



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN COMPUTACIÓN

**Sistema embebido para el monitoreo de
ecosistemas acuáticos mediante el procesamiento
de parámetros limnológicos**

T E S I S

**PARA OBTENER EL GRADO DE
Maestría en Ciencias en Ingeniería de Cómputo**

P R E S E N T A

**ING. ÚRSULA SAMANTHA
MORALES RODRÍGUEZ**

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ JUAN CARBAJAL HERNÁNDEZ



**Centro de Investigación
en Computación**
Instituto Politécnico Nacional

México, Ciudad de México, Mayo 2018



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 12:00 horas del día 22 del mes de mayo de 2018 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del:
Centro de Investigación en Computación
para examinar la tesis titulada:

“Sistema embebido para el monitoreo de ecosistemas acuáticos mediante el procesamiento de parámetros limnológicos”

Presentada por el alumno:

Morales Apellido paterno	Rodríguez Apellido materno	Ursula Samantha Nombre(s)							
		Con registro:	B	1	6	0	5	2	0

aspirante de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE CÓMPUTO**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA Director de Tesis

Dr. José Juan Carbajal Hernández

Dr. Sergio Suárez Guerra

Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández

Dr. Herón Molina Lozano

Dr. Ignacio Hernández Bautista

Dr. Ricardo Barrón Fernández



PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Marco Antonio Ramírez Salinas

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN COMPUTACIÓN




INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 07 del mes de junio del año 2018, la que suscribe Ing. Úrsula Samantha Morales Rodríguez alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Cómputo con número de registro B160520, adscrita al Centro de Investigación en Computación, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Jose Juan Carbajal Hernández y cede los derechos del trabajo intitulado Sistema embebido para el monitoreo de ecosistemas acuáticos mediante el procesamiento de parámetros limnológicos, 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 expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección smoralesr-ipn@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Ing. Úrsula Samantha Morales Rodríguez

Nombre y firma

RESUMEN

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 y el análisis de zonas lacustres. Dicho trabajo, propone la creación de un sistema embebido para el monitoreo de ecosistemas acuáticos mediante el procesamiento de parámetros limnológicos; turbidez, temperatura, oxígeno disuelto y profundidad, con el objetivo de evaluar diversas zonas en aguas continentales para poder clasificarlas de acuerdo con la densidad de peces presentes en el ecosistema.

ABSTRACT

Lake Zirahuen is showing signs of erosion, so it is important to take the necessary actions for its conservation. The lack of technological resources that provide efficient methods of analysis in the ecosystem is a constant that affects the research of biodiversity in the lake, so this work was developed to be a specialized tool in the evaluation and the analysis of lake areas. This work proposes the creation of an embedded system for the monitoring of aquatic ecosystems by processing limnological parameters such as turbidity, temperature, dissolved oxygen and depth, with the aim of evaluating different zones in continental waters in order to classify them according to the density of fish present in the ecosystem.

ÍNDICE

Índice de figuras	11
Índice de Tablas.....	15
1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Problemática	17
1.3 Justificación	18
1.4 Solución propuesta.....	18
1.5 Alcance	19
1.6 Hipótesis	19
1.7 Objetivos.....	19
1.8 Metodología de la investigación	20
1.9 Contribuciones esperadas	22
1.10 Estructura de la tesis.....	22
2 ESTADO DEL ARTE	24
2.1 Trabajos similares	24
2.2 Sondas multiparamétricas (YSI).....	26
2.3 Mediciones en el lago de Zirahuén	27
3 MARCO TEÓRICO	29
3.1 Ecosistemas Acuáticos.....	29
a) Aguas Continentales.....	29
b) Lagos	30
c) Clasificación de los lagos por su estratificación térmica	30
d) Zona Fóptica.....	31

3.2	Lago de Zirahuén.....	32
3.3	CRIP-INAPESCA.....	34
3.4	Limnología.....	34
a)	Latitud	35
b)	Longitud	37
c)	Turbidez	38
d)	Temperatura	39
e)	Oxígeno Disuelto.....	39
f)	Profundidad.....	39
3.5	Zonas Bióticas.....	40
a)	Estado Trófico.....	40
b)	Cadena Trófica.....	40
3.6	Especies Endémicas del lago de Zirahuén.....	41
a)	<i>Menidia estor</i> (pecado blanco).....	41
b)	<i>Algansea lacustris</i> (Acúmara)	43
c)	<i>Allotoca meeki</i> (tiro de Zirahuén).....	45
d)	<i>Micropterus salmoides</i> (Lobina negra)	46
e)	Influencia de los parámetros limnológicos en las especies del lago de Zirahuén 47	
3.7	Sistema de Coordenadas	48
a)	Conversión de grados decimales minutos (DDM) a grados decimales (DD)	49
3.8	Sistemas de Inferencia Difusa.....	49
3.9	Software de Desarrollo	56
a)	LabVIEW	56
b)	Proteus.....	61

c)	Arduino.....	63
3.10	Sensores y adquisición de datos	63
d)	DS18B20	64
e)	SEN0189	65
f)	Sensor de Oxígeno Disuelto	66
g)	NEO 6M GPS.....	68
h)	Protocolos de Comunicación I ² C y UART	70
i)	EEPROM AT24C512B.....	70
4	MODELO DE EVALUACIÓN.....	72
4.1	Introducción.....	72
4.2	Sistema de inferencia difusa	72
a)	Entradas	73
b)	Funciones de pertenencia	75
c)	Reglas de razonamiento	78
d)	Agregación y defuzzificación.....	81
e)	Índice Biótico Lacustre	83
5	DESARROLLO E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA	84
5.1	Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos	84
a)	Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos - Embebido (SMEA-E).....	84
b)	Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos - Distribuido (SMEA-D)	85
a)	EEPROM.....	88
5.2	Dispositivo Contenedor Sumergible.....	89
a)	Dispositivo de Adquisición de Datos	89
5.3	Sistema de Análisis y Monitoreo Limnológico (SAM-L).....	104
a)	Software de medición.....	104

b)	NI fuzzy logic API	112
c)	Software de Visualización.....	115
6	RESULTADOS Y DISCUSIONES.	119
6.1	Sitio de muestreo	119
6.2	Comportamiento del Ecosistema Acuático.....	121
6.3	Análisis del Ecosistema Acuático.....	124
a)	Análisis y clasificación del ecosistema a 0 metros.	125
b)	Análisis del ecosistema a 5 metros.....	126
c)	Análisis del ecosistema a 10 metros.....	127
6.4	Análisis global	130
6.5	Discusiones.....	131
a)	Mediciones actuales vs mediciones obtenidas en 2002	131
b)	Evaluación del IBL.....	133
7	CONCLUSIONES.....	134
	Referencias	135

Índice de figuras

Fig. 1.1 Vista aérea del lago de Zirahuén.....	16
Fig. 1.2 Diagrama del proceso de investigación.....	20
Fig. 3.1 Descripción gráfica de ecosistemas acuáticos.....	29
Fig. 3.2 Estratificación térmica de un lago.....	31
Fig. 3.3 Clasificación de zonas fóticas.....	32
Fig. 3.4 Vista superior del lago de Zirahuén.....	33
Fig. 3.5 Centro Regional de Investigación Pesquera - Pátzcuaro.....	34
Fig. 3.6 Diagrama de Rawson.....	36
Fig. 3.7 Descripción gráfica de Latitud.....	37
Fig. 3.8 Descripción gráfica de Longitud.....	38
Fig. 3.9 Cascada de Estado Trófico.....	41
Fig. 3.10 Espécimen Menidia Estor.....	42
Fig. 3.11 Espécimen Algansea lacustris.....	44
Fig. 3.12 Espécimen Allotoca meeki.....	45
Fig. 3.13 Espécimen Micropterus salmoides.....	46
Fig. 3.14 Ejemplificación de razonamiento difusa.....	50
Fig. 3.15 Funciones de membresía más comunes.....	51
Fig. 3.16 Función de membresía Trapezoidal.....	51
Fig. 3.17 Función de membresía triangular.....	52
Fig. 3.18 Propiedades básicas de conjuntos difusos.....	52
Fig. 3.19 Diagrama general de un Sistema de Inferencia Difuso.....	53
Fig. 3.20 Determinación de la salida difusa por el centro del método de gravedad.....	56
Fig. 3.21 GUI Fuzzy System Designer.....	61
Fig. 3.22 Software de desarrollo PROTEUS.....	62
Fig. 3.23 GUI Arduino IDE.....	63
Fig. 3.24 Sensor DS18B20.....	64
Fig. 3.25 Conexión del sensor SEN0189 con la tarjeta Arduino.....	66
Fig. 3.26 Sensor de Oxígeno disuelto.....	67
Fig. 3.27 Circuito EZO para Oxígeno disuelto.....	68
Fig. 3.28 GPS NEO-6M.....	68

Fig. 3.29 Lectura GPS	69
Fig. 4.1 Diagrama conceptual del sistema difuso.....	73
Fig. 4.2 Funciones de pertenencia del Oxígeno Disuelto	76
Fig. 4.3 Funciones de pertenencia de la Temperatura	76
Fig. 4.4 Funciones de pertenencia de la Turbidez	77
Fig. 4.5 Funciones de pertenencia de la Profundidad.....	78
Fig. 4.6 Funciones de pertenencia del IBL.....	81
Fig. 4.7 Diagrama de inferencia difusa para la evaluacion del indice biotico lacustre con tres cuatro variables y dos reglas. Reglas 34 y 35 se usan para mostrar el proceso de defuzzificació.....	82
Fig. 5.1 Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos - Embebido	84
Fig. 5.2 Diagrama general del Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos (distribuido)	85
Fig. 5.3 Diagrama de flujo del proceso de adquisición de datos	86
Fig. 5.4 Diagrama de flujo del proceso de analisis de datos	87
Fig. 5.5 Diagrama esquemático del Dispositivo Sumergible	88
Fig. 5.6 Diagrama esquemático del Dispositivo Contenedor Sumergible.....	90
Fig. 5.7 Placa de medición en 3D.....	91
Fig. 5.8 Conexión del sensor de temperatura en el PCB	92
Fig. 5.9 Código de la función temperatura	92
Fig. 5.10 Conexión del sensor de Oxigeno disuelto en el PCB.....	93
Fig. 5.11 Código de programación del sensor de oxígeno disuelto.....	94
Fig. 5.12 Conexión del sensor de turbidez en el PCB	95
Fig. 5.13 Código de programación de la función turbidez.	95
Fig. 5.14 Código de programación de la función nivel	96
Fig. 5.15 Tarjeta de Adquisición de datos.	97
Fig. 5.16 Código de programación de la función principal	97
Fig. 5.17 Dispositivo GPS	98
Fig. 5.18 Vista frontal del MCTR.....	99
Fig. 5.19 Vista lateral del MCTR sin tapa.....	99
Fig. 5.20 Vista superior del MCTR sin tapa.....	100

Fig. 5.21 Plano del MCTR sin tapa	100
Fig. 5.22 Isométrico del MCTR con tapa	101
Fig. 5.23 Vista lateral de la tapa del MCTR.....	101
Fig. 5.24 Vista superior de la tapa del MCTR.....	102
Fig. 5.25 Isométrico de la tapa del MCTR	102
Fig. 5.26 Visualizacion 3D del MCTR completo.....	103
Fig. 5.27 MCTR	103
Fig. 5.28 GUI del Software de Medición del SAM-L.....	104
Fig. 5.29 Bloque de la configuración serial GPS	106
Fig. 5.30 Lectura exitosa y fallisa provenientes del DGPS	106
Fig. 5.31 Bloque de la configuración serial del DCS	107
Fig. 5.32 Programación general del Software de Medición	108
Fig. 5.33 Programación del bloque encargado de selección de carácter	109
Fig. 5.34 Programación del bloque encargado de la comunicación serial	109
Fig. 5.35 Programación del bloque encargado de obtener y separar los datos medidos	109
Fig. 5.36 Programación del bloque encargado de actualizar valores	110
Fig. 5.37 Programación del bloque encargado de almacenar los datos en la base de datos	110
Fig. 5.38 Programación del bloque encargado realizar la conexion serial para lectura de datos del DGPS	110
Fig. 5.39 Programación del bloque encargado de la validación de la lectura del GPS	111
Fig. 5.40 Programación del bloque encargado de la conversión de coordenadas geográficas	111
Fig. 5.41 Programación del bloque encargado de graficar los datos extraídos.	111
Fig. 5.42 Variables lingüísticas del FIS.....	112
Fig. 5.43 Funciones de pertenencia del FIS	114
Fig. 5.44 Reglas de razonamiento del FIS.....	115
Fig. 5.45 GUI del Software de Visualizacion del SAM-L	115
Fig. 5.46 Programación general del Software de Visualización.....	117
Fig. 5.47 Programación del bloque encargado de la obtención de datos.....	117
Fig. 5.48 Programación del bloque encargado de la visualización de los datos.....	118
Fig. 5.49 Programación del bloque encargado la implementación del FIS	118

Fig. 6.1 Lago de Zirahuén con los puntos geográficos etiquetados	120
Fig. 6.2 Oxígeno disuelto (mg/L) medido respecto de la profundidad (m.) en el Lago de Zirahuén, durante los días 04 y 05 de mayo del año 2018 en los 8 puntos georreferenciados.	121
Fig. 6.3 Temperatura (°C) medida respecto de la profundidad (m.) en el Lago de Zirahuén, durante los días 04 y 05 de mayo del año 2018 en los 8 puntos georreferenciados.	122
Fig. 6.4 Turbidez (NTU) medida respecto de la profundidad (m.) en el Lago de Zirahuén, durante los días 04 y 05 de mayo del año 2018 en los 8 puntos georreferenciados.	123
Fig. 6.5 GUI del Software de Visualización representando la evaluación del IBL a 0 metros.	125
Fig. 6.6 Niveles de Oxígeno disuelto, Temperatura y Turbidez de los 8 puntos georreferenciados a una profundidad de 0 metros.	126
Fig. 6.7 GUI del Software de Visualización representando la evaluación del IBL a 5 metros.	126
Fig. 6.8 Niveles de Oxígeno disuelto, Temperatura y Turbidez de los 8 puntos georreferenciados a una profundidad de 5 metros.	127
Fig. 6.9 GUI del Software de Visualización representando la evaluación del IBL a 10 metros.	127
Fig. 6.10 Niveles de Oxígeno disuelto, Temperatura y Turbidez de los 8 puntos georreferenciados a una profundidad de 10 metros.	128
Fig. 6.11 GUI del Software de Visualización representando la evaluación del IBL a 13 metros.	129
Fig. 6.12 Niveles de Oxígeno disuelto, Temperatura y Turbidez de los 8 puntos georreferenciados a una profundidad de 13 metros.	129
Fig. 6.13 Índice Biótico Lacustre (IBL) promedio de cada punto georreferenciado a las diferentes profundidades medidas en el lago de Zirahuén, evaluado con las mediciones obtenidas el 04 y 05 de mayo del año 2018.	130
Fig. 6.14 Comparación del comportamiento de los niveles de Oxígeno disuelto en el año 2002 y 2018	131
Fig. 6.15 Comparación del comportamiento de la temperatura en el año 2002 y 2018	132

Fig. 6.16 Evaluación del IBL con base en la cantidad de especies encontradas en el lago de Zirahuén en 2004.....	133
--	-----

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Rangos de valores necesarios para la especie <i>Menidia estor</i>	43
Tabla 3.2 Rangos de valores necesarios para la especie <i>Algansea lacustris</i>	45
Tabla 3.3 Rangos de valores necesarios para la especie <i>Allotoca meeki</i>	46
Tabla 3.4 Rangos de valores necesarios para la especie <i>Micropterus salmoides</i>	47
Tabla 3.5 Función de membresía trapezoidal.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3.6 Función de membresía triangular	52
Tabla 4.1 Variables de entrada del sistema de inferencia difusa.....	73
Tabla 4.2 Valores ideales, mínimos y máximos de cada parámetro involucrado en el Sistema de inferencia difusa correspondiente a cada especie acuática	74
Tabla 4.3 Valores de los parámetros involucrados en las funciones de pertenencia.....	75
Tabla 4.4 Funciones de pertenencia de la variable Oxígeno	75
Tabla 4.5 Funciones de pertenencia de la variable Temperatura	76
Tabla 4.6 Funciones de pertenencia de la variable Turbidez	77
Tabla 4.7 Funciones de pertenencia de la variable Profundidad	77
Tabla 4.8 Reglas de Razonamiento del FIS.....	79
Tabla 4.9 Funciones de pertenencia de salida (IBL)	81
Tabla 6.1 Latitud y Longitud de los 8 puntos muestreados.....	119

CAPITULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La fisiografía del estado de Michoacán se encuentra dominada por un conjunto de cuencas endorreicas, entre los que destacan por su extensión, importancia cultural y biológica los lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén. Entre éstos, el lago de Zirahuén es el más pequeño, lo cual lo hace el menos conocido desde el punto de vista del análisis de su biodiversidad (Pérez, 1996). Este se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, dentro de la región hidrológica de la cuenca del Balsas. Es un lago monomítico, oligotrófico, de tipo endorreico y posee una profundidad máxima de 43 m. En la Figura 1.1, se muestra el lago de Zirahuén.



Fig. 1.1 Vista aérea del lago de Zirahuén.

Es importante mencionar que el lago de Zirahuén, es un lago de origen volcánico (represamiento) que ha sido descrito como monomítico cálido con estratificación térmica de marzo a noviembre y mezclado de diciembre a febrero. En comparación con otros lagos mexicanos, las características limnológicas más notables de Zirahuén son su profundidad, turbidez, temperatura y estado trófico, que parecen contradictorios dado el acentuado uso industrial y agrícola de la cuenca (Chacón y Múzquiz, 1991).

1.2 Problemática

Actualmente la cuenca y el lago muestran signos de deterioro, ocasionados por la explotación irracional de sus recursos, por lo que es urgente tomar las medidas necesarias a corto, mediano y largo plazo, para su conservación (Díaz-Vargas, Elizalde Arriaga, Quiróz Castelán, García Rodríguez, & Molina Estudillo, 2005). Además, la falta de recursos tecnológicos que provean métodos eficientes de análisis en el ecosistema es una constatación que afecta a la investigación de la biodiversidad del lago de Zirahuén, ya que las mediciones de los parámetros limnológicos de éste, suelen ser tardados y poco precisos (Aguilar Ramirez, Flores Santillan, & González Ania, 2012).

En la actualidad, los habitantes de Zirahuén no están en condiciones de producir de manera independiente los bienes de subsistencia, por eso, además de la agricultura, la mayoría de ellos complementan su ingreso realizando actividades de pesca. Aunado a lo anterior, la población de Zirahuén está especialmente preocupada por el lago, ya que este presenta una degradación equivalente a 300 años en un proceso natural (Madrigal, 2004), pues, aunque el lago de Zirahuén es una de las principales fuentes de agua para uso doméstico, éste recibe la descarga de los drenajes de poblados vecinos. Esta degradación puede tener repercusiones que van desde la pérdida de actividades económicas, como la pesca y el turismo, hasta cuestiones de salud pública derivadas de enfermedades por la contaminación del agua.

1.3 Justificación

Hoy en día, los sistemas de medición de parámetros limnológicos y calidad del agua carecen de metodologías de precisión y de tecnología de punta para realizar estudios a profundidad sobre las zonas con mayor biodiversidad dentro del lago. Es por eso, que la necesidad de implementar herramientas basadas en inteligencia artificial y lógica difusa en dispositivos de bajo costo es necesario, por lo que el implementar una sonda de alta tecnología con hardware y software avanzado para el análisis y medición del lago de Zirahuén servirá de gran apoyo para realizar un diagnóstico más preciso de la biodiversidad y el estado en el que se encuentra este.

A pesar de la importancia que tiene este lago en la región, los estudios que se han hecho sobre este en el aspecto limnológico ya tienen una gran cantidad de años de antigüedad. Algunos limnólogos que han estudiado este lago son Ordoñez, Pérez, Traconis y Rojas en 1982; Chacón-Torres y Muzquiz en 1991; Bernal-Brooks en 1988; Bernal-Brooks y MacCrimmon en 2000 y finalmente Bernal-Brooks, Dávalos-Lind y Lind en 2002 (Martínez y Tavera, 2005).

