between terrestrial, riverine and limnological research: Application of a model chain to a mesotrophic lake in north america. *Science of the Total Environment*, 622-623, 1363-1378. Doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.052.
- Dajin, K. And In-Hyun, C. (1997). An Accurate and Cost-Effective COG Defuzzifier Without the Multiplier and the Divider, *Fuzzy Sets and Systems*, Elsevier Science B.V., Amsterdam (to appear).
- DALLAS. (2008). Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Retrieved from <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/230839/DALLAS/DS18B20-SL.html>
- Davikevin, A. (1999). *Encyclopedia of Environmental Science*. Springer. ISBN 0-412-74050-8.
- Davis, J. (2016). *A Novel Aquatic Sensor and Network* (tesis de maestría). Rensselaer Polytechnic Institute. Nueva York, Estados Unidos.
- Daw, A., Karpatne, A., Watkins, W., Read, J., & Kumar, V. (2017). Physics-guided neural networks (pgnn): An application in lake temperature modeling. Arxiv preprint arxiv:1710.11431.
- De Buen, F. (1943). Los lagos michoacanos. I. Caracteres generales. El lago de Zirahuén. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 4(3-4), 211-232.

- De Faria, S. H., Rodrigues, D. D., Medeiros, N. G., & Aranha, P. R. A. (2017). Evaluation of the GPR in the bathymetry estimate of a decanting water treatment plant using the free software “GPR bathymetry” in the radargrams analysis. [Avaliação do GPR na estimativa da batimetria de uma caixa de decantação empregando o aplicativo gratuito “GPR bathymetry” na análise dos radargramas] *Boletim De Ciencias Geodesicas*, 23(1), 39-54. Doi:10.1590/S1982-21702017000100003.
- De la Lanza-Espino, G. (2000). Criterios generales para la elección de bioindicadores. En: de la Lanza, G., Hernández, S., y Carbajal, J. (compiladores). *Organismos Indicadores de la Calidad del Agua y de la Contaminación (Bioindicadores)* (pp. 17-42). México: Plaza y Valdés, S. A. De C.V.
- De Paz, y. V., López, m. B. R., Chacón, a., Torres, f. W., & Monge, c. R. Dinámica de nutrientes del lago de Zirahuén, Michoacán, México.
- Degano, M. F., Rodríguez, M. I., & Dasso, C. M. (2016). Dinámica térmica de cuerpos de aguas eutróficas: caso Embalse San Roque. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(1), 93-100.
- DFROBOT. (2008). Turbidity sensor SKU: SEN0189. Retrieved from https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/dfrobot%20pdfs/SEN0189_Web.pdf
- Díaz, E., E. López y E. Soto. (1995). Monitoreo Ambiental en Ecosistemas Acuáticos de México. En: C. Aguirre (Ed.) *Taller norteamericano sobre monitoreo para la evaluación ecológica de ecosistemas terrestres y acuáticos*. Septiembre 18-22. General Technical Report RM-GTR-284. Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. Pp. 264-273.
- Diaz-Pardo, E., Lopez-Lopez, E., y Soto-Galera, E. (1996). Monitoreo Ambiental en Ecosistemas Acuáticos de México. United States Department of Agriculture Forest Service General Technical Report RM (pp. 264-272).
- DOF - Diario Oficial de la Federación. (2014). Gob.mx. Recuperado el 23 de junio de 2022, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?Codigo=5342552&fecha=29/04/2014
- Dunalska, J. A., & Wiśniewski, G. (2016). Can we stop the degradation of lakes? Innovative approaches in lake restoration. *Ecological Engineering*, 95, 714-722.
- ECE, Task Force on Monitoring and Assessment. (1996). *Guidelines on water-quality monitoring and assessment of transboundary rivers*. RIZA report nr. 96.034.
- Elkhokhi, H., Bakhouya, M., El Ouadghiri, D., & Hanifi, M. (2022). Using Stream Data Processing for Real-Time Occupancy Detection in Smart Buildings. *Sensors*, 22(6), 2371.