1.4 Solución propuesta

Este trabajo propone la creación de un sistema embebido para el monitoreo de ecosistemas acuáticos mediante el procesamiento de parámetros limnológicos, tomando en cuenta cuatro de los factores más relevantes en los cuerpos de agua continentales; turbidez, temperatura, oxígeno disuelto y profundidad (Ramírez, Restrepo, & Viña, 1997), con el objetivo de evaluar las zonas lacustres medidas y poder clasificarlas de acuerdo con la densidad de peces presentes en el ecosistema. Asimismo, se propone la creación de una interfaz visual en la cual se especifican puntos de medición, así como el análisis de estos.

La realización de este proyecto necesita utilizar una serie de sensores, los cuales medirán cada parámetro. Posteriormente, los valores obtenidos serán analizados y procesados por medio de un modelo de razonamiento difuso, el cual evaluará dichos parámetros en conjunto para poder emitir un indicador de evaluación por zona lacustre medida. En el proceso de integración, se obtendrá así la interfaz gráfica de usuario que permitirá el

monitoreo de las mediciones, así como la visualización de la información obtenida después de la evaluación previamente mencionada. Con el desarrollo de este proyecto se ayudará a los hidrobiólogos a realizar un mejor estudio sobre la biodiversidad y el estado del lago de Zirahuén al obtener mediciones más precisas y de manera más rápida y sencilla.

1.5 Alcance

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

- Desarrollo de un sistema de medición de parámetros limnológicos, que ayude a realizar las mediciones de forma más rápida, precisa y sencilla.
- Creación de un modelo de razonamiento difuso que evalúe adecuadamente zonas propicias para sustentar la biodiversidad acuática dentro de ellas.
- Desarrollo de una interfaz especializada para la interacción del sistema, el almacenamiento de información, creación de base de datos, así como del análisis y visualización de resultados.

1.6 Hipótesis

Es posible identificar zonas adecuadas para diversidad biótica en ecosistemas acuáticos, mediante el uso de un modelo de razonamiento difuso que evalúe las zonas lacustres y el diseño de un sistema embebido que permita el procesamiento de los parámetros limnológicos.

1.7 Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema computacional para el monitoreo de zonas bióticas en ecosistemas acuáticos mediante el procesamiento de parámetros limnológicos.

Objetivos Específicos

- O1.** Estudiar y definir la limnología y aquellos parámetros relacionados en ecosistemas acuáticos.
- O2.** Elaborar un modelo para la evaluación de zonas propicias para el desarrollo de especies endémicas mediante aspectos limnológicos.
- O3.** Diseñar y desarrollar un sistema electrónico de supervisión y medición de señales limnológicas.
- O4.** Elaborar un software de tratamiento de la información.
- O5.** Realizar pruebas de campo.

1.8 Metodología de la investigación

La metodología empleada para el presente trabajo es la siguiente:

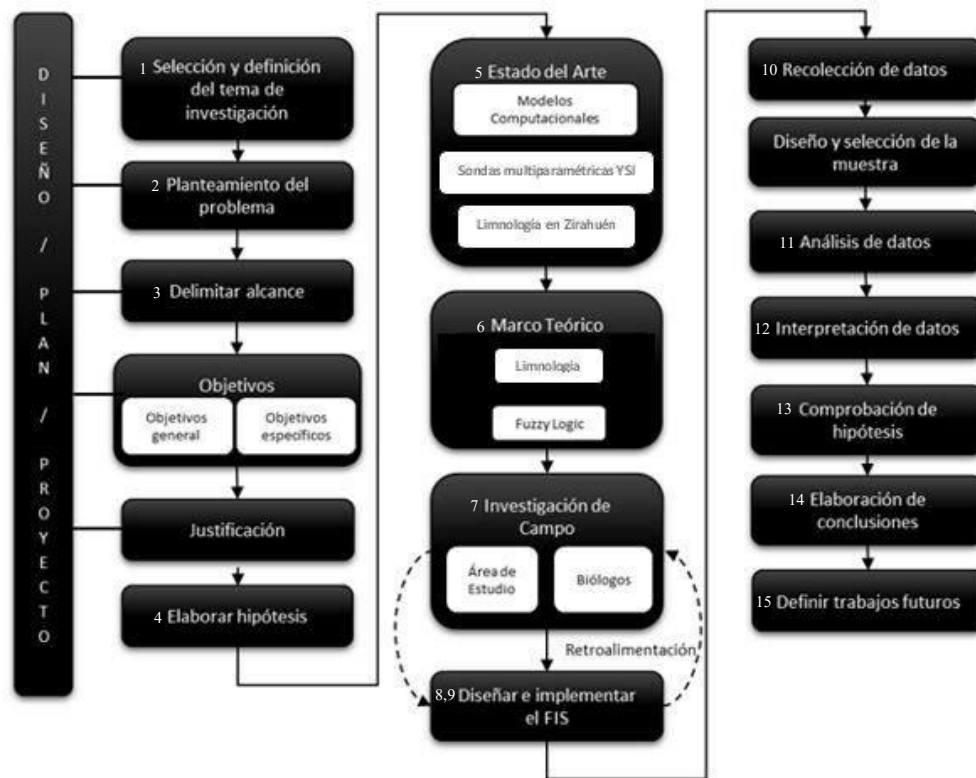


Fig. 1.2 Diagrama del proceso de investigación.

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:

- a) El desarrollo de un sistema embebido para el monitoreo y análisis de parámetros limnológicos en cuerpos de agua continentales (lagos y zonas costeras).
- b) Creación de un modelo computacional para la evaluación de zonas de interés, mediante los parámetros limnológicos de importancia para las poblaciones acuícolas.
- c) Desarrollo de hardware de medición de los parámetros involucrados.
- d) Software especializado para la visualización de la información obtenida.

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 las diversas sondas existentes 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, parámetros

medidos, tecnología utilizada, así como de las características de la fauna endémica del caso de estudio.

- El *capítulo 4* describe a detalle el modelo de evaluación utilizado en el proyecto.
- El *capítulo 5* detalla la metodología implementada, así como materiales y herramientas tecnológicas utilizadas en las distintas etapas de la investigación.
- El *capítulo 6* muestra un análisis de los resultados experimentales obtenidos en la investigación, así como la interpretación de los mismos.
- Finalmente se presentan las conclusiones derivadas de la investigación y la consideración del trabajo a futuro por realizar.

CAPITULO II

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Trabajos similares

En los últimos años se han hecho diversas publicaciones relacionadas con la batimetría y la Limnología. A continuación, se mencionan los más relevantes.

a) Bridging the gap between terrestrial, riverine and limnological research: Application of a model chain to a mesotrophic lake in North America.

Esta investigación fue publicada en el 2008, el proyecto investigó si los modelos de captación basados en procesos (INCA-N e INCA-P) podrían impulsar con precisión un modelo de lago (PROTECH), para salvar una brecha entre la investigación terrestre, fluvial y limnológica. Para esto fue necesario medir el oxígeno disuelto a diferentes profundidades en un total de 20 lagos Finalmente, se concluyó que es importante modelizar los lagos para comprender sus procesos físicos y ecológicos (Crossman y Elliot, 2008).

b) Evaluation of the GPR in the bathymetry estimate of a decanting water treatment plant using the free software “GPR bathymetry” in the radargrams analysis.

Esta publicación fue hecha en el 2017, el propósito de la investigación fue el evaluar el desempeño del GPR por sus siglas en inglés (Ground Penetrating Radar), para aplicaciones batimétricas en un entorno controlado. Este se llevo acabo en una planta de tratamiento de agua, al final el proyecto mostró resultados prometedores (de Faria, et. Al, 2017).

c) An integrated bathymetric and seismic profiling system.

En este proyecto publicado en el 2017, se desarrolló un sistema que integra mediciones batimétricas y sísmicas. El sistema consiste en un transductor activo, un streamer de hidrófono y una unidad electrónica. Su funcionamiento es el siguiente, las ondas de la fuente viajan a través del agua hasta el sedimento, aquí una parte es reflejada de vuelta a la superficie y la otra penetra las capas internas, este fenómeno continúa hasta que la

energía acústica se disipa completamente, al final este sistema resultó ser adecuado para mediciones a profundidad ya que alcanza los 800 metros (Oberreuter, et. Al, 2017).

d) Batimetria e estudo de parâmetros morfométricos do reservatório da floresta estadual “edmundo navarro de andrade” (FEENA) RIO CLARO/SP.

Este trabajo fue publicado en el 2014, y describe la inspección batimétrica, así como la caracterización de los principales parámetros morfométricos del bosque estatal. 271 valores de profundidad fueron medidos a lo largo de 10 puntos, estos datos se utilizaron para estimar los mapas batimétricos que sirvieron de base para el cálculo de los principales parámetros morfométricos (Cigagna, et. Al, 2014).

e) Bathymetry estimation of the sacco reservoir-pe with the help of orbital data.

En este proyecto realizado en el 2003, se observó como la batimetría de una masa de agua puede medirse utilizando sondas batimétricas; sin embargo, este proceso es costoso y tardado. Cabe mencionar, que los modelos de regresión se ajustaron entre los valores batimétricos recogidos con una sonda, las bandas espectrales verde y de infrarrojo cercano del satélite Landsat 5 TM. Al final se comprobó que este dispositivo proporciona una precisión satisfactoria para estimar los valores batimétricos (Lima, et. Al, 2013).

f) Análisis morfométrico y batimétrico del lago de Pomacochas (Perú).

Este trabajo fue realizado en el 2015, para llevarlo a cabo se utilizó una lancha de motor para ir a las 25 estaciones establecidas, teniendo un total de 427 mediciones a lo largo de todo el espejo del agua. Para la caracterización del lago se realizó la batimetría y se calcularon los parámetros morfométricos primarios (volumen, área del lago, perímetro, longitud máxima, amplitud máxima y profundidad máxima). Finalmente, se realizó el mapa batimétrico y modelos tridimensionales (Castillo et al, 2018).

g) A hydrobiological study to interpret the presence of desmids in Lake Zirahuén, México.

Este trabajo consistió en tomar muestras de agua del lago de Zirahuén, para analizar, monitorear y observar la temperatura y el oxígeno, con la finalidad de buscar factores ambientales que expliquen la presencia constante de algas (desmid) en un lago tropical

mexicano. Se concluyó que Zirahuén tiene un ambiente lacustre adecuado para las algas (Martínez y Tavera, 2005)

2.2 Sondas multiparamétricas (YSI)

En la actualidad, el mercado ofrece diversos dispositivos capaces de medir distintos parámetros, es decir, multiparamétricas. Estas herramientas son bastante útiles para mediciones en ambientes controlados y donde no se necesita una gran profundidad, cabe mencionar que tienen un costo elevado, a continuación, se enlistan unos ejemplos.

a) *YSI ProDSS*

Este sensor tiene un costo aproximado de 3,240 dólares, es capaz de medir cuatro parámetros cualesquiera (temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, pH, redox y turbidez.) y la profundidad. Además de esto, los datos se pueden guardar en una memoria USB ("YSI Calidad Del Agua Medidores", 2018).

b) *Sonda multiparamétrica 6600V2*

Esta sonda multiparamétrica sirve para monitorear la calidad del agua hasta una profundidad máxima de 200 metros. Los parámetros que mide son: salinidad, temperatura, profundidad, pH, oxígeno disuelto, turbidez, clorofila y algas verdesazules, su valor en el mercado es de 11,000 dólares ("Sonda multiparamétrica 6600V2", 2018).

c) *Medidor multiparamétrico de campo con GPS, HI 9829.*

Es un dispositivo capaz de monitorear ríos, pantanos, lagos, captaciones de agua, plantas de tratamiento de aguas, con aplicación específica para control de parámetros biológicos, tales como Nitratos, Amonio y Cloruros; así como Turbidez; su costo puede variar desde los 3,394 a los 5,747 euros, según la longitud de la sonda (info@xpora.es/, 2018).

2.3 Mediciones en el lago de Zirahuén

En las últimas décadas se realizaron diversas publicaciones relacionadas con aspectos Limnológicos referentes al lago de Zirahuén. A continuación, se mencionan lo más relevantes.

- a) *Hydrobiological study to interpret the presence of desmids in Lake Zirahuén, México*

En éste trabajo se realizaron mediciones mensuales de fitoplancton, las cuales fueron soportadas por datos fisicoquímicos y niveles de concentraciones de clorofila en la búsqueda de factores ambientales particulares que pudieran explicar la presencia constante de algas en un lago tropical mexicano; Zirahuén. Se tomaron muestras de la columna de agua en la parte más profunda del lago (40 m) y se intensificaron en la zona metalimnética, cuyo establecimiento fue monitoreado mediante valores de temperatura y perfiles de oxígeno. El comportamiento general del lago Zirahuén fue típico de los lagos tropicales monomícticos cálidos a gran altura. La profundidad reveló un epilimnión bien iluminado, lo que sugiere que es poco probable que las comunidades de fitoplancton estén limitadas por la luz. La naturaleza oligotrófica del lago se indicó por las concentraciones discretas de nutrientes inorgánicos. Éstas características junto con una baja concentración de calcio, definen un ambiente lacustre diferente a otros lagos mexicanos.

- b) *Basic limnology of 30 continental waterbodies of the Transmexican Volcanic Belt across climatic and environmental gradientssam*

El estudio, implementa metodologías convencionales para estudiar 30 cuerpos de agua en la Faja Volcánica Transmexicana a lo largo de un gradiente altitudinal (737 a 4283 msnm) y climatológico; entre ellos un análisis a profundidad del Lago de Zirahuén. Un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en ingles) también es implementado y demuestra que la temperatura y precipitación fueron los gradientes ambientales más importantes ligados con las características limnológicas, también menciona que los análisis de Procrustes indicó que para algunos lagos los factores geográficos generales fueron más importantes mientras para otros los factores locales

fueron determinantes, cabe mencionar que hace un gran énfasis en el estudio y conocimiento de la limnología y biodiversidad de los lagos mexicanos con la intención de plantear estudios más detallados y/o complejos que lleven a mejores estrategias de conservación y manejo de los recursos acuáticos.

c) *Flora y vegetación acuática del lago de Zirahuén, Michoacán, México.*

Éste trabajo, caracteriza de manera general al lago de Zirahuén; se describe la flora y la vegetación acuáticas del lago, representada por 35 familias, 55 géneros y 93 especies, de las cuales 27 son tolerantes, 42 subacuáticas y 24 acuáticas estrictas. Las formas de vida corresponden a los tipos de enraizadas emergentes, enraizadas sumergidas, enraizadas de hojas flotantes y libremente sumergidas. La vegetación se encuentra distribuida a lo largo de la línea de costa, presentándose a partir de las zonas de inundación temporal y en algunos casos hasta los 12 m de profundidad a manera de individuos aislados. Actualmente la cuenca y el lago muestran signos de deterioro, ocasionados por la explotación irracional de sus recursos, por lo que es urgente tomar las medidas necesarias a corto, mediano y largo plazo, para su conservación.

Estos trabajos y dispositivos sin duda representan una gran herramienta para el análisis de lagos y zonas costeras; sin embargo, los primeros tienen como desventaja que están diseñados para aplicaciones diferentes a las necesidades planteadas en la problemática como son el estudio de los parámetros limnológicos y la detección de la mejor zona lacustre para albergar la vida. Los segundos, las sondas, poseen gran tecnología con capacidad de medir diversos parámetros, pero sus altos costos los hacen inaccesibles para la mayoría de los investigadores en México. Mientras que los terceros nos muestran algunas gráficas que nos permitirán realizar comparativas entre valores obtenidos con el desarrollo del presente trabajo.

Es por eso que la realización de este proyecto ayudará a los hidrobiólogos mexicanos a tener una herramienta precisa y de bajo costo, que utilizando métodos de lógica difusa podrán obtener un mejor análisis y monitoreo, para así encontrar las mejores zonas bióticas en los lagos.

CAPITULO III

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Ecosistemas Acuáticos

Los ecosistemas acuáticos son todos aquellos ecosistemas que tienen por biotipo, es decir un conjunto de características morfológicas y fisiológicas de organismos vivos, algún cuerpo de agua, los cuales pueden ser: mares, océanos, ríos, lagos, pantanos, arroyos y lagunas, entre otros, tal y como se muestra en la Figura 3.1. Los dos tipos más destacados son: los ecosistemas de aguas oceánicas y los ecosistemas de aguas continentales (Davikevin, 1991).



Fig. 3.1 Descripción gráfica de ecosistemas acuáticos.

a) Aguas Continentales

Las aguas continentales son cuerpos de agua permanentes que se encuentran sobre o debajo de la superficie de la Tierra, alejados de las zonas costeras (excepto por las desembocaduras de los ríos y otras corrientes de agua). Estas corresponden a ríos, lagos, glaciares y aguas subterráneas (Vich, 1996).

b) Lagos

Se define como un cuerpo permanente de agua, generalmente dulce, de extensión considerable que recoge agua de diversos medios. De esta forma, según la procedencia del agua se pueden clasificar en los siguientes:

- **Lagos tectónicos:** Son aquellos que se localizan en zonas donde, debido a los movimientos de las placas terrestres, se han conformado fracturas en el terreno o depresiones en la corteza.
- **Lagos glaciares:** Estos deben su origen al movimiento de los glaciares cuando las lenguas de estas grandes masas de hielo erosionan el terreno, conformando zonas depresivas en las que se acumula el agua del deshielo.
- **Conformados en el cráter de volcanes:** Se originan en la depresión formada por el cráter de los volcanes. Presentan profundidades variables, en función de la amplitud del cráter.
- **Endorreicos:** Se forman debido a que, en determinadas depresiones, sin evacuación o salida, se almacena agua procedente de las precipitaciones.
- **Lagos embalsados:** Se originan al quedar cubierta o sellada la corriente de agua en determinados valles, debido a la acumulación de sedimentos o materiales terrestres.
- **Cársticos:** Son por regla general subterráneos debido a que nacen en zonas hundidas, principalmente de materiales calizos, grietas o fallas, donde el agua subterránea va erosionándolas y conformando grandes lagos subterráneos o cuevas (Johnes, et. Al, 1994).

c) Clasificación de los lagos por su estratificación térmica

La temperatura de un lago depende de la distribución y el flujo de la radiación solar. La masa de agua del lago no es uniforme, sino que se producen en ellos una estratificación según el eje de gravedad y radiación solar, que originará una variación de temperatura y de densidad desde la superficie hasta el fondo.

El resultado final del flujo de calor hacia el interior de la columna de agua es la formación de una termoclina a una determinada profundidad, quedando el lago estratificado en tres capas (Pérez, 2008):

- **Epilimnion:** Es la capa superficial de mayor temperatura, en contacto con la radiación solar directa. Registra temperaturas elevadas de forma progresiva según avanza la primavera y el verano.
- **Metalimnion:** Es la zona de transición entre el Epilimnion y el hipolimnion. Constituye el punto de inflexión del perfil de temperaturas. Además, es en esta capa donde se sitúa la Termoclina (la parte donde se produce un descenso brusco de la temperatura).
- **Hipolimnion:** Capa inferior de baja y homogénea temperatura.

En la Figura 3.2, se muestran las capas en las que se dividen un lago según su estratificación térmica.

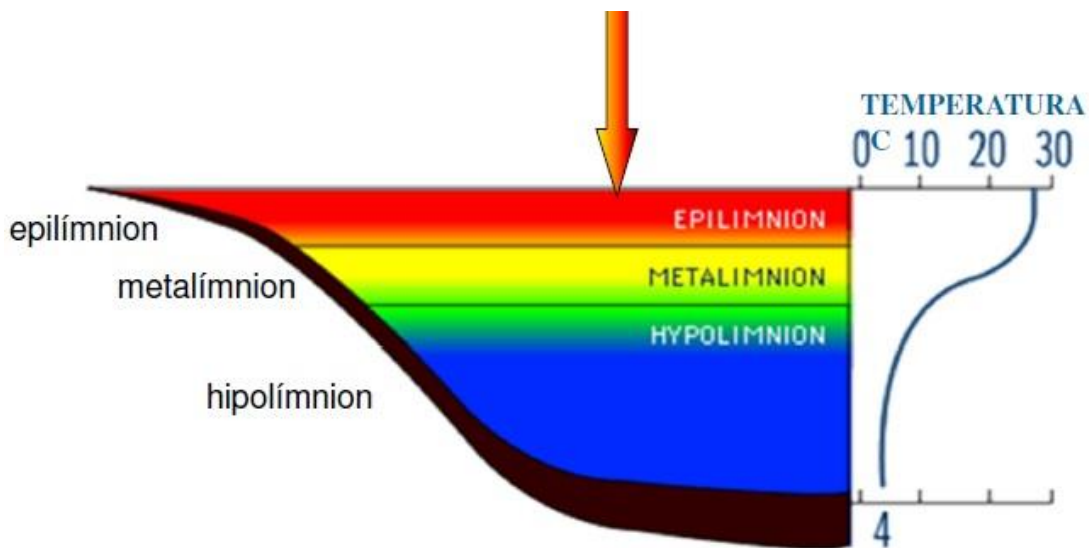


Fig. 3.2 Estratificación térmica de un lago.

d) Zona Fótica

En los ecosistemas marinos y lacustres la zona fótica es aquella en la que penetra la luz del sol. Su profundidad es muy variable en función de la turbidez del agua.