- Forstner, H., & Gnaiger, E. (1983). Calculation of equilibrium oxygen concentration. In *Polarographic oxygen sensors* (pp. 321-333). Springer, Berlin, Heidelberg. Doi: 10.1007/978-3-642-81863-9_28.
- Gómez-Tagle, A. F., y Gómez-Tagle, A. (2009). Hidrología y suelos de la cuenca de Zirahuén, Michoacan. En: Ortiz, C., y Rendón, M. (coordinadores). *Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén* (pp. 19-32). Morevallado, México: ININEE-UMSNH.
- Gómez-Tagle, A., Morales-Chávez, R., García-González, Y., y Gómez-Tagle, A. F. (2019). Partición de la precipitación en cultivo de aguacate y bosque de pino-encino en Michoacán, México. *Biológicas*, 21(1), 1-18. DOI: 10.13140/RG.2.2.24281.06247.
- Gómez-Tagle, R. A. F., & Gómez-Tagle, A. (2009). Hidrología y suelos de la cuenca de Zirahuén, Michoacan. *Espejo de los dioses: Estudios sobre ambiente y desarrollo de la cuenca del lago de Zirahuén*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, 19-32.
- Guridi, X. M., & Torres, A. C. (2010). Vegetación acuática estricta del lago de Zirahuén. *Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén*, 153.
- Guridi, X. M., Retana, A. N., & Torres, A. C. (2004). Flora y vegetación acuáticas del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana*, (68), 1-38.
- Hall-Spencer, J. M., & Harvey, B. P. (2019). Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences*, 3(2), 197-206.
- Hanna Instruments (2020). Multiparamétrico portátil con GPS, medida de turbiedad, ISE y sonda registradora HI 9829 - HANNA Instruments, Fabricante de instrumentos de medida y análisis. Recuperado de <http://www.hannainst.es/catalogo-productos/medidores-combinados/portatil/multiparametrico-portatil-con-gps-medida-de-turbidez--ise-y-sonda-registradora-hi-9829>.
- Hmoud Al-Adhaileh, M., & Waselallah Alsaade, F. (2021). Modelling and prediction of water quality by using artificial intelligence. *Sustainability*, 13(8), 4259.
- Hongpin, L., Guanglin, L., Weifeng, P., Jie, S., & Qiuwei, B. (2015). Real-time remote monitoring system for aquaculture water quality. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(6), 136-143.
- Horton, R.K. (1965) An Index Number System for Rating Water Quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37, 300-306. [Http://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/referencespapers.aspx?Referenceid=1020268](Http://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/referencespapers.aspx?Referenceid=1020268)
- Hutchison, E.G. (1957), *A treatise on limnology*, Volumen I, Part 1, Wiley Interscience Publication, USA

- Ichwana, I., Syahrul, S., & Nelly, W. (2016). Water quality index by using national sanitation foundation-Water quality index (NSF-WQI) method at krueng tamiang aceh. In International Conference on Technology, Innovation and Society, Universitas Syiah Kuala, Indonesia. Pp. 110-117. ITP PRESS. Doi 10.21063/ICTIS.2016.1019.
- INAPESCA, Instituto Nacional de Pesca. (2013). Desarrolla INAPESCA programa de evaluación de embalses, han realizado investigaciones biológico pesqueras en cuerpos de agua del País. Prensa.
- INAPESCA. (2016). Conoce al INAPESCA. Obtenido de <http://www.inapesca.gob.mx>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Hidrografía. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>
- Info@xpora.es/, X. (2018). Multiparamétrico portátil con GPS, medida de TURBIDEZ, ISE y sonda registradora HI 9829 - HANNA Instruments, Fabricante de instrumentos de medida y análisis. Retrieved from <http://www.hannainst.es/catalogo-productos/medidores-combinados/portatil/multiparametrico-portatil-con-gps-medida-de-turbidez--ise-y-sonda-registradora-hi-9829>
- International Organization for Standardization. (1990). Water quality — Determination of turbidity (Standard No. 7027)
- International Organization for Standardization. (2012). Water Quality - Determination Of Dissolved Oxygen - Electrochemical Probe Method (Standard No. 5814)
- International Organization for Standardization. (2018). Water quality — Sampling - Part 3: Preservation and handling of water samples (Estándar No. 5667)
- ISO, International Organization for Standardization. (2012). Standard No. 5814, Water Quality. Determination Of Dissolved Oxygen - Electrochemical Probe Method.
- ISO, International Organization for Standardization. (2016). Standard No. 7027, Water quality. Determination of turbidity.
- ISO, International Organization for Standardization. (2018). Standard No. 5667, Water quality. Sampling - Part 3: Preservation and handling of water samples.
- Janssen, A. B., Teurlinx, S., Beusen, A. H., Huijbregts, M. A., Rost, J., Schipper, A. M., ... & Janse, J. H. (2019). Pclake+: A process-based ecological model to assess the trophic state of stratified and non-stratified freshwater lakes worldwide. *Ecological modelling*, 396, 23-32.
- Jiménez, J. D., Gil, C. L., & Herrera, R. G. (. (2005). Impacto de las temperaturas extremas en la salud pública: futuras actuaciones. *Salud Pública*, 145-15.

- Johnes, P., Moss, B., & Phillips, G. (1994). Lakes-Classification & Monitoring: a strategy for the classification of lakes.
- José Ríos, M., Mendoza Ramírez, R., Silva Casarín, R., Simuta Champo, R., Reyes López, D., & Pascual Ramírez, F. (2018). Elementos para gestión del agua en la cuenca del lago de Zirahuén. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 431-439.
- Karr, J. R. (1981). Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 6(6), 21-27.
- Kasco Marine. (2022, May 25). Pond & Lake identification zone. Retrieved June 8, 2022, from <https://kascomarine.com/es/blog/pond-lake-zone-identification/>
- Krenkel, P. And Novotny, V., 1980. Physical and Chemical Parameters of Water Quality. *Water Quality Management*, pp.46-70.
- Lima, J. R. C., Shinozaki-Mendes, R. A., & De Almeida, A. Q. (2013). Bathymetry estimation of the sacco reservoir-pe with the help of orbital data. [Estimativa da batimetria do açude do sacco-pe com auxílio de dados orbitais] *Engenharia Agrícola*, 33(5), 1017-1023. Doi:10.1590/S0100-69162013000500013.
- López G. (1981). Dinámica Hidrológica del Lago de Zirahuén (tesis profesional). Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- López, M. Y M. Guzmán. 1995. Monitoreo en reservorios de México. En: C. Aguirre (ed.). Taller norteamericano sobre monitoreo para la evaluación ecológica de ecosistemas terrestres y acuáticos. Septiembre 18-22. General Technical Report RM-GTR-284. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agricultura, Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. Pp. 273-279.
- López, M., & Guzmán, M. (1995). Monitoreo en reservorios de México. Taller norteamericano sobre monitoreo para la evaluación ecológica de ecosistemas terrestres y acuáticos. Septiembre, 18-22.
- Lopez-Hernandez, M., y Guzman-Arroyo, M. (1996). Monitoreo en Reservorios de México. United States Department of Agricultura Forest Service General Technical Report RM (pp. 273-279).
- López-Macías, J. N., & Salas-Benavides, J. (2019). Comparação físico-química e biológica entre efluentes da produção de trutas arco-íris e as condições limnológicas do lago Guamuez, departamento de Nariño. *Orinoquia*, 23(2), 87-96.
- López-Macías, J. N., y Salas-Benavides, J. (2019). Comparación fisicoquímica y biológica entre efluentes de la producción de trucha arcoíris y la condición limnológica del Lago Guamuez, departamento de Nariño. *Orinoquia*, 23(2), 87-96.
- Lozano-García, M. S., Vázquez-Castro, G., & Israde-Alcántara, I. (2010). Registro palinológico de la perturbación humana y natural de los últimos 3,200 años en el Lago de Zirahuén, centro-occidente de