Se llama profundidad eufótica o nivel eufótico a la profundidad en la que la intensidad de la luz queda reducida a un 1% de la que ha penetrado la superficie, el límite por debajo del cual no queda luz suficiente para la fotosíntesis, a partir de este límite existe una zona llamada disfótica en la que la penetración de luz es escasa y, como consecuencia, también lo es la fotosíntesis. Se encuentra entre las zonas afótica y fótica, de la que puede ser considerada como parte inferior.

La zona afótica, es aquella que no está iluminada por la luz solar y por lo tanto no existe organismos fotosintéticos (Margalef, 1974). En la Figura 3.3, se ilustra estas zonas.

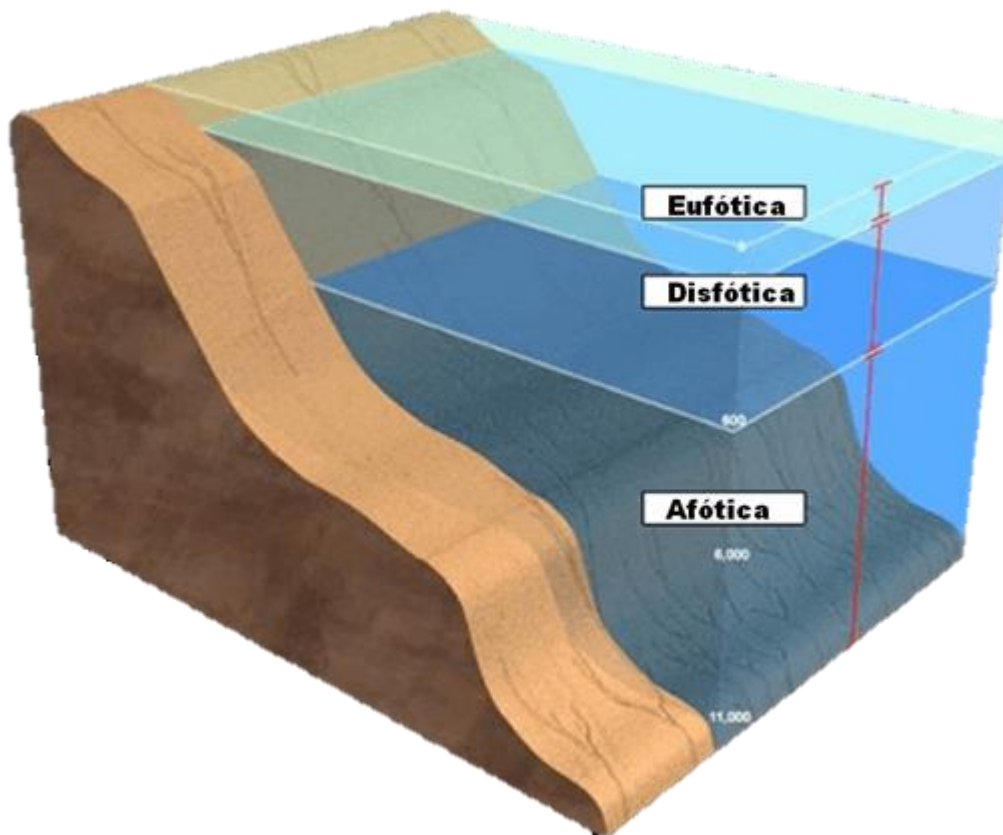


Fig. 3.3 Clasificación de zonas fóticas.

3.2 Lago de Zirahuén

La cuenca del Lago de Zirahuén, también llamado “Espejo de los Dioses”, está localizada en el centro del estado de Michoacán, en la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico

Transversal, tiene una superficie aproximada de 270 km², delimitada por serranías y lomeríos, impidiendo la salida de agua, por lo cual puede ser catalogado como un lago del tipo endorreico (CONABIO, 2005).

Se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, dentro de la región hidrológica de la cuenca del Balsas, entre las coordenadas 19°21'10" y 19°29'24" Latitud Norte y 101°29'37", 101°49'37" de Longitud Oeste, donde el lago está a 2075 m s.n.m.



Fig. 3.4 Vista superior del lago de Zirahuén.

El lago de Zirahuén posee una profundidad máxima de 43 m y al tratarse de una cuenca endorreica, es hogar de varias especies endémicas, entre las que destacan el pez *Allotoca meeki* (tiro de Zirahuén) y el *Chirostoma Estor Estor* (pez blanco). Entre las principales actividades económicas están la pesca, ganadería, agricultura y turismo, siendo la pesca y el turismo sus principales sustentos (De Buen, 1943).

3.3 CRIP-INAPESCA

El Instituto Nacional de Pesca (INAPESCA) es la única institución mexicana de investigación pesquera y acuícola, encargada de dirigir, coordinar y orientar la investigación científica y tecnológica en materia de pesca y acuicultura, así como el desarrollo, innovación y transferencia tecnológica que requiera el sector pesquero y acuícola (INAPESCA, 2016).

El INAPESCA realiza sus actividades en los Centros Regionales de Investigación Pesquera (CRIP). El presente proyecto se llevó a cabo en colaboración con el CRIP-Pátzcuaro Michoacán del INAPESCA, ya que es el encargado de realizar investigaciones referentes a la reproducción, sobrevivencia, alimentación y desarrollo de algunas especies en esta región, así como de investigaciones limnológicas.



Fig. 3.5 Centro Regional de Investigación Pesquera - Pátzcuaro

3.4 Limnología

La limnología es la rama de la ecología que estudia los ecosistemas acuáticos continentales (lagos, lagunas, ríos, charcas, marismas y estuarios), las interacciones entre los organismos

acuáticos y su ambiente, que determinan su distribución y abundancia en dichos ecosistemas (Margalef, 1983). Tiene como objetivo el describir y analizar las características estructurales y funcionales de las aguas continentales en relación con los factores físicos, químicos y biológicos en ecosistemas acuáticos.

D.S. Rawson, limnólogo canadiense, en 1939 construyó un diagrama que expone los múltiples factores esenciales que interactúan para dar a un lago cierta caracterización que determinan la composición, distribución y densidad de la biota; tasas de reciclaje de nutrientes y productividad del lago. En la Figura 3.6, se muestra el diagrama de Rawson con los factores esenciales.

En esta investigación, los principales factores esenciales considerados son los siguientes; en primera instancia la localización geográfica, tales como la latitud, longitud y altitud, también, algunos factores derivados de la profundidad, que forma parte de la clasificación morfológica del lago, como son la transparencia, distribución del calor y distribución del oxígeno. A continuación, se define cada uno de estos.

a) Latitud

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, tal y como se muestra en la Figura 3.7.

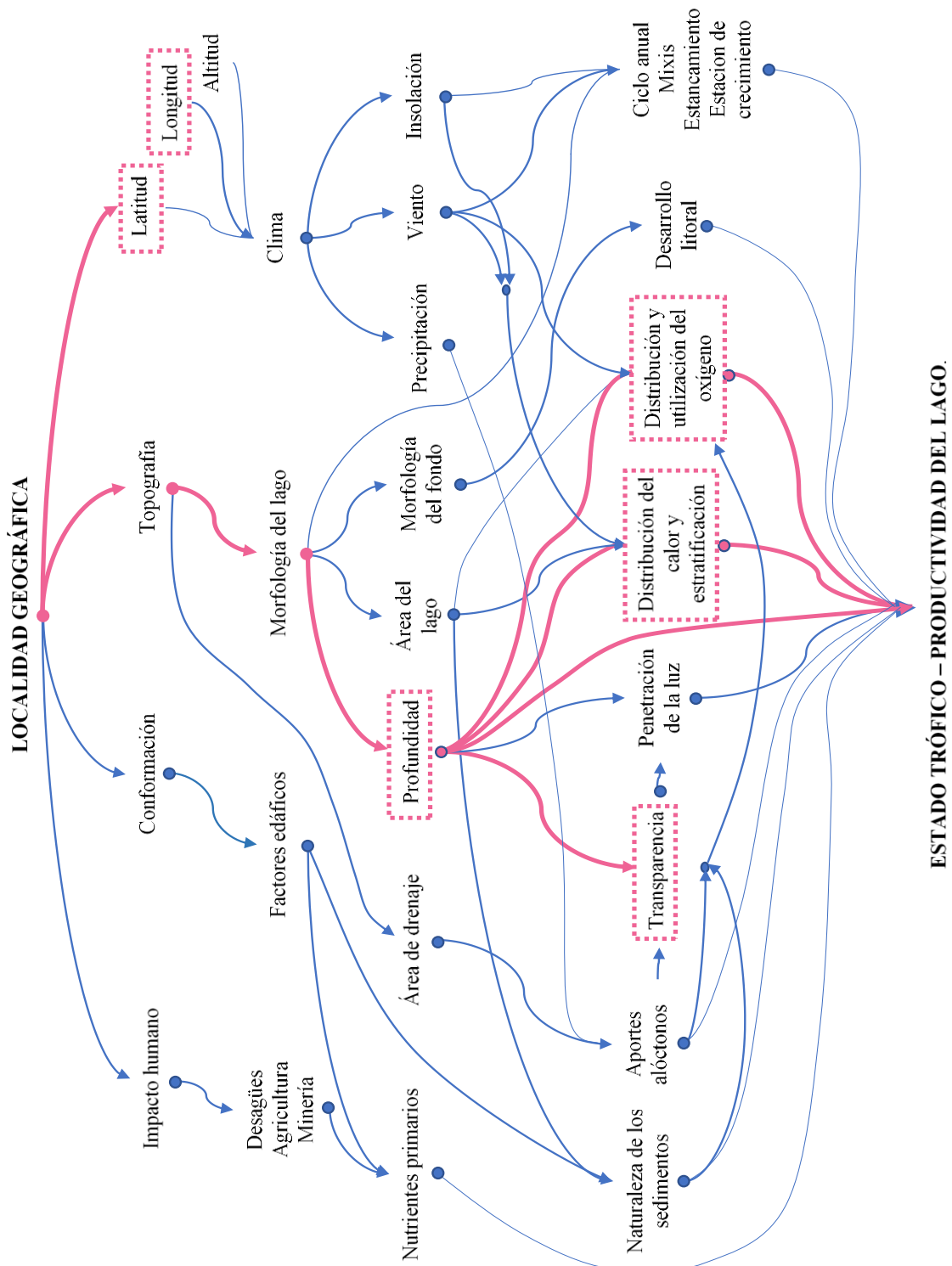


Fig. 3.6 Diagrama de Rawson.

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: $-10^{\circ} 40' 59''$, significa una latitud de 10 grados, 40 minutos y 59 segundos de lat. Sur y de ser con el signo positivo $+10^{\circ} 40' 59''$ es una latitud de 10 grados, 40 minutos y 59 segundos de lat. Norte (Read, 2009).

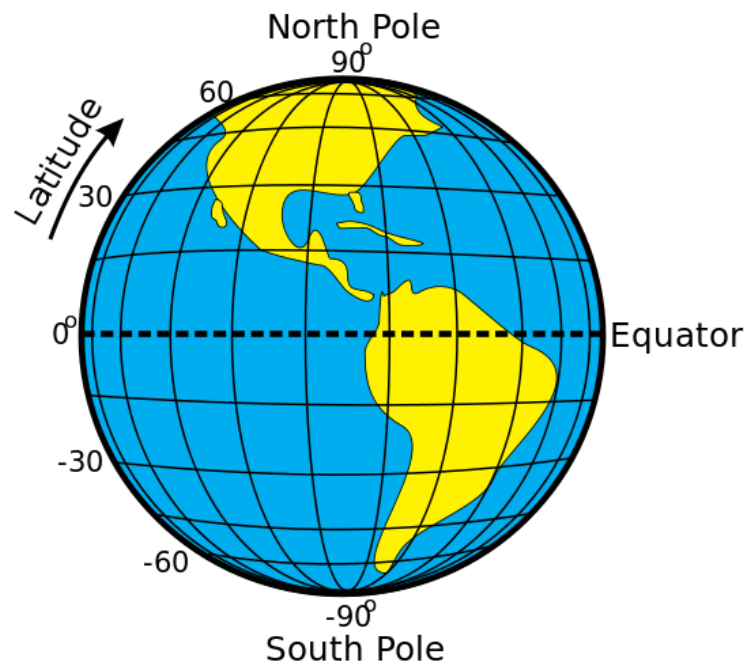


Fig. 3.7 Descripción gráfica de Latitud.

b) Longitud

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). En la Figura 3.8, se ejemplifica la longitud.

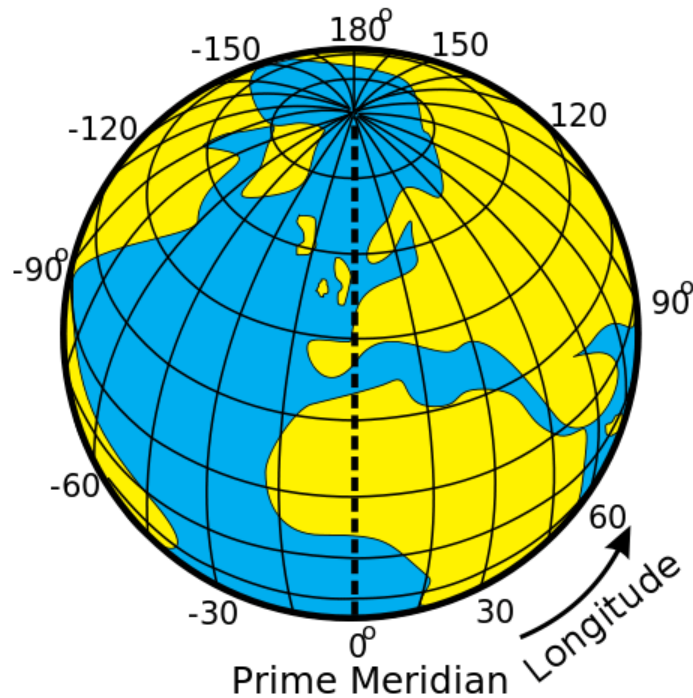


Fig. 3.8 Descripción gráfica de Longitud.

c) Turbidez

Se conoce también con el término de turbiedad y se define como la expresión del efecto óptico que es causado por la dispersión e imposibilidad de transferir de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua.

La turbidez puede ser ocasionada por una gran variedad de materiales en suspensión que varían en tamaño, desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas como arcillas, limo y materia orgánica e inorgánica que se divide en organismos planctónicos y microorganismos, es por esto que va ligada ampliamente con la transparencia del agua. Los valores de turbidez sirven para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua, y los procesos unitarios se debe utilizar para hacer más eficaz la remoción de contaminación y la obtención de agua en condiciones óptimas para el ser humano (Rangel, 2017).

d) 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).

e) Oxígeno Disuelto

El Oxígeno Disuelto (DO) es la cantidad de oxígeno que esta disuelta en el agua. Este es uno de los gases más importantes en la dinámica y caracterización de los sistemas acuáticos, es necesario para la supervivencia de la gran mayoría de animales marinos y 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. 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).

f) 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).

3.5 Zonas Bióticas

Los ecosistemas acuáticos están muy influidos por los aportes y pérdidas de materiales por vías biológicas, geológicas, atmosféricas e hidrológicas. Además, en los lagos y lagunas se produce un movimiento de nutrientes y energía a través de las cadenas tróficas, caracterizándolos respecto de su estado trófico.

a) Estado Trófico.

Actualmente, se define oligotrofia como un estado que se caracteriza por la escasa cantidad de sustancias nutritivas, una alta transparencia y poca producción de fitoplancton, por el contrario, eutrofia implica una elevada cantidad de nutrientes y reducida transparencia del agua, provocando un exceso de fitoplancton (Vignatti y Martín, 2007).

b) Cadena Trófica.

El aumento de la carga de nutrientes afecta también a otros componentes del ecosistema del lago, como la concentración de oxígeno a diferentes profundidades y con ello a los peces (Odum, 1983). La cascada de estado trófico se representa en la Figura 3.9

El fitoplancton sirve de alimento del zooplancton, el cual a su vez es consumido por invertebrados (crustáceos y larvas de insectos) y vertebrados planctívoros (pequeños peces). Estos constituyen la presa de los piscívoros.

Por lo tanto, se considera una zona altamente biótica en peces, aquella donde las condiciones de Transparencia, niveles de oxígeno disuelto y temperatura son las ideales para la especie habitante del lago.

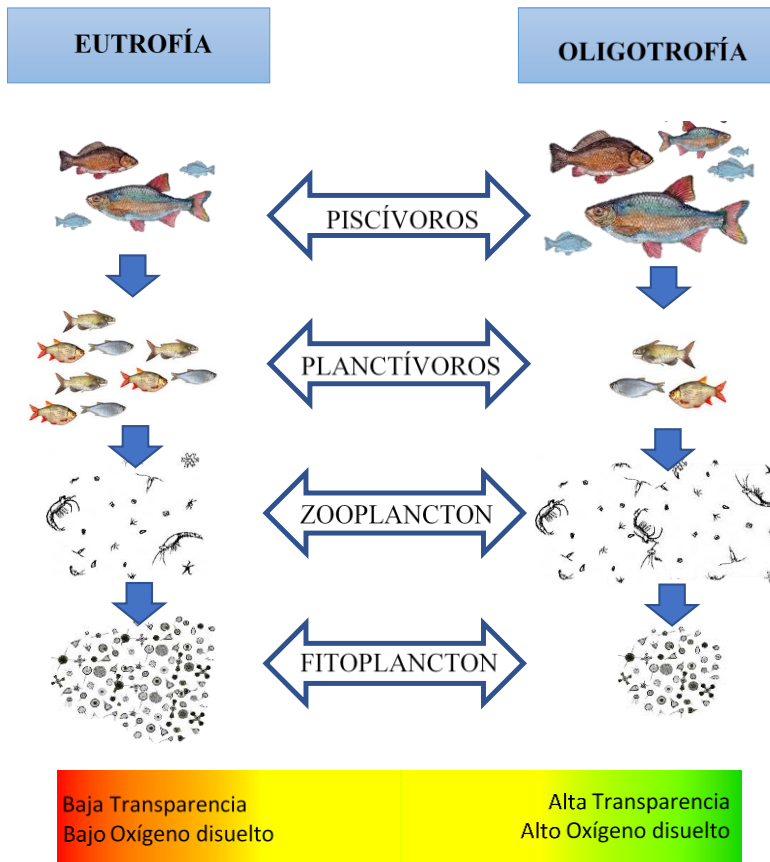


Fig. 3.9 Cascada de Estado Trófico.

3.6 Especies Endémicas del lago de Zirahuén

Muy cerca de Pátzcuaro, en Michoacán está uno de los lagos que aún se conservan limpios en México: Zirahuén. Habitación de diferentes especies de peces, los más importantes son los siguientes.

a) *Menidia estor* (pecado blanco)

Son peces de talla mediana con una banda lateral plateada, fusiformes y comprimidos; cabeza cubierta de escamas; boca terminal dirigida hacia arriba con dientes en las mandíbulas; cuerpo cubierto de escamas cicloideas; tiene dos aletas dorsales, la primera con 5 o 6 espinas y la segunda con una espina y 12 radios. Es uno de los Arterinidos mexicanos que más talla alcanza con 40 cm de longitud y 500 g de peso (Figura 3.10).



Fig. 3.10 Espécimen *Menidia Estor*

Es un pez propio de aguas lentas, semicálidas, tolera ciertos grados de turbiedad, aguas duras y con pH de 7,2 a 8,2 con 4 a 8 cc de oxígeno/l.