- México. Espejo de los Dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo e Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, 87-112.
- M., V. (2006, Febrero). Tecnologías de Sistemas Inteligentes. Retrieved from Razonamiento aproximado : <http://www.mty.itesm.mx/dtie/centros/csi/materias/ia95-022/raz-difuso.pdf>
- Madrigal, X., Novelo, A., & Chacón, A. (2004). Flora y vegetación acuáticas del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana*, (68), 1-38.
- Madrigal, X., y Chacón, A. (2010). Vegetación acuática estricta del lago de Zirahuén. En: Ortiz, C., y Rendón, M. (coordinadores). *Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén* (pp. 153). Morevallado, México: ININEE-UMSNH.
- Madrigal, X., y Chacón, A. (2010). Vegetación acuática estricta del lago de Zirahuén. En: Ortiz, C., y Rendón, M. (coordinadores). *Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén* (pp. 153). Morevallado, México: ININEE-UMSNH.
- Maldonado López, S. (2019). Cambio de uso del suelo, calidad de agua y salud pública: implicaciones para el desarrollo regional. Estudio de caso de la cuenca del lago de Zirahuén.
- Maldonado-López S. (2019). Cambio de uso del suelo, calidad de agua y salud pública: implicaciones para el desarrollo regional. Estudio de caso de la cuenca del lago de Zirahuén. [Tesis doctoral, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo]. Repositorio académico de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/1507/ININEE-D-2019-1179.pdf?Sequence=1&isallowed=y
- Mann, K.H. & J.R.N. Lazier. (1996). *Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans*. Blackwell Science, Oxford, Inglaterra.
- Mann, K.H. & J.R.N. Lazier. 1996. *Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans*. Blackwell Science, Oxford, Inglaterra.
- Marcelli, M., Piermattei, V., Madonia, A., & Mainardi, U. (2014). Design and application of new low-cost instruments for marine environmental research. *Sensors*, 14(12), 23348-23364.
- Marcelli, M., Piermattei, V., Madonia, A., & Mainardi, U. (2014). Design and application of new low-cost instruments for marine environmental research. *Sensors*, 14(12), 23348-23364.
- Margalef, R. (1974). *Ecología*. Omega, Barcelona.
- Margalef, R. (1983). *Limnología* (Vol. 1009). Barcelona: Omega.

- Martínez Elorriaga, E., 2020. El lago Zirahuén, en riesgo por químicos usados en la agricultura. La jornada, [online] p.23. Available at: <<https://www.jornada.com.mx/2019/03/10/estados/023n1est>> [Accessed 17 July 2020].
- Martínez-Almeida, V., & Tavera, R. (2005). A hydrobiological study to interpret the presence of desmids in lake zirahuén, México. *Limnologica*, 35(1-2), 61-69. Doi:10.1016/j.limno.2005.01.002
- Crossman, J., & Elliott, J. A. (2018). Bridging the gap between terrestrial, riverine and limnological research: Application of a model chain to a mesotrophic lake in north america. *Science of the Total Environment*, 622-623, 1363-1378. Doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.052.
- Maxim Integrated. (2019). Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. DS18B20 Datasheet. Recuperado de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- Mendoza, B., Pérez, G., & García, L. (1996). Helmintos de la acúmara *Algansea lacustris* en el Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. . *Anales del Instituto de Biología serie Zoología*(67), 77-88.
- Mendoza, R., Silva, R., Jiménez, A., Rodríguez, K., & Sol, A. (2015). Lake Zirahuén, Michoacán, Mexico: An approach to sustainable water resource management based on the chemical and bacterial assessment of its water body. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2, 1-11.
- Mitchell, M.K and Stapp, W.B. (1995). *Field Manual for Water Quality Monitoring An Environmental Education Program for Schools*. Green Project, Ann Arbor, MI. 272p.
- Moog, O., & Chovanec, A. (2000). Assessing the ecological integrity of rivers: walking the line among ecological, political and administrative interests. *Hydrobiologia*, 422, 99-109.
- Mosquera, R., Castrillón, O. D., & Parra, L. (2018). Máquinas de Soporte Vectorial, Clasificador Naïve Bayes y Algoritmos Genéticos para la Predicción de Riesgos Psicosociales en Docentes de Colegios Públicos Colombianos. *Información tecnológica*, 29(6), 153-162.
- Mudroch, A., & macknight, S. D. (1994). *Handbook of techniques for aquatic sediments sampling*. CRC press.
- Mudrock, A. Y S.D. macknight. (1994). *Handbook of techniques for aquatic sediments sampling*. Lewis Publishers, Londres.
- National Instruments, (2020). Labview Download. [online] Ni.com. Available at: <<https://www.ni.com/es-mx/support/downloads/software-products/download.labview.html#306311>> [Accessed 18 July 2020].
- National Instruments. (2018). ¿Qué es labview?. Retrieved from <http://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>
- National Instruments. (2018). Fuzzy System Designer - labview 2017 Help, Retrieved from http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361P-01/lvpid/fuzzy_system_designer_db/

- Newmark, an avnet company. (2020). A000066 Arduino Uno, Atmega328. [online] Recuperado de <https://mexico.newark.com/arduino/a000066/dev-board-atmega328-arduino-uno/dp/78T1601>.
- Norris, R. H., & Morris, K. R. (1995). The need for biological assessment of water quality: Australian perspective. *Australian Journal of Ecology*, 20(1), 1-6.
- Oberdorff, T., Pont, D., Hugueny, B., & Chessel, D. (2001). A probabilistic model characterizing fish assemblages of French rivers: a framework for environmental assessment. *Freshwater Biology*, 46(3), 399-415.
- Oberdorff, T., Pont, D., Hugueny, B., & Porcher, J. P. (2002). Development and validation of a fish-based index for the assessment of 'river health' in France. *Freshwater Biology*, 47(9), 1720-1734.
- Oberreuter, J., Pulgar, S., & Rivera, A. (2017). An integrated bathymetric and seismic profiling system. Paper presented at the IEEE 1st International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, GRSS-CHILE 2017, doi:10.1109/GRSS-CHILE.2017.7996020.
- Odum, E. P. (1983). *Ecologia* (No. 574.5 O38Y 1975.). CECSA.
- Olmo Castillo, M. (2008). Tutorial de Introducción de Lógica Borrosa. Retrieved from *Funciones de Membresía*:
- Ortiz, C. F., y Rendón, M. B. (2010). *Espejo de los Dioses: Estudios sobre Ambiente y Desarrollo en la Cuenca del Lago de Zirahuén*. Morevallado, México: ININEE-UMSNH.
- Ortiz, R. And Lassman, M., (2019). *Environmental Justice Atlas*. [online] Ejatlas.org. Available at: <<https://ejatlas.org/print/no-solo-es-agua-tambien-es-polvo-la-degradacion-del-lago-de-cuitzeo-y-la-lucha-por-la-salud>> [Accessed 23 June 2022].
- Ortiz, R. Y Lassman, M. (2019, 18 de agosto). Dust instead of water: degradation and desecation of Lake Cuitzeo, Michoacan, Mexico. *Environmental Justice Atlas*. <https://ejatlas.org/print/no-solo-es-agua-tambien-es-polvo-la-degradacion-del-lago-de-cuitzeo-y-la-lucha-por-la-salud>
- Palani, S. R., Balasubramaniyan, K., y Durairaj, D. (2020). Fuzzy classifier model to know the sustainability of aquatic organisms and to forecast the aqua farmers. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-10. DOI: 10.1007/s11356-020-08489-7.
- Paniagua, C. F. O. (2010). *Espejo de los Dioses: Estudios sobre Ambiente y Desarrollo en la Cuenca del Lago de Zirahuén*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Pérez Pueyo, R. (2005). *Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: aplicación a la identificación de materiales pictóricos*. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Pérez, G. R., & Restrepo, J. J. R. (2008). Fundamentos de limnología neotropical (Vol. 15). Universidad de Antioquia.
- Pérez-Calix, E. (1996). Flora y vegetación de la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México. Fascículo Complementario XIII.
- Raghav, A., Hasan, R., & Mahmood, S. (2011, November). History of Non Artificial Intelligence Based Biological Monitoring of River Water Quality. In 2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (Vol. 3, pp. 248-253). IEEE.
- Rahmat, R. F., Syahputra, M. F., & Lydia, M. S. (2016, October). Real time monitoring system for water pollution in Lake Toba. In 2016 International Conference on Informatics and Computing (ICIC) (pp. 383-388). IEEE.
- Ramírez, A. F. (2014, Noviembre). Fuzzy logic, truth and cognition. *Revista de Filosofía*, 70.
- Ramirez, D. A., Santillan, A. A. F., & Ania, L. V. G. (2012). LA INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO PESQUERO COMO PIEZA CLAVE DE UNA PESCA SUSTENTABLE. CASO SELECTO: LA PESQUERÍA DE CAMARÓN EN EL OCEANO PACIFICO MEXICANO.
- Ramsar, S. D. (2013). Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales.
- Ramsar, S. D. (2016). Introducción a la convención sobre los humedales. Manual de la Convención RAMSAR. Subserie I: Manual, 1.
- Rangel Silva, M. A., & Bustos Roa, L. V. (2017). Validación de ensayos de laboratorio y análisis de respetabilidad y reproducibilidad para la elaboración del manual de laboratorio de recurso agua en el programa de tecnología en recursos ambientales de las unidades tecnológicas de santander.
- Rawson, D. S. (1939). Some physical and chemical factors in the metabolism of lakes. En: Moulton, E. R. (editor). *Problems of Lake Biology*, 10, 9-26. Washington, Estados Unidos de América: American Association for the Advancement of Science.
- Read, J. C., Phillipson, G. P., & Glennerster, A. (2009). Latitude and longitude vertical disparities. *Journal of Vision*, 9(13), 11-11.
- Rendón, M., Chacón, A., Vergara, Y., & Rosas, C. (2009). El uso de los índices tróficos en un lago de altitud mexicano. En: Ortiz, C., y Rendón, M. (coordinadores). *Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén* (pp. 71-87). Morevallado, México: ININEE-UMSNH.
- Revelo Carrera, J. L. (2017). Evaluación del balance hidrológico y establecimiento de estrategias para la conservación del recurso hídrico del lago Yahuarcocha (Bachelor's thesis).