El pescado blanco es un ovíparo que desova durante los meses de marzo, abril y mayo. Prefiere orillas con rocas y algas filamentosas donde el agua es clara y oxigenada con ligero oleaje. Los pescados blancos desovan cuando tienen tallas de 2 a 3 dm. El juego amoroso comienza por las mañanas luminosas cuando tres o cuatro machos persiguen a la hembra próxima a desovar, estos grupos reproductivos se multiplican por decenas o centenas, arrojando sus contenidos sexuales hacia las rocas, algas, raíces de árbol, lirio, etc. El pescado blanco no tiene instinto paternal. Una hembra de talla promedio pone alrededor de 15 a 20 mil huevos. Los huevos son esféricos traslúcidos, color ámbar o ligeramente amarillentos, con 6 a 8 filamentos inter-ovulares, con un diámetro que varía de 900 a 1000 micras, este huevecillo es muy resistente a las tracciones mecánicas, se puede mantener vivo fuera del agua por horas, solo procurando una atmósfera húmeda (CONABIO, 2012).

El pez blanco de Pátzcuaro (*C. estor estor*), es una importante fuente de ingresos para los pobladores de la región y muchas familias dependen en forma casi exclusiva de su pesquería. Actualmente se encuentra en peligro debido al gran deterioro de su entorno en el lago de Pátzcuaro y a la gran demanda que tiene en el mercado local y regional. Por ello se realiza una explotación exhaustiva y poco selectiva de la especie, con lo que se capturan peces de todas las tallas pues se confunden durante la pesquería con el charal, lo que ha causado una reducción notable de su población pues la pesca afecta todos los estadios del ciclo biológico (CONABIO, 2012).

En la Tabla 3.1, se muestran el rango de valores para cada parámetro de la especie *Menidia estor*.

Tabla 3.1 Rangos de valores necesarios para la especie *Menidia estor*.

		<i>Menidia estor</i> (pecado blanco)		
Parámetro		Ideal	Min	Max
Temperatura	°C	20 - 22	15	24
Oxígeno	mg/L	6.5 - 8	4.5	8
Profundidad	m.	8-10	0	14
Turbidez	NTU	0 -5	0	500

b) *Algansea lacustris* (Acúmara)

Pez dulceacuícola de cuerpo alto y elongado, de hasta 35 cm de longitud. La cabeza y los ojos son de tamaño moderado, y la boca pequeña, protráctil, desprovista de barbillas asociadas a las comisuras. Presenta 17 branquiespinas en la rama inferior del primer arco branquial. La aleta dorsal, única y corta, está formada por ocho radios, el primero de ellos de aspecto espiciforme; la aleta anal presenta siete radios, la caudal es bilobulada, las pectorales son cortas (en el macho más largas que en la hembra) y las pélvicas abdominales (Figura 3.11). El cuerpo está cubierto de escamas (85 a 95 en una serie longitudinal) suave al tacto, y la línea lateral es completa. Este pez, es de color gris oscuro en el dorso, y blanquecino en el vientre (CONABIO, 2012).

Es omnívoro, aunque manifiesta cierta inclinación por las algas verdes filamentosas, las que consume junto con los pequeños moluscos, crustáceos e insectos asociados (CONABIO, 2012). En su estado juvenil se alimenta principalmente de plancton (Mendoza-Garfías et al., 1996).



Fig. 3.11 Espécimen *Algansea lacustris*.

Se reproduce en la primavera, cuando la temperatura aumenta, y desova en aguas someras y cálidas de fondo arenoso (CONABIO, 2012). El desove ocurre cuando aumenta la temperatura, entre los meses de noviembre a junio, con un máximo entre febrero y abril, lo que coincide con los meses de mayor captura en el año (febrero a mayo). En esa época, grandes cantidades de huevos fecundados son extraídos mediante las artes de pesca usadas durante la captura, los huevecillos son aplastados por el peso de éstas o bien, sacados por el oleaje a las orillas, donde mueren. La talla de primera madurez se ha reportado entre 15.5 a 19.1 cm y las tallas de captura se encuentran entre 8.0 y 28.0 cm; sin embargo, la mayor frecuencia de tallas va de 12.0 a 18.0 cm (Rivera y Orbe, 1990).

Es aprovechada como carnada para otros peces carnívoros o para consumo humano directo. En la meseta tarasca se come fresca y tatemada. Su carne, aunque muy espinosa, es de buen sabor, al igual que su hueva. Se pesca con redes pues no muerde el anzuelo (CONABIO, 2012).

En la Tabla 3.2, se muestran el rango de valores para cada parámetro de la especie *Algansea lacustris*.

Tabla 3.2 Rangos de valores necesarios para la especie *Algansea lacustris*

Parámetro		<i>Algansea lacustris</i> (Acúmara)		
		Ideal	Min	Max
Temperatura	°C	20	14	24
Oxígeno	mg/L	6.5	4	7.3
Profundidad	m.	10- 12	1	14
Turbidez	NTU	0 -5	0	500

c) *Allotoca meeki* (tiro de Zirahuén)

Allotoca meeki, comúnmente conocido como el Zirahuén allotica o tiro de Zirahuén (Figura 3.12), es una especie de pez endémico del lago Zirahuén, un pequeño lago endorreico de montaña en el estado de Michoacán en el centro de México (CONABIO, 2013).



Fig. 3.12 Especimen *Allotoca meeki*

En la Tabla 3.3, se muestran el rango de valores para cada parámetro de la especie *Allotoca meeki*.

Tabla 3.3 Rangos de valores necesarios para la especie *Allotoca meeki*

		<i>Allotoca meeki</i> (tiro de Zirahuén)		
Parámetro		Ideal	Min	Max
Temperatura	°C	20	-	-
Oxígeno	mg/L	-	4	8
Profundidad	m.	7 - 11	0	14
Turbidez	NTU	0 -5	0	500

d) *Micropterus salmoides* (Lobina negra)

Micropterus salmoides (perca atruchada, perca americana, huro, lobina negra, lobina o black bass) es una especie de pez perciforme de la familia Centrarchidae. Es de agua dulce y se caracteriza por tener una aleta dorsal radiada espiniforme y una posterior flexible separada por una muesca (Figura 3.13). Esta especie es originaria de Norteamérica.



Fig. 3.13 Espécimen *Micropterus salmoides*.

Es un pez muy compacto pero los laterales están más o menos comprimidos. De escamas verdosas con manchas oscuras. Su tamaño adulto es de 30 a 50 cm. Es un pez resistente y carnívoro; constituye una especie de las más deportivas por su combatividad, voracidad y

puede ser pescado de innumerables técnicas de pesca deportiva (cucharilla, pez artificial, mosca, pez vivo, cebo, etc.) (CONABIO, 2013).

Prefiere aguas tranquilas de charcas o lagunas de espesa vegetación acuática, desde donde acechar a sus presas, con aguas limpias y preferiblemente cálidas. En la Tabla 3.4, se muestran el rango de valores para cada parámetro de la especie *Micropterus salmoides*.

Tabla 3.4 Rangos de valores necesarios para la especie *Micropterus salmoides*

		<i>Micropterus salmoides</i> (Lobina negra)		
Parámetro		Ideal	Min	Max
Temperatura	°C	21	10	32
Oxígeno	mg/L	7.5	4	9
Profundidad	m.	4-6	0	7
Turbidez	NTU	0-5	0	500

e) **Influencia de los parámetros limnológicos en las especies del lago de Zirahuén**

- **Oxígeno Disuelto**

Este parámetro es de los más importantes, por lo que si se presentan valores de anoxia (< 2.5 mg/L) es imposible que alguna de las especies analizadas pueda sobrevivir. Ciertos especímenes llegan a soportar valores de Hipoxia (< 6.0 mg/L) y mantenerse con vida, pero con repercusiones en todo su organismo. Lo ideal es que los peces se mantengan en lugares con valores estimados de normoxia (> 6.0 mg/L) (Campos, 1997).

- **Temperatura**

El FIS se ve afectado por las condiciones ideales de temperatura de cada especie, por lo que el rango promedio ideal oscila entre los 20 °C y los 22°C.

- **Turbidez**

Los niveles muy altos de turbidez durante un período corto de tiempo pueden no ser significativos e incluso pueden ser menos problemáticos que un nivel más bajo que persista por más tiempo, pero como en los lagos, las especies persisten bajo estos valores constantemente, un alto nivel de turbidez significa un gran problema para la especie, pues rebasando los 500 NTU en un lago significa la muerte. Cuando las especies habitan en cuerpos de agua donde la turbidez oscila entre los 10 – 100 NTU pueden llegar a presentar algunos problemas de estrés, alimentación, entre otros. Cabe mencionar, que los valores de turbidez ideales para las especies presentes en el lago de Zirahuén van de los 0 a los 5 NTU. (Water on the web, 2018)

- **Profundidad**

La primera consideración que el sistema de inferencia difuso debe tener respecto de la profundidad, es la capa de estratificación acuática conocida como metalimnión en el lago de Zirahuén comienza a los 15 metros de profundidad, según Bernal Brooks (1988). La segunda consideración que se debe tomar en cuenta para el parámetro de profundidad es la distancia a la que se encuentra la zona eufótica de la superficie, y para el caso específico de estudio es a los 15 metros (Madrigal, X. et al., 2004), por lo que rebasando los 15 metros de profundidad los valores que se presenten en los demás parámetros serán nulos

3.7 Sistema de Coordenadas

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 en la superficie de la Tierra utilizando mediciones esféricas de latitud y longitud (Bosque, 1992).

a) Conversión de grados decimales minutos (DDM) a grados decimales (DD)

Para realizar la conversión de coordenadas es necesario seguir los siguientes pasos.

1. Dividir los minutos pertenecientes a los grados decimales entre 60.
2. Sumar el resultado de la división a los grados decimales.

Tal y como se muestra en el siguiente ejemplo.

$$19^{\circ} 26.62434, -101^{\circ} 44.35428$$

Primero se dividen los minutos entre 60.

$$\frac{26.62434}{60} = 0.443739 \quad y \quad \frac{44.35428}{60} = 0.73928$$

Después se suman los resultados de la división a los grados decimales, teniendo como resultado las coordenadas en grados decimales

$$19.443739, -101.73928$$

3.8 Sistemas de Inferencia Difusa

La lógica difusa es una técnica de la inteligencia computacional ideal para el modelado y el control de sistemas no lineales debido a sus características de ambigüedad (en contraste con los SI/NO o Verdadero/Falso de la lógica clásica), ya que introduce un grado de vaguedad en las cosas que califica, permitiendo así tener en cuenta grados en las características consideradas en los problemas de ingeniería y trabajar con información que es imprecisa y no está bien definida (Ramírez, 2014).

Los sistemas de lógica difusa al hacer uso de los conjuntos difusos son capaces de manejar simultáneamente datos numéricos y conocimientos lingüísticos en una expresión matemática. Cabe señalar que un conjunto ordinario se refiere a la totalidad de objetos que poseen una propiedad bien definida en común, es decir, dada una característica todos los elementos que cumplan con dicha propiedad pertenecerán al conjunto y el resto no. Un conjunto difuso no tiene límites definidos de forma estricta, sino mediante una función denominada función de pertenencia.

Ilustraremos lo anterior con el primer ejemplo que propuso Zadeh (1965). Se tiene un conjunto de hombres y de ellos se obtiene su estatura. Y definimos que el grupo A se compone de aquellos hombres con una estatura mayor a un cierto valor.

$$A = \{x \mid x < 1.80\} \text{ donde } x \text{ es la estatura.} \quad (3.1)$$

Para un conjunto ordinario, todos los hombres con una altura menor a 1.80 quedan fuera del conjunto, es decir, si se presenta un hombre con una estatura de 1.79, éste ya no sería clasificado como *alto*, por lo que esto no es del todo lógico que por 1 centímetro ya sea considerado como *bajo*. Por otro lado, el razonamiento difuso dice que es *alto* en un 95%. En la figura 3.14 se muestra gráficamente las diferencias entre un conjunto ordinario y uno borroso.

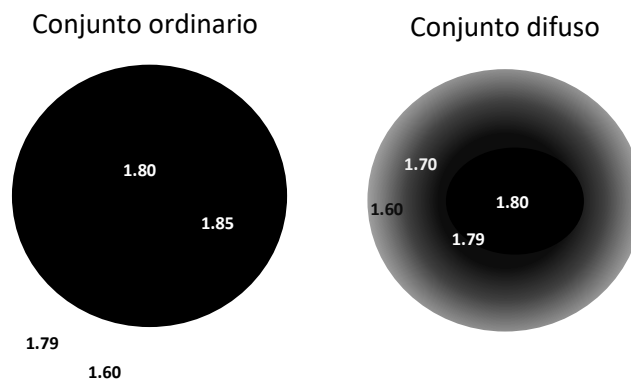


Fig. 3.14 Ejemplificación de razonamiento difuso.

Un *conjunto difuso* se define como $A = \{x, \mu_A(x) \mid X \in U\}$, donde $\mu_A(x): x \rightarrow [0, 1]$ es la función de pertenencia, $\mu_A(x)$ es el grado de pertenencia de la variable x y U es el dominio o universo discurso.

Función de pertenencia (μ) es aquella que asocia a cada elemento de un conjunto difuso el grado con que pertenece al valor lingüístico asociado (Olmo Castillo, 2008).

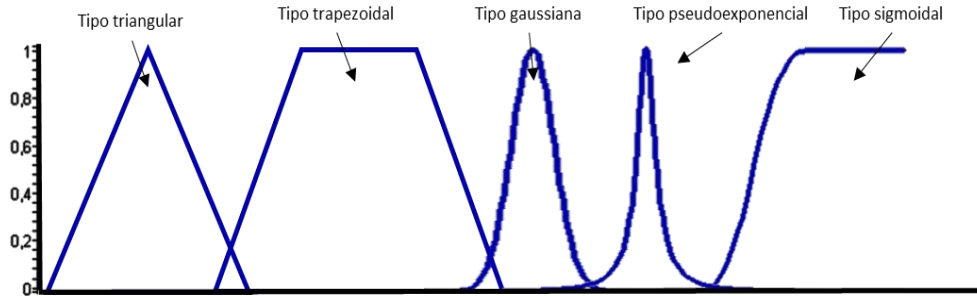


Fig. 3.15 Funciones de membresía más comunes.

Aun cuando cualquier función puede ser válida para definir un conjunto difuso (Fig. 3.15), existen ciertas funciones que se utilizan con mayor frecuencia debido a su simplicidad matemática, entre estas se encuentran las funciones de tipo triangular, mostrado en la Figura 3.5 y en la siguiente expresión.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & (x < a) \text{ ó } (x > d) \\ \frac{x - a}{b - a}, & (a \leq x \leq b) \\ 1, & (b \leq x \leq c) \\ \frac{d - x}{d - c}, & (c \leq x \leq d) \end{cases} \quad (3.2)$$

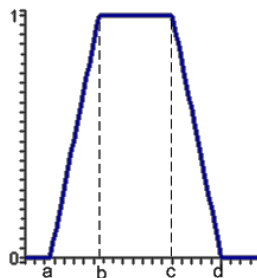


Fig. 3.16 Función de membresía Trapezoidal.

Definida por sus límites inferior a , superior d , y los límites de soporte inferior b y superior c , tal que $a < b < c < d$. En este caso, si los valores de b y c , son iguales, se obtiene una función triangular.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & (x \leq a) \\ \frac{x-a}{m-a}, & (a \leq x \leq m) \\ \frac{b-x}{b-m}, & (m < x < b) \\ 0, & (x \geq b) \end{cases} \quad (3.3)$$

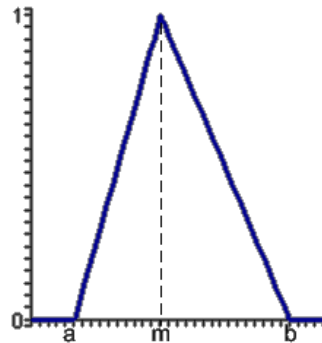


Fig. 3.17 Función de membresía triangular.

Definida mediante el límite inferior a , el superior b y el valor modal m , tal que $a < m < b$. La función no tiene porqué ser simétrica.

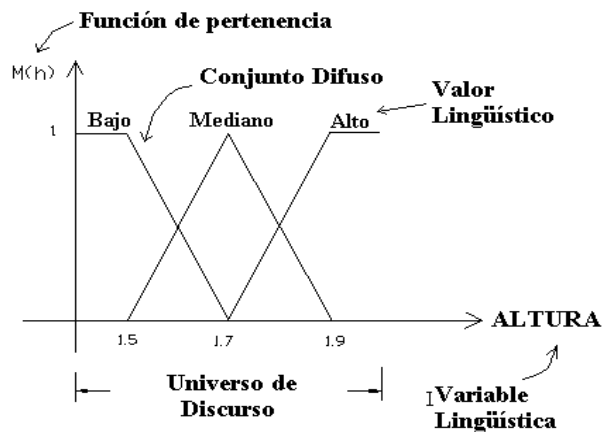


Fig. 3.18 Propiedades básicas de conjuntos difusos.

Grado de pertenencia, es grado en el cual una entrada es compatible con una función de pertenencia el cual puede tomar valores dentro de un valore predeterminado entre 0 y 1.

Universo de discurso, es el rango de todos los valores posibles de la variable del sistema.

Variable lingüística es aquella cuyos valores son palabras o sentencias en un lenguaje natural. De esta forma, una variable lingüística sirve para representar cualquier elemento que sea demasiado complejo y se va a calificar de forma difusa. Por ejemplo: la altura, edad, temperatura, etc. Y llamaremos *valor lingüístico* a las diferentes clasificaciones que efectuamos sobre la variable lingüística: en el caso de la temperatura, podríamos dividir el universo de discurso en los diferentes valores lingüísticos: '*baja*', '*normal*' y '*alta*'. En la Fig. 3.18 se muestran los conceptos mencionados anteriormente.

Por otro lado, los sistemas de inferencia difusa (FIS) convierten variables de entrada (cuantitativas o cualitativas) en variables lingüísticas en la fuzzificación a través de funciones de pertenencia o conjuntos difusos, los cuales son evaluados mediante un conjunto de reglas difusas(Si – Entonces); posteriormente estas variables adquieren valores concretos mediante un proceso conocido como defuzzificación mediante el método del centroide y de esta manera es posible analizar la información para la toma de decisiones (Bellman & Zadeh, 1970; Ustabas, ErKaymaz, & Sarac, 2016). En la figura 3.19 se muestra la arquitectura de un FIS mostrando los módulos que lo conforman y la forma en que se relacionan.

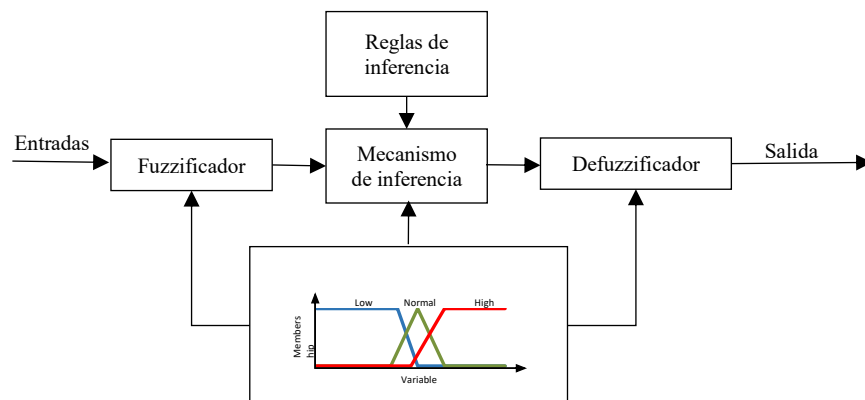


Fig. 3.19 Diagrama general de un Sistema de Inferencia Difuso.

Los componentes principales de este sistema se explican a continuación:

- **Fuzzificador:** Se toman los datos de la entrada (valor numérico). Para posteriormente convertirlos en un valor difuso para que pueda ser interpretado por el mecanismo de inferencia.

- **Mecanismo de inferencia difusa:** una vez que el fuzzificador arroja los valores difusos, el mecanismo de inferencia determina el grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos. Posteriormente, utilizando dicho grado de pertenencia se realiza la búsqueda de la regla más adecuada con la base de reglas difusas para obtener la salida difusa más apropiada.

- **Base de reglas difusas:** se pueden definir como la combinación de uno o más conjuntos difusos de entrada. Estas reglas son del tipo SI-ENTONCES, las cuales siguen la siguiente estructura:

$$R_i := Si X es A_i ENTONCES Y es B_i \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (3.4)$$

donde X, Y son variables lingüísticas (temperatura, pH, oxígeno disuelto, amonio, variabilidad) y A_i, B_i son expresiones lingüísticas tales como: alta, normal, baja o excelente (Arango, Serna, & Gómez, 2012).

En general, la base de las reglas difusas se obtiene del conocimiento de expertos mediante entrevistas o cuestionarios.

- **Defuzzificador:** la salida que genera el mecanismo de inferencia es una salida difusa, ésta será utilizada como entrada para el proceso de defuzzificación para convertirla al tipo de salida que entienda la entidad externa, es decir, en un número concreto (Dajin & In-Hyun, 1997).

En cuanto a los métodos de defuzzificación considerados en la literatura se tiene que el método más popular es mediante el cálculo del centro de gravedad o centroide. Algunas opciones de defuzzificación se presentan a continuación:

- a) **Primera (o última) de máximos:** Determina el valor más pequeño o más grande, respectivamente, del dominio con grado de pertenencia maximizada
- b) **Centro de masa:** La salida es el centro de masa de la unión de las salidas de las reglas difusas (M., 2006)

- c) **Altura:** El promedio ponderado por su altura de los centros de las funciones de membresía de las salidas de las reglas, será la salida de este método. (M., 2006)
- d) **Centro del área mayor:** En este caso, la salida es el centro de masa del área mayor convexa de la unión de la salida de todas las reglas (M., 2006)
- e) **Centroide (COG)** como se mencionó anteriormente se trata del método de defuzzificación más utilizado, prevalente y atractivo por su simplicidad (Dajin & In-Hyun, 1997), y calcula el centro del área bajo la curva formada por la función de pertenencia de salida, que se puede definir de la siguiente manera:

$$COG(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i \cdot \mu_{out}(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_i} \mu_{out}(x_i)} \quad (3.5)$$

donde N_i es el número de valores discretizados x_i en μ_{out} .

La ec. (3.6) es para valores discretos, pero la siguiente expresión es empleada para valores continuos

$$CF = \frac{\int x \mu_{out}(x) dx}{\int \mu_{out}(x) dx} \quad (3.6)$$

Con el fin de restringir la salida del centro y tener un índice entre [0 1], el resultado debe ser normalizado usando la siguiente expresión:

$$WQI = \frac{COG - \min(COG)}{\max(COG) - \min(COG)}, \quad (3.7)$$

donde las funciones de máx / mín corresponden a los máximos y los mínimos que se puede calcular en el proceso de defuzzificación

Como se mencionó anteriormente, la lógica difusa, es un raciocinio alternativo a la lógica clásica que pretende calificar información imprecisa, es decir, con cierto grado de vaguedad (Zadeh L. , 1965).

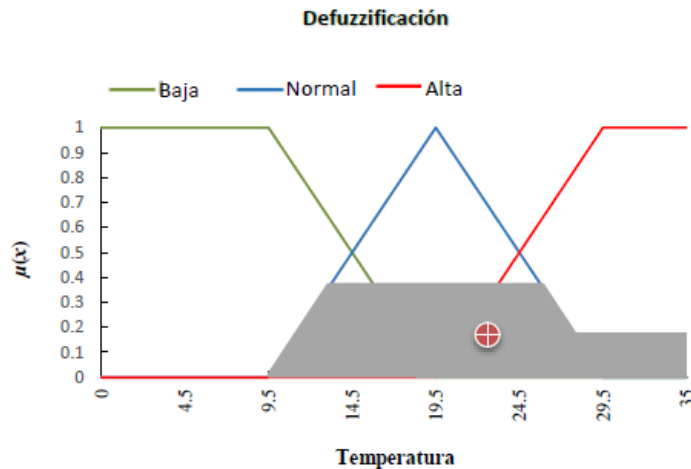


Fig. 3.20 Determinación de la salida difusa por el centro del método de gravedad.

3.9 Software de Desarrollo

El software de desarrollo nos permitió implementar los protocolos necesarios, transmitir y visualizar la información requerida, así como el diseño y la creación de las tarjetas prototipo utilizadas. Los softwares son los siguientes.

a) LabVIEW

LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico (National Instruments, 2018).

Su forma de operar se basa en la creación de instrumentos virtuales (VIs). Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros

procedentes de otros. Todos estos, esta conformados por un panel frontal y un diagrama de bloques (National Instruments, 2018).

LabVIEW contiene la herramienta Fuzzy System Designer, que ayuda a diseñar, controlar y modificar la programación de sistemas difusos. Sus componentes se detallan en los siguientes puntos .

Variables-Configura las variables lingüísticas del sistema difuso. Esta página incluye los siguientes componentes:

- **Input variables** (Variables de entrada) – Lista de las variables de entrada en el sistema difuso.

Seleccione una variable de la lista para mostrar las funciones de membresía correspondientes en la opción **Input variable membership functions**. Haga doble clic en una variable de esta lista para iniciar el cuadro de diálogo **Edit variable**.

- **Add Input Variable** (Agregar variable de entrada): abre la ventana de diálogo **Edit Variable** con la que puede crear una nueva variable de entrada.
 - **Edit Input Variable** (Editar variable de entrada): abre el cuadro de diálogo **Editar variable** con el que puede editar la variable de entrada seleccionada.
 - **Delet Input Variable** (Borrar variable de entrada): borra la variable de entrada seleccionada.
- **Input variable membership functions**- Gráfica la función de membresía para la variable de entrada seleccionada en la lista de **Input variables**.
 - **Output variables** (Variables de salida)-Lista de las variables de salida en el sistema difuso. Seleccione una variable en esta lista para mostrar las funciones de membresía correspondientes en la opción **Output variable membership functions**. Haga doble clic en una variable de esta lista para iniciar el cuadro de diálogo **Edit variable**.
- **Add Output Variable** (Añadir variable de salida): abre la ventana de diálogo **Edit variable** con la que puede crear una nueva variable de salida.
 - **Edit Output Variable** (Editar variable de salida): abre la ventana de diálogo **Edit variable** con la que puede editar la variable de salida seleccionada.
 - **Delet Output Variable** (Borrar variable de salida): borra la variable de salida seleccionada.

- **Output variable membership functions** (Funciones de membresía de la variable de salida): Gráfica las funciones de membresía de la variable de salida seleccionada en la lista **Output variable**.

Reglas-Configura las reglas para el sistema difuso. Esta página incluye los siguientes componentes:

- **Rules** (Reglas): Lista todas las reglas definidas para el sistema difuso.
- **Add Rule** (Agregar regla): Crea una nueva regla para el sistema difuso.
- **Delete Rule** (Borrar regla): Borra la regla seleccionada.
- **Move Rule Up** (Desplazar regla hacia arriba): Desplaza la regla seleccionada una posición hacia arriba en la lista de reglas.
- **Move Rule Down** (Desplazar regla hacia abajo): Desplaza la regla seleccionada una posición hacia abajo en la lista de reglas.
- **Defuzzification method** (Método de defuzzificación)-Especifica el método de defuzzificación que utiliza el controlador de lógica difusa para convertir los grados de membresía de las variables lingüísticas de salida en valores numéricos. Se puede utilizar Center of Area, modified Center of Area, Center of Sums, Center of Maximum, or Mean of Maximum como método de defuzzificación.
- **Antecedents** (Antecedentes): Configura los antecedentes, o porciones IF, de la regla seleccionada en la lista Reglas. Cada antecedente consta de tres partes: el índice de una variable lingüística de entrada, un operador que especifica si se debe calcular el grado de pertenencia o no de la variable lingüística de entrada dentro de un término lingüístico, y el índice del término lingüístico. Los índices corresponden al orden en que se creó el término lingüístico.
 - **Add Antecedent** (Agregar Antecedente): Crea un nuevo antecedente para la regla seleccionada en la lista Reglas.
 - **Delete Antecedent** (Borrar Antecedente): Borra el último antecedente de la regla que seleccionó en la lista de Reglas.
- **Consequents** (Consecuencias): Configura las consecuencias, o las porciones ENTONCES, de la regla seleccionada en la lista de Reglas. Cada consecuencia consta de tres partes: el índice de una variable lingüística de salida, un operador que

especifica si se debe calcular el grado de pertenencia o no de la variable lingüística de salida dentro de un término lingüístico, y el índice del término lingüístico. Los índices corresponden al orden en que se creó el término lingüístico.

- **Add Consequent** (Agregar consecuencia): Crea un nuevo resultado para la regla seleccionada en la lista de reglas.
- **Delete Consequent** (Borrar consecuencia): Borra el último resultado de la regla que se seleccionó en la lista de reglas.
- **Antecedent connective** (Conectivo anterior): Especifica cómo el controlador de lógica difusa calcula el valor verdadero del antecedente de la regla agregada. Puedes usar los siguientes conectores antecedentes:
 - **AND (Minimum)**: Especifica que el controlador de lógica difusa utiliza el menor grado de pertenencia de los antecedentes.
 - **AND (Product)**: Especifica que el controlador de lógica difusa utiliza el producto de los grados de membresía de los antecedentes.
 - **OR (Maximum)**: Especifica que el controlador de lógica difusa utiliza el mayor grado de membresía de los antecedentes.
 - **OR (Probabilistic)**: Especifica que el controlador de lógica difusa usa la suma probabilística de los grados de membresía de los antecedentes. El controlador de lógica difusa usa la siguiente ecuación para calcular la suma probabilística: $(A + B) - (A * B)$, donde A y B son los antecedentes.
- **Degree of suport** (Grado de soporte): Especifica el peso, entre 0 y 1, que desea aplicar a la regla. Multiplique el Grado de soporte por el valor verdadero del antecedente de la regla agregada para calcular el peso de la regla.
- **Consequent implication** (Implicación consecuente): Especifica el método de implicación que utiliza el controlador de lógica difusa para escalar las funciones de pertenencia de la variable lingüística de salida, en función del peso de la regla. Puede utilizar el método de implicación Minimum o Product.

Sistema de prueba: Prueba el sistema difuso de acuerdo con los valores de entrada especificados. Esta página incluye los siguientes componentes:

- **Input variable(s)** (Variable(es) de entrada): Enumera todas las variables de entrada del sistema difuso.
- **Input value(s)** (Valor(es) de entrada): Especifica el valor(es) de la(s) variable(s) de entrada correspondiente(s).
- **Output variable(s)** (Variable(s) de salida): Lista de todas las salidas.
- **Output values(s)** (Valor(es) de salida): Devuelve el valor de la(s) variable(s) de salida correspondiente(s)
- **Input/Output relationship** (Relación entrada/salida): Muestra un gráfico de superficie 3D que representa la variable de salida frente a la variable de entrada 1 y la variable de entrada 2. Este gráfico también indica la ubicación de los valores actuales de entrada y salida.
- **Plot Variables:** Especifica las variables que desea mostrar en el gráfico de relaciones de entrada/salida. Utilice esta sección de la página Sistema de prueba para barrer el rango de valores de dos variables de entrada y observar el cambio correspondiente en el valor de la variable de salida.
 - **Input variable 1** (Variable de entrada 1): Especifica la primera variable de entrada que desea mostrar en el apartado **Input/Output relationship**. Esta variable aparece como el eje x del gráfico de la relación entrada/salida.
 - **Input value 1** (Valor de entrada 1): Especifica el valor de la primera variable de entrada que se desea visualizar en el gráfico **Input/Output relationship**.
 - **Input variable 2** (Variable de entrada 2): Especifica la segunda variable de entrada que desea mostrar en el apartado **Input/Output relationship**. Esta variable aparece como el eje y del gráfico de relación entrada/salida.
 - **Input value 2** (Valor de entrada 2): Especifica el valor de la segunda variable de entrada que se desea mostrar en el apartado **Input/Output relationship**.
 - **Output variable** (Variable de salida): especifica la variable de salida que desea visualizar en el apartado **Input/Output relationship**. Esta variable aparece como el eje z del gráfico de relación entrada/salida.
 - **Output value** (Valor de salida): Devuelve el valor de la variable de salida.

- **Number of input 1 samples** (Número de muestras de entrada 1): Especifica el número de muestras de la variable de entrada 1 que desea trazar en el gráfico de relación entrada/salida.
- **Number of input 2 samples** (Número de muestras de entrada 2): Especifica el número de muestras de la variable de entrada 2 que desea trazar en el gráfico de relación entrada/salida.
- **Invoked Rules** (Reglas invocadas): Muestra las reglas que se aplican a los valores actuales de las variables de entrada y salida, así como las ponderaciones de regla correspondientes.

En la Figura 3.21, se muestra un ejemplo de la herramienta Fuzzy System Designer.

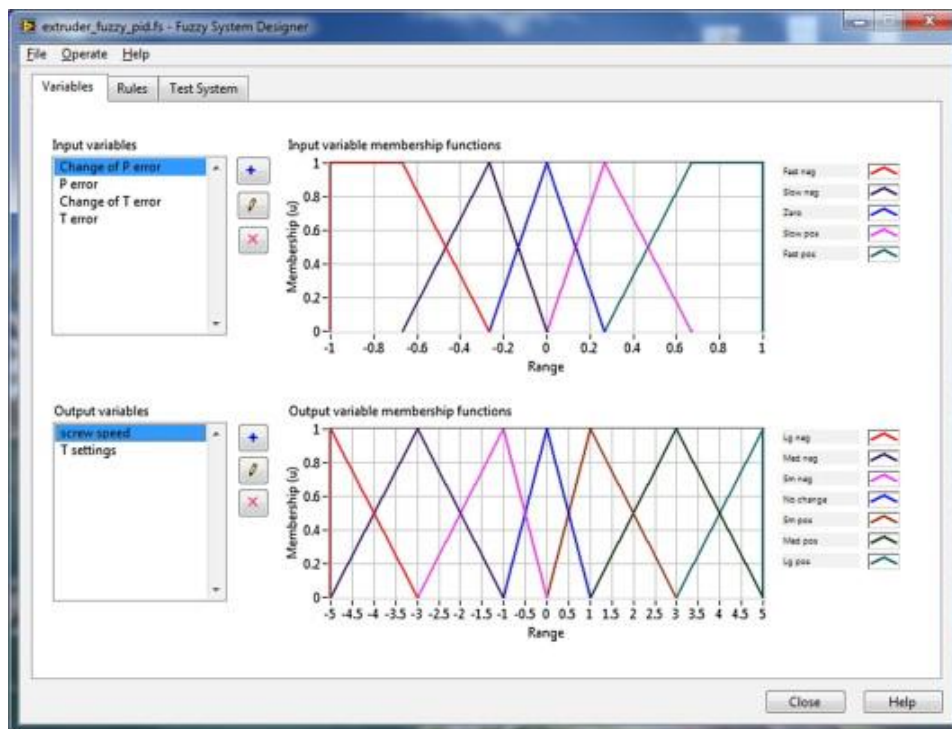


Fig. 3.21 GUI Fuzzy System Designer.

b) Proteus

Proteus Design Suite es software de automatización de diseño electrónico, desarrollado por Labcenter Electronics Ltd., que consta de los dos programas principales: Ares e Isis.

El Programa ISIS, Intelligent Schematic Input System (Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente) permite diseñar el plano eléctrico del circuito que se desea realizar con componentes muy variados, desde simples resistencias, hasta alguno que otro microprocesador o microcontrolador, incluyendo fuentes de alimentación, generadores de señales y muchos otros componentes con prestaciones diferentes.

Por otro lado, Proteus además de contar con el área de diseño de esquemáticos, también cuenta con ARES, o Advanced Routing and Editing Software (Software de Edición y Ruteo Avanzado); es la herramienta de enrutado, ubicación y edición de componentes, se utiliza para la fabricación de placas de circuito impreso, permitiendo editar generalmente, las capas superficiales (Top Copper), y de soldadura (Bottom Copper).

En la Figura 3.22, se muestran los programas ARES e ISIS del software PROTEUS.

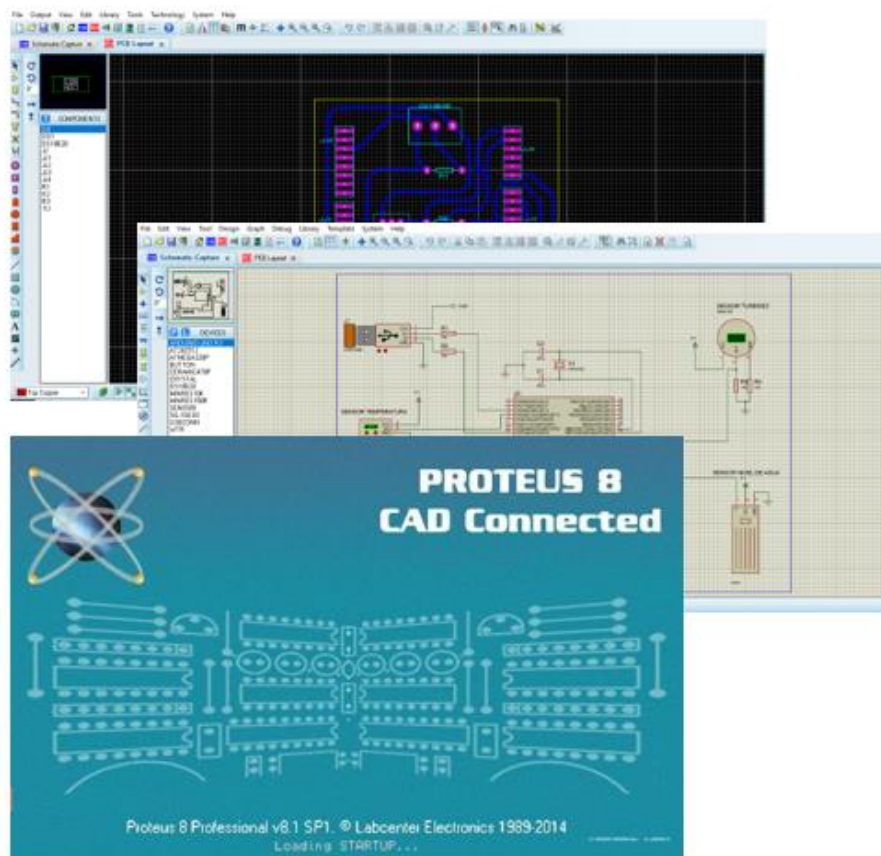


Fig. 3.22 Software de desarrollo PROTEUS.

c) Arduino

Es una compañía open source y open hardware, así como un proyecto y comunidad internacional que diseña y manufactura placas de desarrollo de hardware para construir dispositivos digitales y dispositivos interactivos que puedan sensar y controlar objetos del mundo real.

El software consiste en un entorno de desarrollo (IDE) basado en el entorno de Processing y lenguaje de programación basado en Wiring, así como en el cargador de arranque (bootloader) que es ejecutado en la placa. El microcontrolador de la placa se programa mediante un computador, usando una comunicación serial mediante un convertidor de niveles RS-232 a TTL serial (Arduino, 2018). En la Figura 3.23, se muestra la plataforma de Arduino.

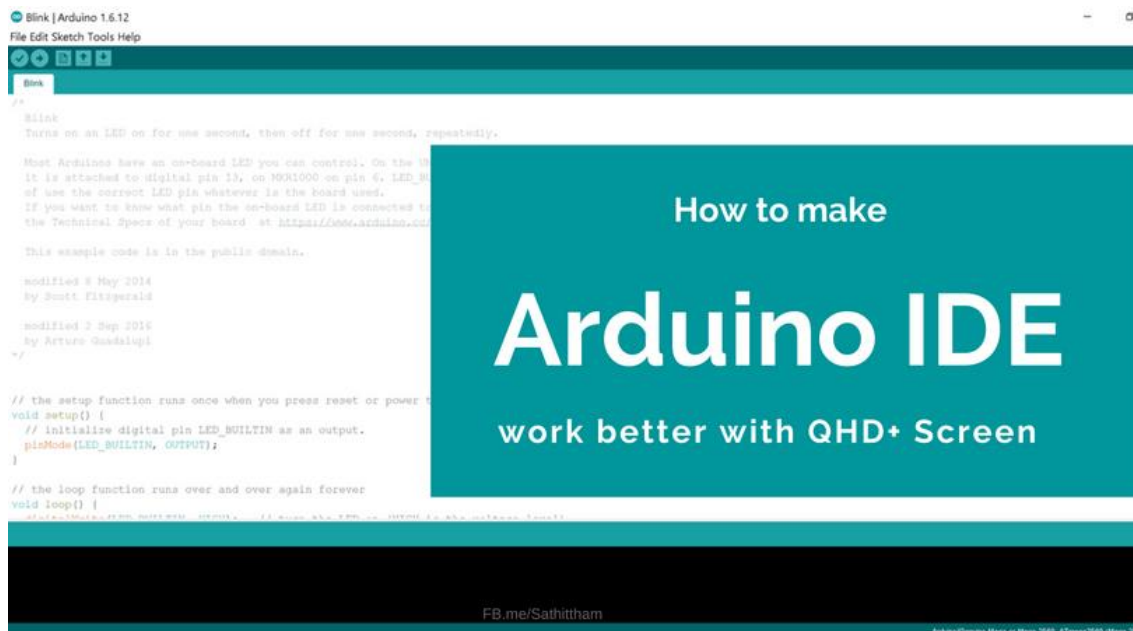


Fig. 3.23 GUI Arduino IDE.