- Revelo Carrera, J. L. (2017). Evaluación del balance hidrológico y establecimiento de estrategias para la conservación del recurso hídrico del lago Yahuarcocha (Bachelor's thesis).
- Rivera, H., & Orbe-Mendoza, A. (1990). Contribución al conocimiento de la biología, cultivo y pesquería de la acúmara (*Algansea lacustris*) del lago de Pátzcuaro, Michoacán. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Roldán-Pérez, G. (1992). Fundamentos de limnología neotropical. Ed. Univ. Antioquía, Medellín, Colombia.
- SALUD, Secretaría de Salud. (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Sánchez, O. (2007). Ecosistemas acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México, 11.
- Scardi, M., Cataudella, S., Di Dato, P., Fresi, E., & Tancioni, L. (2008). An expert system based on fish assemblages for evaluating the ecological quality of streams and rivers. *Ecological informatics*, 3(1), 55-63.
- SDR, sandorobotics. (2019). Sensor de Nivel de Agua HR0043. HR0043 Hoja de Especificaciones. Recuperado de <https://sandorobotics.com/producto/hr0043/>.
- SE, Secretaría de Economía. (2001). Norma Mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001, Análisis de agua. Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-038-1981).
- SE, Secretaría de Economía. (2009). Proyecto De Norma Mexicana PROY- PROY-NMX-AA-121/1-SCFI-2008, Análisis de agua – Aguas naturales epicontinentales, costeras y marinas – Muestreo – (Todas las partes cancelan al PROY NMX-AA-121-SCFI-2006)
- SE, Secretaría de Economía. (2010). Proyecto De Norma Mexicana PROY-NMX-AA-012/2-SCFI-2009, Análisis de agua. Determinación del oxígeno disuelto, En aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba - Parte 2 - Método Electroquímico - (Cancelan a la NMXAA-012-SCFI-2001).
- SE, Secretaría de Economía. (2014). Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013, Análisis de agua. Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.
- SE. (2001). Norma Mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-038-1981). Diario Oficial de la Federación 01 agosto, 2001.

- SE. (2010). Proyecto De Norma Mexicana PROY-NMX-AA-012/2-SCFI-2009, Análisis de agua – Determinación del oxígeno disuelto – En aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba- Parte 2 - Método Electroquímico - (Cancelan a la NMXAA-012-SCFI-2001). Diario Oficial de la Federación 12 julio, 2010.
- SE. (2014). Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013, Análisis de agua - Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Diario Oficial de la Federación 23 enero, 2014.
- SECOFI, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1980). Norma Mexicana NMX-AA-003-1980, Aguas residuales. Muestreo.
- SECOFI. (1980). Norma Mexicana NMX-AA-003-1980, Aguas residuales – Muestreo. Dirección General de Normas.
- Secretaría de la Convención de Ramsar (2013). Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (6ta Ed.). Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.
- Secretaría de la Convención de Ramsar (2016). Manual de la Convención de Ramsar: Introducción a la Convención sobre los humedales. (5ta Ed.). Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.
- SEMAR, Secretaría de Marina. (2018). ACUERDO Secretarial número 464 mediante el cual se establece la jurisdicción territorial y marítima de las Capitanías de Puerto. Diario Oficial de la Federación § 1-3-8-d (29/11/2018).
- Shear, H. (1996). Ecological assessment in Canada. United States Department of Agriculture Forest Service General Technical Report RM (pp. 20-30).
- Shear, H. 1995. Ecological Assessment in Canada. En: C. Aguirre (ed.). Taller Norteamericano sobre Monitoreo para la Evaluación Ecológica de Ecosistemas Terrestres y Acuáticos. Septiembre 18-22. General Technical Report RM-GTR-284. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agricultura, Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. Pp. 20-30.
- SIDMAR. (2020). Sondas Multiparamétricas. Recuperado de <https://www.sidmar.es/sondas-multiparametricas.html>.
- Sigala, I., Caballero, M., Correa-Metrio, A., Lozano-García, S., Vázquez, G., Pérez, L., & Zawisza, E. (2017). Basic limnology of 30 continental waterbodies of the Transmexican Volcanic Belt across climatic and environmental gradients. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 313-370.
- Sonda multiparametrica 6600V2. (2018). Retrieved from <http://www.sidmar.es/6600v2.html>

- Spellerberg, I. F. (2005). *Monitoring Ecological Change* (2nd ed.). Lincoln University, Nueva Zelanda: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511614699.
- Subgerencia Cultural del Banco de la República. (2015). Hemisferios. Recuperado de: <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/geografia/hemisferios>.
- Torres, A. C., Monge, C. R., López, M. B. R., & Arias, O. C. (2009). Balance hidrológico del lago de Zirahuén. Zirahuén, 35.
- Universidad de Pamplona. (s.f). Capítulo III: Índices de Calidad (icas) y de Contaminación (icos) del agua de importancia mundial. Recuperado de http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaig/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo3.pdf.
- Ustabas, G. K., ErKaymaz, O., & Sarac, Z. (2016, September 1). Optimization of digital holographic setup by a fuzzy logic prediction system. *Expert Systems with Applications*, 56, 177-185.
- Van Walt ES. (2020). Calidad del Agua. Recuperado de <https://www.vanwalt.com/es/calidad-del-agua/>.
- Vergara, Y., Rendón, M. B., Chacón, A., Bernal, F. W., y Rosas, C. (s.f). Dinamica de nutrientes del lago de Zirahuén, Michoacán, México.
- Vich, A. I. J. (1996). *Aguas continentales. Formas y procesos*. CONICET, Mendoza, Argentina.
- Vignatti, A., Echaniz, S., & Martín, M. C. (2007). El zooplancton de tres lagos someros de diferente salinidad y estado trófico en la región semiárida pampeana (Argentina). *Gayana (Concepción)*, 71(1), 34-48.
- Wade, C. C., & Ericksen, T. M. (2019). *Low Cost Remote Algae Detection Utilizing Embedded Hardware, Custom Sensors, and Additive Manufacturing*. 2019 NCUR.
- Water on the Web | Understanding | Water Quality | Parameters | Turbidity. (2018). Retrieved from <http://www.waterontheweb.org/under/waterquality/turbidity.html>
- YSI Calidad Del Agua Medidores. (2018). Retrieved from <https://www.vanwalt.com/es/ysi-calidad-del-agua-medidores.html>
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*(8), 338-353.

ANEXO A

Evaluación de la calidad del agua

El índice de calidad del agua (wQI_{NSF}), determinado por el método Delphi, se basa en el peso de los nueve parámetros cuantificables (Ichwana, I. et al., 2016) presentados en la Tabla 33. Los resultados obtenidos por el índice son interpretados en una escala del 0 al 100, donde el 0 indica una “Muy mala” calidad del agua, mientras que el 100 indica una “Excelente” calidad del agua; Mitchell y Stapp (1995) resumieron un esquema descriptor de palabras que corresponde a rangos específicos de los valores de wQI_{NSF} y el esquema se presenta en la Tabla 34.

Tabla 33. Parámetros utilizados por el wQI_{NSF} con las unidades representadas por parámetro y su respectivo peso asociado

Parámetro	Unidades	wQI_{NSF} Peso
Saturación de Oxígeno disuelto	%	0.17
Densidad de coliformes fecales	lb/100 ml	0.15
pH	-	0.12
BOD_5 días	mg/l	0.10
Nitratos	mg/l	0.10
Fósforos	mg/l	0.10
Temperatura	°C	0.10
Turbiedad	NTU	0.08
Sólidos totales	mg/l	0.08

Tabla 34. Palabras descriptivas asociadas al Índice wQI_{NSF} con su respectivo rango

Palabra	Muy malo	Malo	Medio	Bueno	Excelente
Rango numérico	0 - 25	26 - 50	51 - 70	71 - 90	91 -100

Cabe mencionar, que se puede ajustar aun cuando se tengan menos de los nueve parámetros propuestos; sumando los resultados de los parámetros con sus respectivos pesos y ajustando el índice al normalizarlo con el total de parámetros analizados.