3.10 Sensores y adquisición de datos

Un sensor es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior, es decir, responde a alguna variable ambiental como la temperatura, humedad, turbidez, pH,

intensidad de una fuente de luz o la fuerza aplicada a un objeto y la transforma en una señal eléctrica para que se pueda medir y manipular (Bates, M. P., 2013).

d) DS18B20

El sensor de temperatura DS18B20 (Figura 3.X), es un dispositivo que se comunica de forma digital, proporciona mediciones de temperatura en grados Celsius con una resolución programable de 9 a 12 bits.



Fig. 3.24 Sensor DS18B20.

El DS18B20 se comunica a través de un bus de 1-Wire que por definición requiere sólo una línea de datos (y tierra) para la comunicación con un microprocesador central. Sus características son las siguientes:

- Voltaje de alimentación: 3V a 5,5V
- VDD: voltaje de alimentación
- GND: Tierra
- DQ: Datos
- Rango de temperaturas: -55°C a 125°C
- Error (-10°C a 85°C): $\pm 0,5^\circ\text{C}$
- Error (-55°C a 125°C): $\pm 2^\circ\text{C}$
- Resolución programable: 9-bit, 10-bit, 11-bit o 12-bit (default)

e) SEN0189

El sensor de turbidez SEN0189 detecta la calidad del agua al medir los niveles de turbidez. Utiliza la luz para detectar partículas suspendidas en el agua al medir la transmitancia de la luz y la tasa de dispersión, que cambia con la cantidad de sólidos suspendidos totales (TSS) en el agua. A medida que aumenta el TSS, aumenta el nivel de turbidez del líquido. Este sensor cuenta con un adaptador que facilita el acoplamiento del SEN0189 a placas de control (DFROBOT, 2008). Sus especificaciones son las siguientes:

- Voltaje de funcionamiento: 5V DC
- Corriente de funcionamiento: 40mA (MAX)
- Tiempo de respuesta: <500ms
- Resistencia de aislamiento: 100M (Min)
- Método de salida:
- Salida analógica: 0-4.5V
- Salida digital: Señal de nivel alto / bajo (puede ajustar el valor umbral ajustando el potenciómetro)
- Temperatura de funcionamiento: 5 °C ~ 90 °C
- Temperatura de almacenamiento: -10 °C ~ 90 °C
- Peso: 30g
- Dimensiones del adaptador: 38 mm * 28 mm * 10 mm / 1.5 pulgadas * 1.1 pulgadas * 0.4 pulgadas

Descripción del adaptador

- Interruptor de señal de salida "D / A"
- "A": Salida de señal analógica, el valor de salida disminuirá cuando se encuentre en líquidos con una alta turbidez
- "D": Salida de señal digital, niveles alto y bajo, que se puede ajustar mediante el potenciómetro de umbral
- Potenciómetro de umbral: puede cambiar la condición de disparo ajustando el potenciómetro de umbral en el modo de señal digital.

En la Figura 3.24, se muestra la conexión del sensor con la placa Arduino.

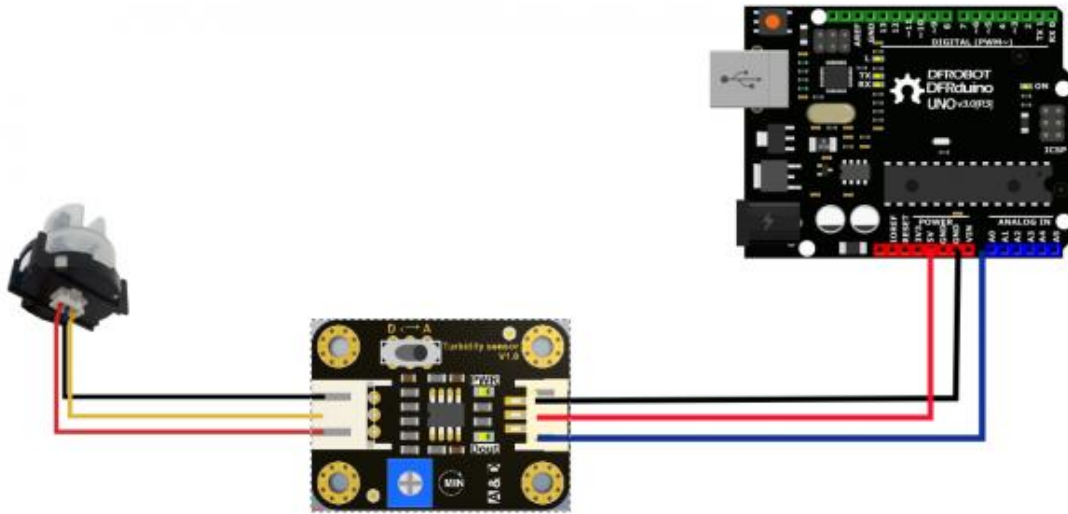


Fig. 3.25 Conexión del sensor SEN0189 con la tarjeta Arduino.

f) Sensor de Oxígeno Disuelto

Dissolved Oxygen Probe, es el sensor que se sumerge dentro del líquido para realizar la medición (Fig. 3.26), este cuenta con una membrana en la cual se adhieren las moléculas de oxígeno dando así una pequeña diferencia de potencial la cual es transmitida al circuito EZO.

Especificaciones (Atlas, 2016):

- Rango: 0-35 mg / L
- Material del cuerpo: Epoxy y Noryl
- Temperatura máxima: 50 ° C
- Presión máxima: 690 kPa (100 PSI)
- Profundidad máxima 60 M (197 pies)
- Calibración Punto único en aire
- Longitud del cable: 1 metro
- Peso: 52 gramos
- Dimensiones: 16.5mm X 116mm (0.65 "X 4.57")
- Conector BNC



Fig. 3.26 Sensor de Oxígeno disuelto.

EZO Dissolved Oxygen Circuit, es la siguiente parte del censado en donde se recibe la pequeña señal transmitida por la etapa anterior para ser amplificada y codificada en un protocolo serial para su posterior envío al microprocesador ocupado (Fig. 3.27).

Especificaciones (Atlas, 2016):

- Lecturas de oxígeno disuelto de rango completo de 0.01 a +35.99 mg / L
- Precisión de las lecturas de oxígeno disuelto hasta el (+/- 0,05 mg / l)
- Lectura única o modos de lectura continua
- Dos protocolos de datos UART y I2C
- Compensación de temperatura
- Compensación de salinidad
- Compensación de presión
- I2C - la dirección I2C predeterminada es 97 (0x61)
- Voltaje de funcionamiento: 3.3V a 5V
- Consumo de energía del modo de reposo 0.995mA a 3.3V

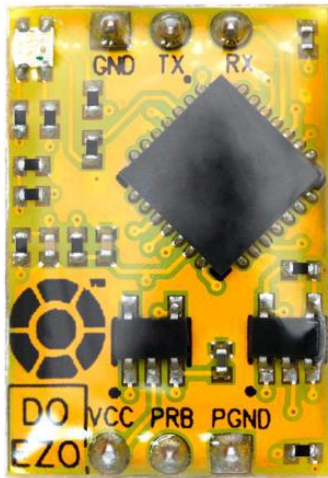


Fig. 3.27 Circuito EZO para Oxígeno disuelto.

g) NEO 6M GPS

El módulo GPS NEO-6M se muestra en la Figura 3.28. Viene con una antena externa y sus características son las siguientes:

- Este módulo tiene una antena externa y una EEPROM incorporada.
- Interfaz: RS232 TTL
- Fuente de alimentación: 3V a 5V
- Velocidad de transmisión predeterminada: 9600 bps
- Funciona con frases NMEA estándar



Fig. 3.28 GPS NEO-6M.

Este GPS realiza mediciones de manera continua, arrojando mucha información en formato NMEA (National Marine Electronics Association), cada línea que se obtiene al leer el serial es una frase en este formato. Cabe mencionar que hay diferentes tipos de oraciones NMEA, por lo cual el tipo de mensaje se indica con los caracteres que preceden a la primera coma. En la Figura 3.29, se presenta un ejemplo de la medición del GPS.

```
$GPGGA,110617.00,41XX.XXXXX,N,00831.54761,W,1,05,2.68,129.0,M,50.1,M,,*42
$GPGSA,A,3,06,09,30,07,23,,,,,,,,,4.43,2.68,3.53*02
$GPGSV,3,1,11,02,48,298,24,03,05,101,24,05,17,292,20,06,71,227,30*7C
$GPGSV,3,2,11,07,47,138,33,09,64,044,28,17,01,199,,19,13,214,*7C
$GPGSV,3,3,11,23,29,054,29,29,01,335,,30,29,167,33*4E
$GPGLL,41XX.XXXXX,N,00831.54761,W,110617.00,A,A*70
$GPRMC,110618.00,A,41XX.XXXXX,N,00831.54753,W,0.078,,030118,,A*6A
$GPVTG,,T,,M,0.043,N,0.080,K,A*2C
```

Fig. 3.29 Lectura GPS.

El GP después del \$ indica que es una posición GPS. El \$GPGGA es el mensaje básico de GPS NMEA, que proporciona datos de localización y precisión en 3D. En la siguiente frase:

\$GPGGA,110617.00,41XX.XXXXX,N,00831.54761,W,1,05,2.68,129.0,M,50.1,M,,*42

- 110617 : representa la hora a la que se tomó la ubicación, 11:06:17 UTC
- 41XX.XXXXX,N: Latitud 41 grados XX.XXXXX' N
- 00831.54761,W: Longitud 008 grados 31.54761' W
- 05: Número de satélites siendo rastreados
- 2.68: Dilución horizontal de la posición
- 129.0, M: Altitud, en metros sobre el nivel del mar
- 50.1, M: Altura del geoide (nivel medio del mar) por encima del elipsoide WGS84
- empty field: Tiempo en segundos desde la última actualización DGPS
- empty field: Número de identificación de la estación DGPS
- *42: El chequeo de la suma de los datos, siempre empieza con *

Las otras frases de NMEA proporcionan información adicional:

\$GPGSA: GPS DOP y satélites activos

\$GPGSV: Información satelital GPS detallada

\$GPGLL: Latitud y Longitud Geográfica

GPRMC: Datos esenciales del GPS (posición, velocidad, tiempo)

\$GPVTG: Velocidad bien lograda

h) Protocolos de Comunicación I²C y UART

Este protocolo se usa para la comunicación del circuito EZO, del oxígeno disuelto. Permite la interconexión de hasta 127 elementos compatibles, gracias a que cada elemento cuenta con una dirección, “address”, diferente.

Está diseñado como un bus maestro (microcontrolador conectado a la tarjeta de medición de parámetros) – esclavos (circuitos EZO y memoria AT24C512B). Precisa de dos líneas de señal: reloj (SCL, Serial Clock) y la línea de datos (SDA, Serial Data), ambas líneas necesitan de resistencias pull - up hacia VDD.

Por otro lado, UART (recepción-transmisión asíncrona universal) es uno de los protocolos serie más utilizados. La mayoría de los microcontroladores disponen de hardware UART. Usa una línea de datos simple para transmitir y otra para recibir datos. Comúnmente, 8 bits de datos son transmitidos de la siguiente forma: un bit de inicio, a nivel bajo, 8 bits de datos y un bit de parada a nivel alto. UART se diferencia de SPI y I2C en que es asíncrono y los otros están sincronizados con señal de reloj. La velocidad de datos UART está limitado a 2Mbps

i) EEPROM AT24C512B

El AT24C512B proporciona 524.288 bits de memoria de sólo lectura programable y borrable eléctricamente (EEPROM) organizada en 65.536 palabras de 8 bits cada una. La función en

cascada del dispositivo permite que hasta ocho dispositivos compartan un bus común de dos hilos (ATMEL, 2008). Sus características son las siguientes:

Operación de bajo voltaje y voltaje estándar

- 1.8V (VCC = 1.8V a 3.6V)
- 2.5V (VCC = 2.5V a 5.5V)
- Organización interna 65.536 x 8
- Interfaz serial de dos hilos
- Schmitt Triggers, entradas filtradas para supresión de ruido
- Protocolo de transferencia de datos bidireccional
- 1 MHz (2,5 V, 5,5 V), 400 kHz (1,8 V) Compatibilidad
- Pin de protección contra escritura para la protección de datos de hardware y software
- Modo de escritura de página de 128 bytes (Escritura de página parcial permitida)
- Ciclo de autoescritura (5 ms máx.)
- Alta fiabilidad
- Resistencia: 1.000.000 de ciclos de escritura
- Retención de datos: 40 Años
- Dispositivos sin plomo/libres de halógenos
- 8-lead PDIP, 8-lead JEDEC SOIC, 8-lead EIAJ SOIC, 8-lead TSSOP, 8-ball dBGA2, y 8-lead Ultra Thin Small Array (SAP) Packages.

CAPITULO IV

4 MODELO DE EVALUACIÓN

4.1 Introducción

En este capítulo, se muestra el diseño y desarrollo del sistema de inferencia difusa que será implementado posteriormente 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, considerando el caso de estudio: el lago de Zirahuén.

Una de las principales contribuciones del presente trabajo es obtener un indicador que nos permita evaluar las condiciones bióticas de puntos específicos georreferenciados a diferentes profundidades, haciendo uso de la teoría de lógica difusa, mediante la integración de los valores obtenidos de cada parámetro analizados en una puntuación final con escala del 0 al 10; el indicador propuesto será denominado Índice Biótico Lacustre (IBL).

4.2 Sistema de inferencia difusa

Los sistemas de inferencia difusa, por sus siglas en ingles FIS (Fuzzy Inference System), proporcional 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. Estas etapas se desarrollan de acuerdo con las necesidades presentes en las principales especies que habitan el lago de Zirahuén: *Menidia estor*, *Algansea lacustris*, *Chirostoma attenuatum meeki* y *Micropterus salmoides*. Todo ello, con el objetivo de determinar el Índice Biótico Lacustre (IBL).

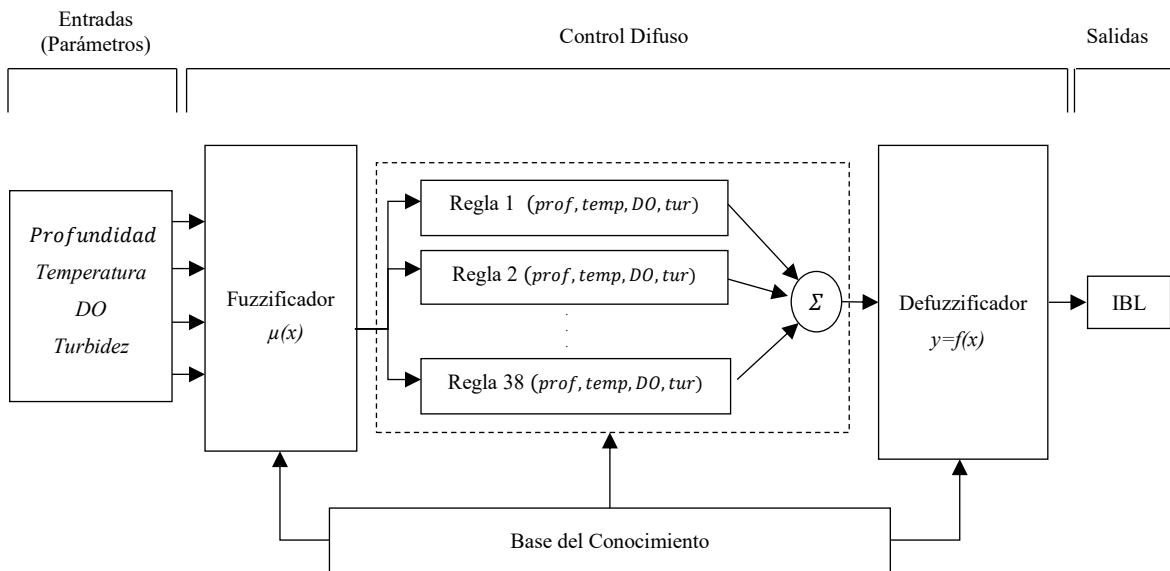


Fig. 4.1 Diagrama conceptual del sistema difuso.

a) 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 para la coexistencia de dicha fauna acuática, como se visualiza en la Tabla 4.1. Dicha investigación se puede apreciar de manera resumida en la tabla 4.2

Tabla 4.1 Variables de entrada del sistema de inferencia difusa.

Nombre	Rango	Número de funciones difusas
Oxigeno	0 - 12	3
Temperatura	0 - 40	3
Turbidez	0 - 200	3
Profundidad	0 - 40	3

Tabla 4.2 Valores ideales, mínimos y máximos de cada parámetro involucrado en el Sistema de inferencia difusa correspondiente a cada especie acuática.

	<i>Menidia estor</i> (pecado blanco)			<i>Algansea lacustris</i> (acúmara)			<i>Allotoca meeki</i> (Tiro de Zirahuén)			<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

b) 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

La siguiente tabla, muestra los valores de los parámetros implementados para la construcción de las funciones de pertenencia de cada variable de entrada del sistema de inferencia difuso.

Tabla 4.3 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 – ∞
Temperatura	°C	Baja	Ideal	Alta
		0 – 20	20 – 22	22 – ∞
Turbidez	NTU	Ideal	Normal	Alta
		0 – 5	5 – 50	50 – ∞
Profundidad	m	Epilimnion	Ideal	Metalimnion
		0 – 5	5 – 12	15 – ∞

- **Oxígeno Disuelto**

En la Tabla 4.4, se detallan las funciones de pertenencia de cada término lingüístico utilizado para la variable de entrada denominada Oxígeno. Gráficamente se pueden apreciar en la Figura 4.2.

Tabla 4.4 Funciones de pertenencia de la variable Oxígeno.

Función de Pertenencia	Forma	Puntos	Fórmula
Anoxia	Trapezoidal	0 ; 0 ; 2 ; 3	$F_A(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{3-x}{3-2}, 1 \right] \right\}$
Hipoxia	Trapezoidal	2 ; 3 ; 5.5 ; 6.5	$F_H(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x-2}{3-2}, 1, \frac{5.5-x}{5.5-6.5} \right] \right\}$
Normoxia	Trapezoidal	5.5 ; 6.5 ; 12 ; 12	$F_N(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x-5.5}{6.5-5.5}, 1 \right] \right\}$

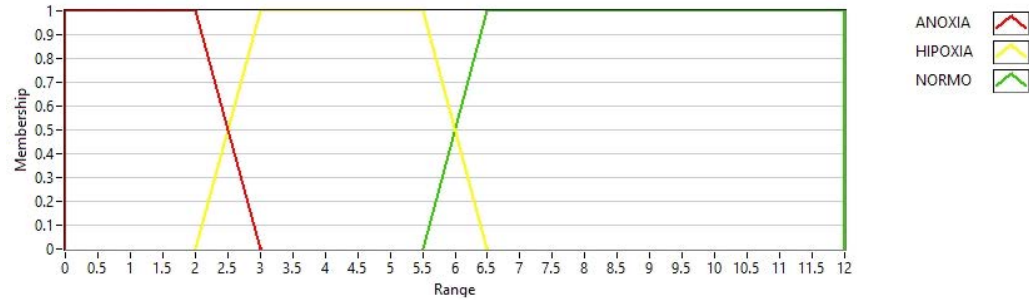


Fig. 4.2 Funciones de pertenencia del Oxígeno Disuelto.

- **Temperatura**

En la Tabla 4.5, se detallan las funciones de pertenencia de cada término lingüístico utilizado para la variable de entrada denominada Temperatura. Gráficamente se pueden apreciar en la Figura 4.3.

Tabla 4.5 Funciones de pertenencia de la variable Temperatura.

Función de Pertenencia	Forma	Puntos	Fórmula
Baja	Trapezoidal	0 ; 0 ; 14 ; 20	$F_b(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{20 - x}{20 - 14}, 1 \right], 1 \right\}$
Ideal	Trapezoidal	14 ; 20 ; 22 ; 25	$F_i(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 14}{20 - 14}, 1, \frac{22 - x}{22 - 25} \right] \right\}$
Alta	Trapezoidal	22 ; 25 ; 40 ; 40	$F_a(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 22}{25 - 22}, 1 \right] \right\}$

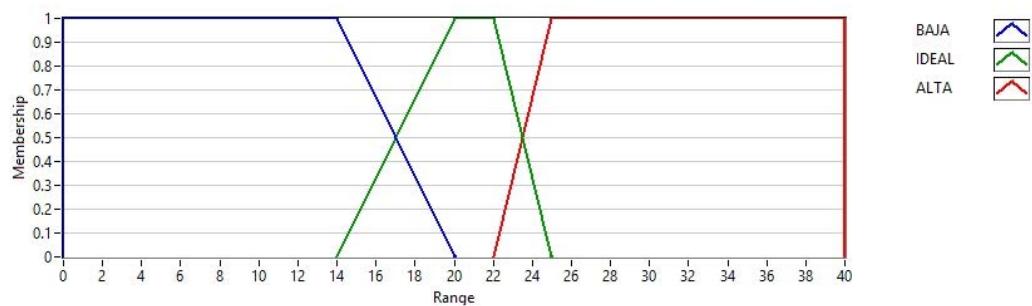


Fig. 4.3 Funciones de pertenencia de la Temperatura.

- **Turbidez**

En la Tabla 4.6, se detallan las funciones de pertenencia de cada término lingüístico utilizado para la variable de entrada denominada Turbidez. Gráficamente se pueden apreciar en la Figura 4.4.

Tabla 4.6 Funciones de pertenencia de la variable Turbidez.

Función de Pertenencia	Forma	Puntos	Fórmula
Ideal	Trapezoidal	0 ; 0 ; 2.5 ; 7.5	$F_i(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{7.5 - x}{7.5 - 2.5}, 1 \right] \right\}$
Normal	Trapezoidal	2.5 ; 7.5 ; 47.5 ; 52.5	$F_n(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 2.5}{7.5 - 2.5}, 1, \frac{47.5 - x}{47.5 - 52.5} \right] \right\}$
Alta	Trapezoidal	47.5 ; 52.5 ; 200 ; 200	$F_{Al}(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 47.5}{52.5 - 47.5}, 1 \right] \right\}$

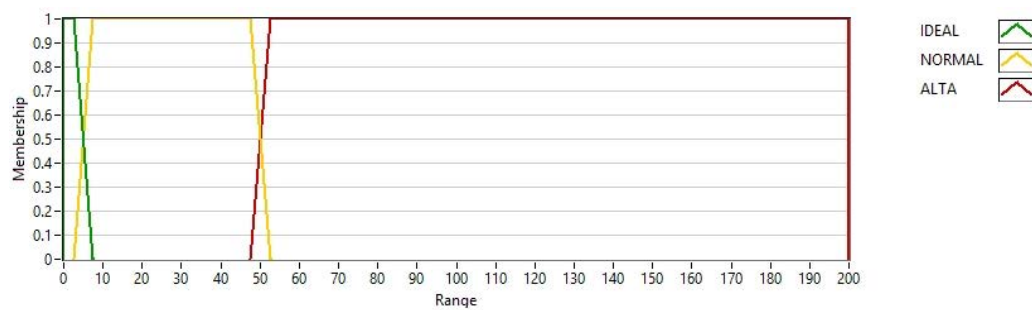


Fig. 4.4 Funciones de pertenencia de la Turbidez.

- **Profundidad**

En la Tabla 4.7, se detallan las funciones de pertenencia de cada término lingüístico utilizado para la variable de entrada denominada Profundidad. Gráficamente se pueden apreciar en la Figura 4.5.

Tabla 4.7 Funciones de pertenencia de la variable Profundidad.

Función de Pertenencia	Forma	Puntos	Fórmula
Epilimnion	Triangular	0 ; 0 ; 6	$F_E(x) = \max \left\{ 0, \min \left[1, \frac{6 - x}{6 - 0} \right] \right\}$
Ideal	Trapezoidal	4 ; 6 ; 12 ; 14	$F_{Id}(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 4}{6 - 4}, 1, \frac{12 - x}{12 - 14} \right] \right\}$
Metalimnion	Trapezoidal	13 ; 15 ; 40 ; 40	$F_{Al}(x) = \max \left\{ 0, \min \left[\frac{x - 13}{15 - 13}, 1 \right] \right\}$

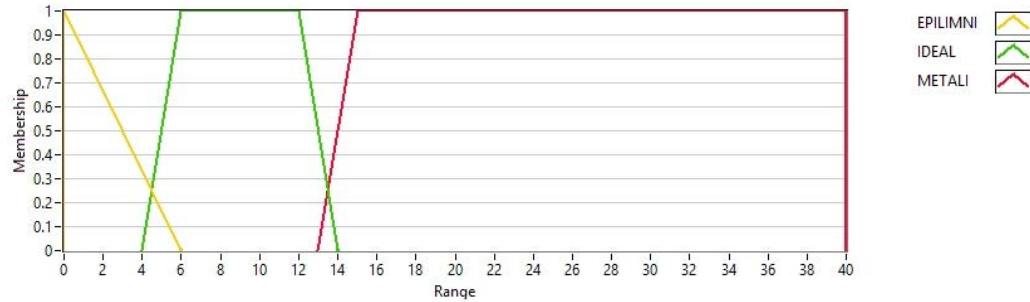


Fig. 4.5 Funciones de pertenencia de la Profundidad.

c) 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 x: SI OXIGENO es anoxia ^ TEMPERATURA es baja ^ TURBIDEZ es ideal ^ PROFUNDIDAD es metalimnión, ENTONCES IBL es ZLA (Zona lacustre abiótica)

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

$$R_m: \text{SI } X \text{ es } A_m \text{ ENTONCES } Y \text{ es } B_m \quad m = 1, 2, \dots, n; \quad (4.1)$$

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 4.8:

Tabla 4.8 Reglas de Razonamiento del FIS.

RULE	OXIGENO	y	TEMPERATURA	y	TURBIDEZ	y	PROFUNDIDAD	entonces	IBL
1	<i>anoxia</i>		-		-		-		<i>ZLA</i>
2	-		-		-		<i>metalimnión</i>		<i>ZLA</i>
3	<i>hipoxia</i>		<i>baja</i>		<i>ideal</i>		<i>epilimnión</i>		<i>ZLA</i>
4	<i>hipoxia</i>		<i>baja</i>		<i>normal</i>		<i>Epilimnión</i>		<i>ZLA</i>
5	<i>hipoxia</i>		<i>baja</i>		<i>alta</i>		<i>Epilimnión</i>		<i>ZLA</i>
6	<i>hipoxia</i>		<i>Ideal</i>		<i>ideal</i>		<i>Epilimnión</i>		<i>ZLBB</i>
7	<i>hipoxia</i>		<i>Ideal</i>		<i>normal</i>		<i>Epilimnión</i>		<i>ZLBB</i>
8	<i>hipoxia</i>		<i>Ideal</i>		<i>alta</i>		<i>Epilimnión</i>		<i>ZLBB</i>
9	<i>hipoxia</i>		<i>alta</i>		<i>ideal</i>		<i>Epilimnión</i>		<i>ZLA</i>
10	<i>hipoxia</i>		<i>alta</i>		<i>normal</i>		<i>Epilimnión</i>		<i>ZLA</i>
11	<i>hipoxia</i>		<i>alta</i>		<i>alta</i>		<i>epilimnión</i>		<i>ZLA</i>
12	<i>hipoxia</i>		<i>baja</i>		<i>ideal</i>		<i>Ideal</i>		<i>ZLA</i>
13	<i>hipoxia</i>		<i>baja</i>		<i>normal</i>		<i>Ideal</i>		<i>ZLA</i>
14	<i>hipoxia</i>		<i>baja</i>		<i>alta</i>		<i>Ideal</i>		<i>ZLA</i>
15	<i>hipoxia</i>		<i>Ideal</i>		<i>ideal</i>		<i>Ideal</i>		<i>ZLBM</i>
16	<i>hipoxia</i>		<i>Ideal</i>		<i>normal</i>		<i>Ideal</i>		<i>ZLBM</i>
17	<i>hipoxia</i>		<i>Ideal</i>		<i>alta</i>		<i>Ideal</i>		<i>ZLBB</i>
18	<i>hipoxia</i>		<i>alta</i>		<i>ideal</i>		<i>Ideal</i>		<i>ZLBB</i>
19	<i>hipoxia</i>		<i>alta</i>		<i>normal</i>		<i>Ideal</i>		<i>ZLA</i>

20	<i>hipoxia</i>	<i>alta</i>	<i>alta</i>	<i>ideal</i>	<i>ZLA</i>
21	<i>normoxia</i>	<i>baja</i>	<i>ideal</i>	<i>epilimnión</i>	<i>ZLBB</i>
22	<i>normoxia</i>	<i>baja</i>	<i>normal</i>	<i>Epilimnión</i>	<i>ZLBB</i>
23	<i>normoxia</i>	<i>baja</i>	<i>alta</i>	<i>Epilimnión</i>	<i>ZLBB</i>
24	<i>normoxia</i>	<i>Ideal</i>	<i>ideal</i>	<i>Epilimnión</i>	<i>ZLBM</i>
25	<i>normoxia</i>	<i>Ideal</i>	<i>normal</i>	<i>Epilimnión</i>	<i>ZLBM</i>
26	<i>normoxia</i>	<i>Ideal</i>	<i>alta</i>	<i>Epilimnión</i>	<i>ZLBM</i>
27	<i>normoxia</i>	<i>alta</i>	<i>ideal</i>	<i>Epilimnión</i>	<i>ZLBB</i>
28	<i>normoxia</i>	<i>alta</i>	<i>normal</i>	<i>Epilimnión</i>	<i>ZLBB</i>
29	<i>normoxia</i>	<i>alta</i>	<i>alta</i>	<i>epilimnión</i>	<i>ZLBB</i>
30	<i>normoxia</i>	<i>baja</i>	<i>ideal</i>	<i>Ideal</i>	<i>ZLBB</i>
31	<i>normoxia</i>	<i>baja</i>	<i>normal</i>	<i>Ideal</i>	<i>ZLBB</i>
32	<i>normoxia</i>	<i>baja</i>	<i>alta</i>	<i>Ideal</i>	<i>ZLBB</i>
33	<i>normoxia</i>	<i>Ideal</i>	<i>ideal</i>	<i>Ideal</i>	<i>ZLBA</i>
34	<i>normoxia</i>	<i>Ideal</i>	<i>normal</i>	<i>Ideal</i>	<i>ZLBA</i>
35	<i>normoxia</i>	<i>Ideal</i>	<i>alta</i>	<i>Ideal</i>	<i>ZLBM</i>
36	<i>normoxia</i>	<i>alta</i>	<i>ideal</i>	<i>Ideal</i>	<i>ZLBB</i>
37	<i>normoxia</i>	<i>alta</i>	<i>normal</i>	<i>Ideal</i>	<i>ZLBB</i>
38	<i>normoxia</i>	<i>alta</i>	<i>alta</i>	<i>ideal</i>	<i>ZLBB</i>

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:

$$\mu_R = \min\{\mu_{OXIGENO}^i, \mu_{TEMPERATURA}^j, \mu_{TURBIDEZ}^k, \mu_{PROFUNDIDAD}^l\}, \quad (4.2)$$

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

d) 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 4.9 Funciones de pertenencia de salida (IBL).

Función de Pertenencia	Forma	Puntos	Fórmula
ZLA	Trapezoidal	0 ; 0 ; 1.25 ; 3.75	$F_{ZLA}(x) = \max\left\{0, \min\left[\frac{3,75 - x}{3,75 - 1,25}, 1\right]\right\}$
ZLBB	Triangular	1.25 ; 3.75 ; 6.25	$F_{ZLBB}(x) = \max\left\{0, \min\left[\frac{x - 1,25}{3,75 - 1,25}, 1, \frac{6,25 - x}{6,25 - 3,75}\right]\right\}$
ZLBM	Triangular	3.75 ; 6.25 ; 8.75	$F_{ZLBM}(x) = \max\left\{0, \min\left[\frac{x - 3,75}{6,25 - 3,75}, 1, \frac{8,75 - x}{8,75 - 6,25}\right]\right\}$
ZLBA	Trapezoidal	6.25 ; 8.75 ; 10 ; 10	$F_{ZLBA}(x) = \max\left\{0, \min\left[\frac{x - 6,25}{8,75 - 6,25}, 1\right]\right\}$

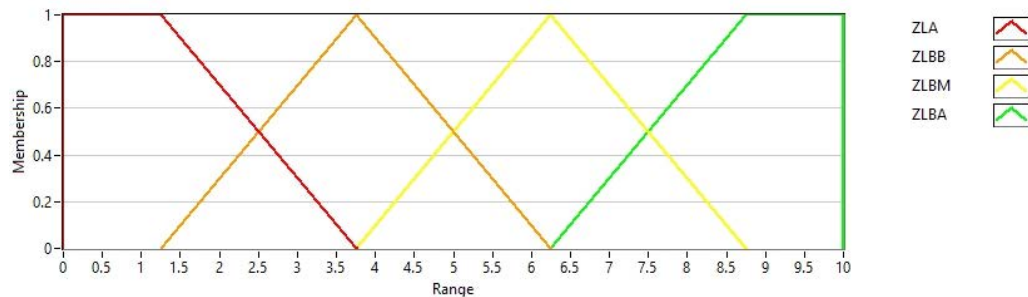


Fig. 4.6 Funciones de pertenencia del IBL.

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:

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

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:

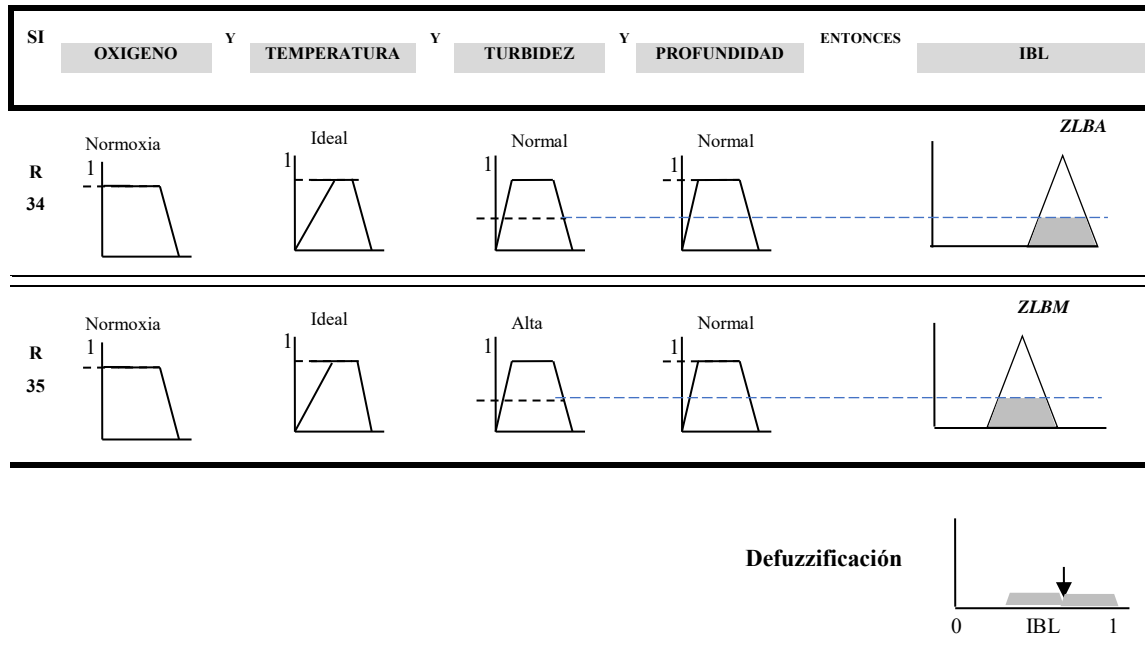


Fig. 4.7 Diagrama de inferencia difusa para la evaluación del Índice Biótico Lacustre con cuatro variables y dos reglas de razonamiento. Las reglas 34 y 35 se utilizan para mostrar el proceso de defuzzificación.

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:

$$COG(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i \cdot \mu_{out}(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_1} \mu_{out}(x_i)} \quad (4.3)$$

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

$$IBL = \frac{COG - \min(COG)}{\max(COG) - \min(COG)} \quad (4.4)$$

e) Índice Biótico Lacustre

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 Fig. 4.7 y considerando los cuatro parámetros de entrada {oxígeno = 7.0, temperatura = 21, turbidez = 50, profundidad = 10}

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

Rule 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:

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

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

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:

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

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

CAPITULO V

5 DESARROLLO E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

5.1 Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos

El sistema de monitoreo de ecosistemas acuáticos está diseñado para analizar, medir y evaluar los tres parámetros principales que intervienen en el proyecto. Esto permitirá mejorar considerablemente los tiempos de medición y evaluación de las zonas lacustres.

La forma de llevar esto a cabo fue desarrollando un sistema embebido, el cual medía y almacenaba los valores de cada parámetro en una memoria EEPROM (Figura 5.1). Posteriormente, para dar solución a las necesidades de los hidrobiólogos se desarrolló un sistema distribuido que utiliza técnicas de lógica difusa para obtener una evaluación de las zonas lacustres (Figura 5.2).

a) Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos - Embebido (SMEA-E)

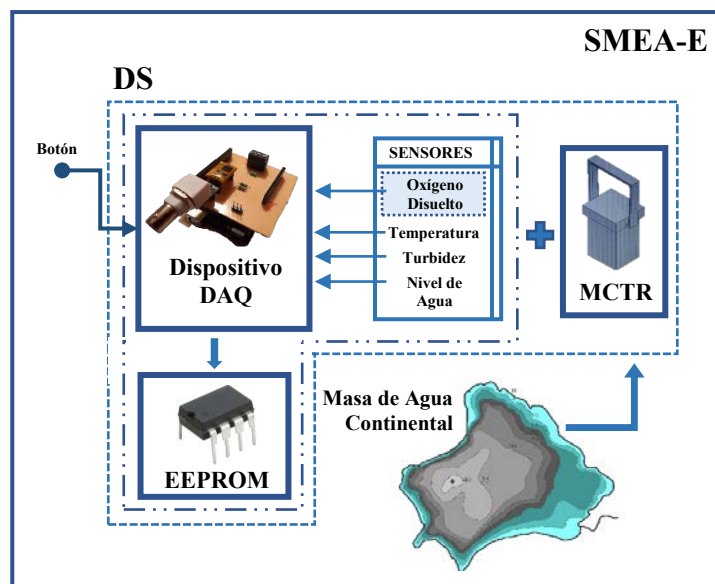


Fig. 5.1 Diagrama general del Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos – Embebido (SMEA-E)

El primer diseño que se hizo fue de un sistema embebido, el cual contaba con los sensores para medir los parámetros de turbidez, temperatura, oxígeno disuelto y nivel de agua, también

con una memoria EEPROM donde se guardaban las mediciones obtenidas. Cabe mencionar, que el sistema poseía un botón en el exterior, conectado a la placa por medio de cable, que al sumergir el DS se presionaba para tomar los valores medidos por los sensores.