La evaluación de la calidad del agua que utiliza el software desarrollado donde se definió el wQI_{NSF} únicamente con 3 de los 9 parámetros que se plantean. Los cálculos de wQI_{NSF} se realizaron mediante la aplicación de la fórmula (Brown et al., 1970):

$$wQI_{NSF} = \sum_{i=1}^n (Q_i)(W_i) \quad (1)$$

Donde: wQI_{NSF} es el indicador de calidad del agua, es decir, un número entre 0 y 100; Q_i es la valoración de calidad de cada parámetro de acuerdo con cada gráfica de comportamiento, también es una evaluación entre 0 y 100; W_i es el peso asignado por parámetro (Tabla 2) y siempre y cuando cumpla con la condición $\sum_{i=1}^n W_i = 1$; mientras n es el número de parámetros analizados.

Sin embargo, como la condición de W_i no se cumple, se procede a normalizar el resultado (BASIN, 2013) sumando los pesos ponderados por Q_i entre la sumatoria de los pesos sin ponderar para poder obtener el wQI_{NSF} :

$$wQI_{NSF} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i)(W_i)}{\sum_{i=1}^n (W_i)} \quad (2)$$

Para la obtención de la saturación de Oxígeno Disuelto en agua se consideran las ecuaciones del método estándar para determinar la concentración de oxígeno en valores de temperatura y presión no estándar (Forstner, H., & Gnaiger, E., 1983) mediante las siguientes ecuaciones:

$$DO_{SAT} = \frac{(100)(DO_{mg/L})}{C_p} \quad (3)$$

$$C_p = C^* P_{abs} \left(\frac{\left(\frac{1 - P_{wv}}{P_{abs}} \right) (1 - \theta P_{abs})}{(1 - P_{wv})(1 - \theta)} \right) \quad (4)$$

$$C^* = \exp[7.7117 - 1.31404 \ln(t + 45.93)] \quad (5)$$

$$P_{abs} = \frac{P_{ATM} + pgh}{101325} \quad (6)$$

$$P_{wv} = \exp \left[11.7591 - \left(\frac{3840.70}{T} \right) - \left(\frac{216961}{T^2} \right) \right] \quad (7)$$

$$\theta = 0.00975 - (1.426 \times 10^{-5}t) + (6.436 \times 10^{-8}t^2) \quad (8)$$

$$T = t + 271.150 \quad (9)$$

Donde: $DO_{mg/L}$ es el nivel de oxígeno disuelto medido; C_p es la concentración de equilibrio de oxígeno a presión no estándar en mg/L ; DO_{SAT} es la saturación de oxígeno disuelto en el agua; C^* es la concentración de equilibrio de oxígeno a presión estándar de 1 atm en mg/L ; t es la temperatura en $^{\circ}C$ medida; P_{abs} es la presión absoluta no estándar en atm ; P_{wv} es la presión parcial de vapor de agua; θ es el coeficiente de determinación; P_{ATM} es la presión atmosférica del lugar de muestreo; ρ es la densidad del agua; g el valor de la constante gravitacional; h la profundidad del punto muestra; T es la temperatura en $^{\circ}K$.

Cabe mencionar que, al momento de evaluar el parámetro temperatura, el wQI_{NSF} requiere de una diferencia de temperaturas a ser evaluada en conjunto con los demás parámetros, considerando la temperatura de la superficie menos la temperatura del fondo; sin embargo, esta consideración es muy somera en el caso de lagos, ya que de acuerdo a la temporada estacional en la que se encuentren, podrían estar estratificados (Boehrer & Schultze, 2008); si ese fuese el caso, la variación de la temperatura de la superficie respecto del fondo será considerablemente amplia en comparación a una etapa de circulación o mezcla, donde suele ser constante. Sin embargo, apegándonos al wQI_{NSF} , se obtiene la diferencia entre los cero metros de profundidad y la última medición obtenida de acuerdo con la profundidad máxima alcanzada.

El wQI_{NSF} es el indicador más utilizado por ser desarrollado para proporcionar un método estandarizado con el objetivo de comparar la calidad del agua de los diversos cuerpos de agua a nivel internacional, resultando ser eficiente para la evaluación y conservación de los mismo.