Posteriormente, debido a que los hidrobiólogos necesitaban un sistema interactivo y de análisis se procedió a construir un sistema distribuido, más adelante en el capítulo se muestra el diagrama esquemático del sistema.

b) Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos - Distribuido (SMEA-D)

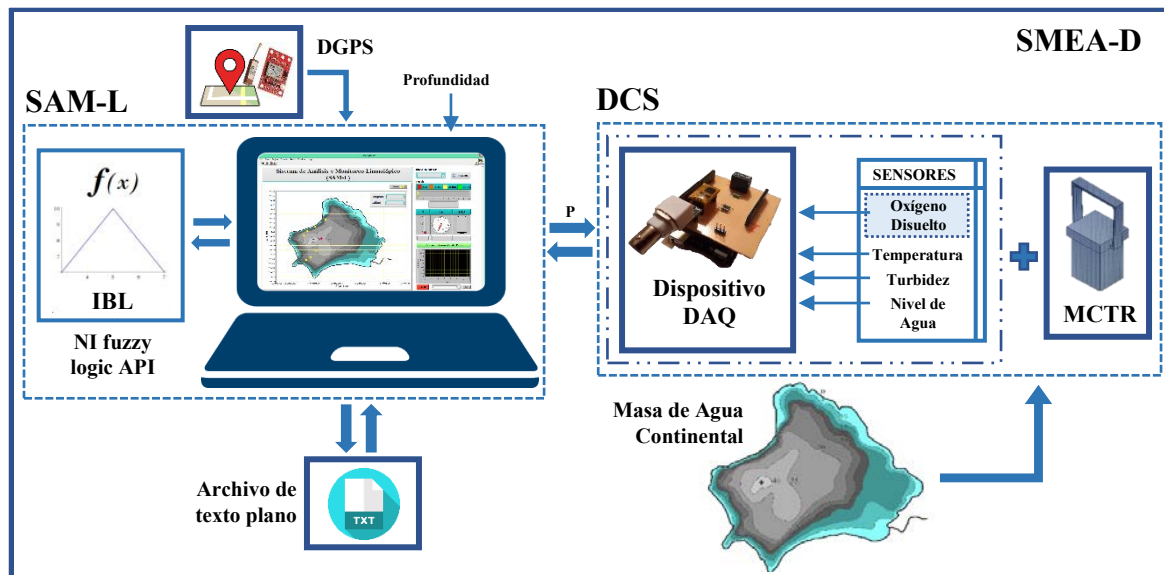


Fig. 5.2 Diagrama general del Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos – Distribuido (SMEA-D)

El segundo diseño elaborado fue el de un sistema distribuido, que, a diferencia del sistema embebido, este tiene una conexión USB para establecer la comunicación serial con la computadora, cabe mencionar que para el sensor de oxígeno disuelto se utiliza un protocolo de comunicación I²C. Al realizar el cambio anterior, se eliminó la memoria EEPROM y el botón de toma de mediciones, esto se debe a que ahora una interfaz gráfica elaborada en LabVIEW es la encargada de establecer cuando se toma la medición y de almacenar los valores medidos en una base de datos. Además, los valores medidos son analizados por medio del SAM-L, que contiene un Sistema de Inferencia Difusa, obteniendo un Índice Biótico Lacustre (IBL).

El Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos Distribuido (**SMEA-D**) está compuesto de dos bloques principales: del Sistema de Análisis y Monitoreo Limnológico (**SAM-L**) y del Dispositivo Contenedor Sumergible (**DCS**). Es de suma importancia mencionar que el SMEA basa su funcionamiento en dos procesos fundamentales: el Proceso de Adquisición de Datos y el Proceso de Análisis de Datos.

I. Proceso de Adquisición de Datos

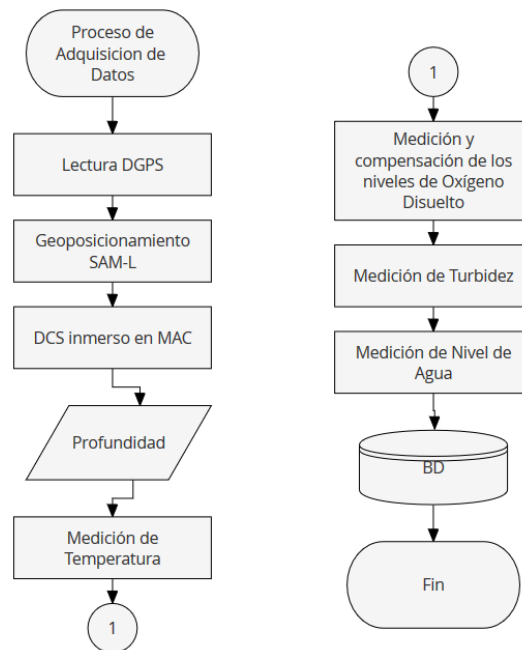


Fig. 5.3 Diagrama de flujo del proceso de adquisición de datos.

Este comienza cuando se ingresa a la plataforma de adquisición de datos dentro del SAM-L, el cual obtiene las mediciones del dispositivo GPS (**DGPS**) que entrega constantemente los valores de lectura obtenidos, permitiendo el geoposicionamiento en los puntos de interés necesarios. Una vez que el SAM-L logra geoposicionarse, el DCS es inmerso en la **masa de agua continental (MAC)** con el objetivo de colocarlo a una cierta profundidad, misma que es ingresada al sistema. Cuando el DCS se encuentra geoposicionado y sumergido a la profundidad requerida, está listo para realizar la medición de los cuatro **sensores** involucrados en el SMEA: *Oxígeno Disuelto*, *Temperatura*, *Turbidez* y *Nivel de Agua*. El SAM-L indica al Dispositivo de Adquisición de Datos (**DAQ**), resguardado dentro del Módulo Contenedor Tri-

paramétrico (**MCTR**), realizar la lectura de los sensores y compensar los niveles de oxígeno disuelto afectados por la profundidad. Finalmente, las mediciones son almacenadas en un **archivo de texto plano** para su posterior análisis.

II. Proceso de Análisis de Datos

Para poder visualizar la información recolectada por el DCS, el SAM-L realiza la lectura de las mediciones almacenadas en el archivo de texto plano, para posteriormente analizar los datos obtenidos haciendo uso de la API (por sus siglas en inglés *Application Programming Interface*) de lógica difusa de National Instruments (**NI fuzzy logic API**), la cual contiene el sistema de inferencia difusa que nos permite obtener el Índice Biótico Lacustre (**IBL**).

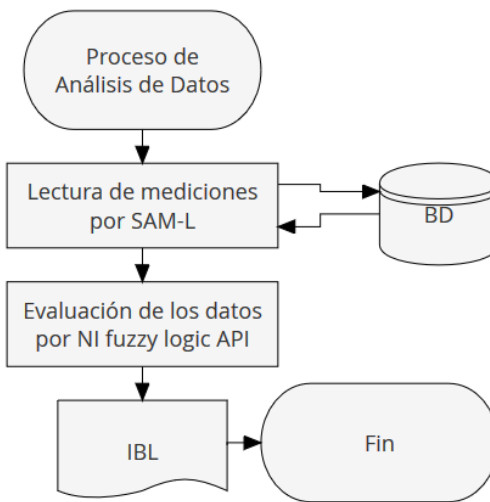


Fig. 5.4 Diagrama de flujo del proceso de analisis de datos.

5.1 Dispositivo Sumergible

En la Figura 5.5, se observa el diagrama esquemático del sistema embebido.

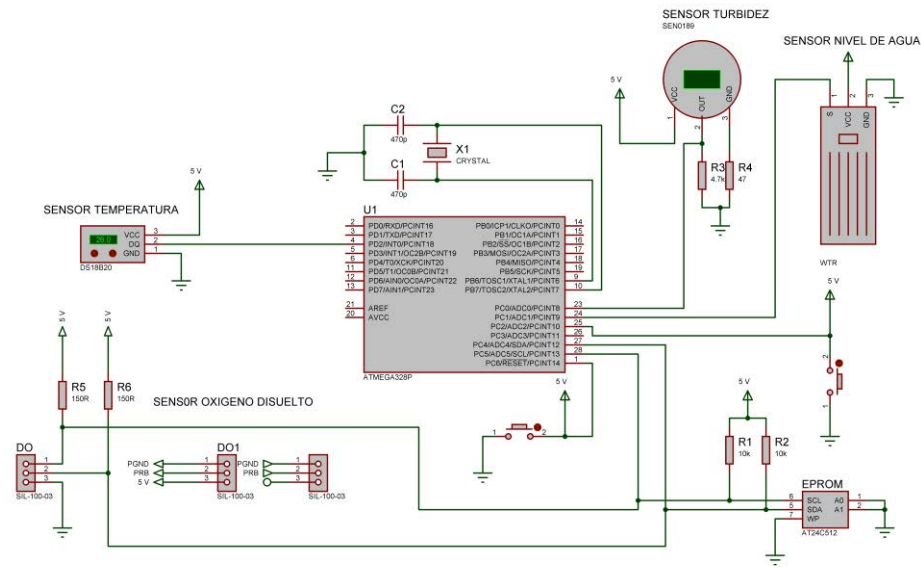


Fig. 5.5 Diagrama esquemático del Dispositivo Sumergible.

En este apartado solo se hará mención de la interacción entre la memoria de almacenamiento y el dispositivo DAQ, pues la descripción del acondicionamiento de los sensores así como del diseño de la tarjeta final, serán mencionados en las secciones posteriores.

a) EEPROM

La EEPROM utilizada fue la AT24C512, esta como ya se mencionó antes tiene una capacidad de 512 Kb, la cual permite almacenar un total de 96 mediciones diarias por seis meses, es decir 17280 mediciones. El cálculo es el siguiente:

$$512 \text{ Kbytes} = 512 \times 1024 = 524,288 \text{ bits}$$

La memoria tiene una capacidad real de 524,288 bits, mientras que la cadena de caracteres enviada por el dispositivo DAQ y almacenada dentro de la EEPROM es de 25 bits, a continuación, se realiza la división de estos valores, para saber el número total de mediciones que puede almacenar la memoria.

$$\frac{524,288 \text{ bits}}{25 \text{ bits}} = 20,971$$

El resultado obtenido fue 20,971, que nos indica el número total de mediciones que podemos almacenar. Cabe mencionar, que la memoria se conectaba mediante un protocolo I2C a el dispositivo DAQ.

Por otro lado, el botón implementado en el sistema embebido ayudaba en la toma de mediciones ya que era presionado cuando el DS era sumergido a la profundidad deseada.

5.2 Dispositivo Contenedor Sumergible

a) Dispositivo de Adquisición de Datos

En esta etapa del desarrollo se llevó a cabo el acoplamiento de los sensores de cada uno de los parámetros involucrados en el sistema como se muestra en el diagrama esquemático de la figura 5.6, diseñando una placa de medición que contiene todo lo necesario para el correcto funcionamiento de estos en el software de automatización de diseño electrónico PROTEUS. A diferencia del diseño anterior, este nuevo diseño cuenta con el acoplamiento de un puerto de comunicación, el cual nos permite implementar la comunicación serial entre el Arduino y la computadora.

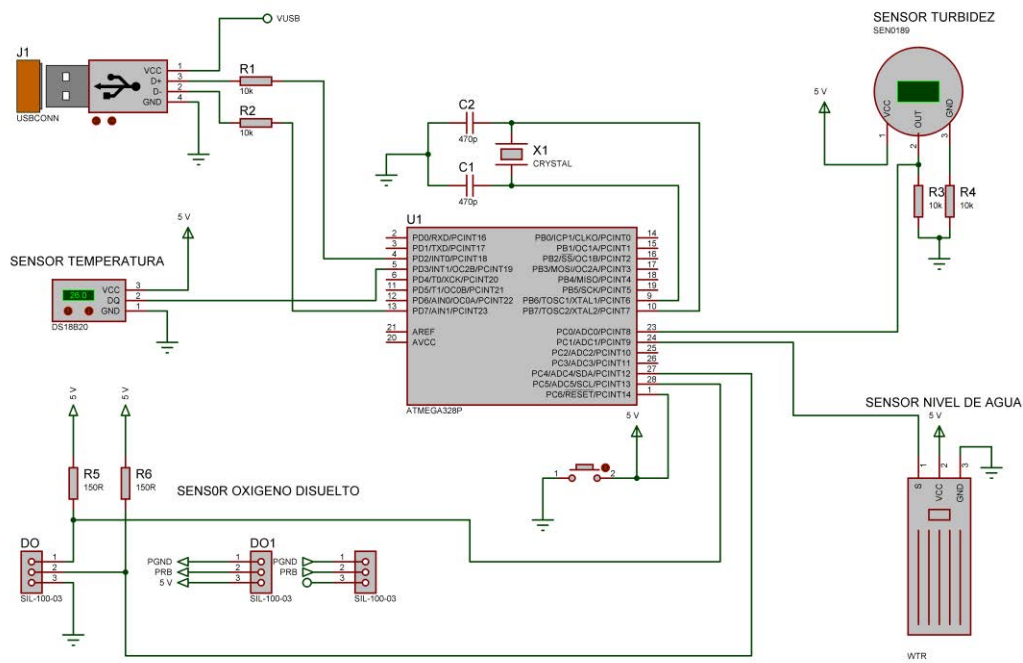


Fig. 5.6 Diagrama esquemático del Dispositivo Contenedor Sumergible.

Cabe mencionar que la placa de medición desarrollada, junto con el Arduino forman el Dispositivo de Adquisición de Datos (DAQ). En la Figura 5.7, se muestra la visualización 3D de la placa de medición.

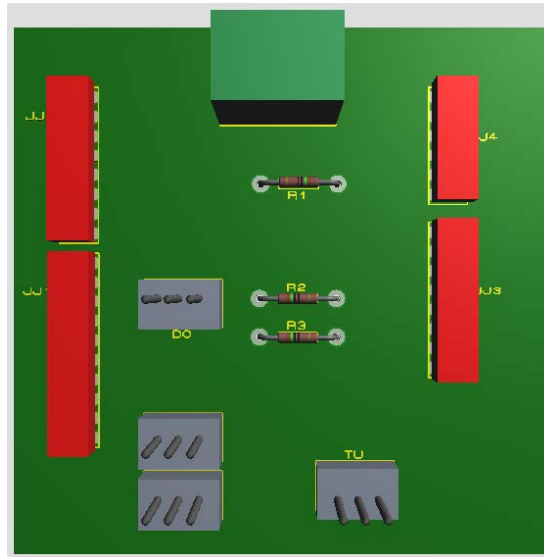


Fig. 5.7 Placa de medición en 3D.

1. Temperatura

La medición de este parámetro se realizó con el sensor digital DS18B20, el cual se conecta a la placa por medio de un T-block de 3 entradas (positivo, señal y tierra), ofreciendo una gran facilidad de manipulación, es decir, se puede montar y desmontar el sensor rápidamente.

En la Figura 5.8, se muestra la conexión de este sensor en la placa de medición, que al contar con una salida digital fue conectado al pin 2 del Arduino. Cabe mencionar, que se conectó una resistencia de pull up al pin de salida, evitando así los falsos estados que se producen por el ruido generado en el circuito electrónico.

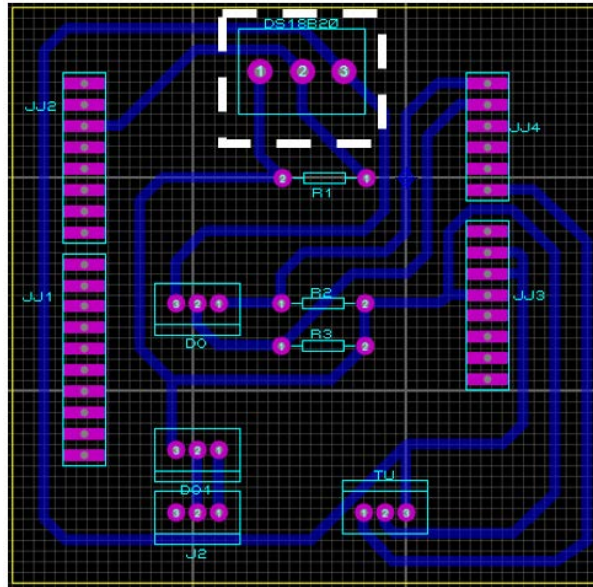


Fig. 5.8 Conexión del sensor de temperatura en el PCB.

La programación de este sensor necesita la descarga de dos librerías de Arduino IDE que son: OneWire y DallasTemperature. El código de la función temperatura es el siguiente.

```
float temperatura()
{
    sensors.requestTemperatures();
    float te=sensors.getTempCByIndex(0);
    return te;
}
```

Fig. 5.9 Código de la función temperatura.

La primera línea prepara el sensor para la lectura de la temperatura, posteriormente la segunda línea obtiene el valor medido y lo almacena en la variable “te”.

2. Oxígeno Disuelto

La medición de este parámetro hace uso del sensor de oxígeno disuelto de la marca ATLAS SCIENTIFIC y de su respectivo circuito denominado EZO. La comunicación de este sensor con la computadora utilizó el protocolo serial I²C, razón por la cual se conectó el circuito EZO con los puertos SDA y SCL (puertos analógicos A4 y A5

respectivamente) de la tarjeta Arduino, siendo 97 el identificador de uno de los esclavos. En la Figura 5.3, se muestra la conexión mencionada con anterioridad.

La cabecera WIRE fue necesaria para programar el sensor de oxígeno disuelto ya que incluye todos los comandos y funciones requeridos. Debido a la naturaleza del sistema, las mediciones del sensor necesitan ser compensadas, con base en los parámetros de temperatura y presión; esta última ya definida y dependiente de la profundidad.

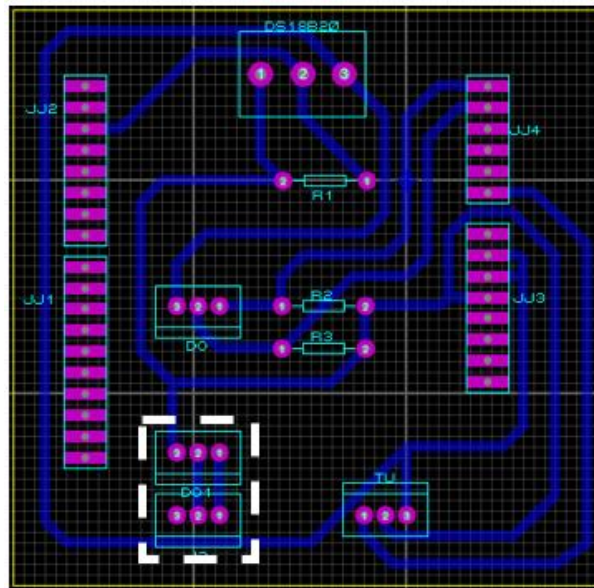


Fig. 5.10 Conexión del sensor de Oxígeno disuelto en el PCB.

El código de programación del sensor de oxígeno disuelto es el siguiente:

```

float oxigeno(float temp, float pre)
{
    Wire.write("T,temp");
    Wire.write("P,pre");
    time_=800;
    delay(time_);
    Wire.beginTransmission(address0);
    Wire.write("R");
    Wire.endTransmission();
    delay(time_);
    Wire.requestFrom(address0,20,1);
    code=Wire.read();
    int i=0;
    while(Wire.available())
    { in_char = Wire.read();
      DO_data[i]= in_char;
      i+=1;
      if(in_char==0)
      { i=0;
        Wire.endTransmission();
        break;
      }
    }
    DO_=atof(DO_data);
    return (DO_);
}

```

Fig. 5.11 Código de programación del sensor de oxígeno disuelto.

Es esta función se observa cómo los parámetros de entrada son la temperatura y la presión, ya que en las primeras dos líneas de código se utilizan dichos valores para compensar la medición de los niveles de oxígeno disuelto. Además, otra línea de código importante es donde se manda a escribir el carácter “R” al circuito EZO, haciendo que el sensor realice una medición y se active el modo de reposo, evitando las mediciones continuas. Finalmente, en la penúltima línea de código se le asigna el valor medido del oxígeno disuelto a la variable DO_.

3. Turbidez

La medición de este parámetro emplea el sensor de turbidez SEN0189, el cual cuenta con una salida digital o analógica. Este proyecto utilizó la salida analógica conectándose en el pin A0 de la tarjeta Arduino mediante un header de 3 pines. En la Figura 5.4, se muestra la conexión de dicho sensor.

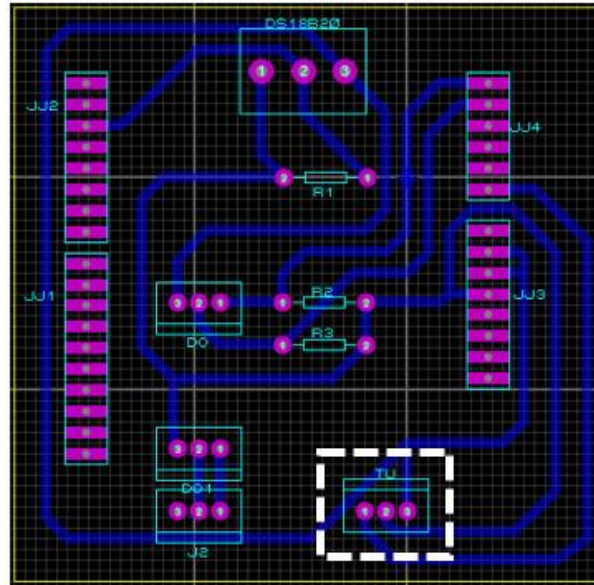


Fig. 5.12 Conexión del sensor de turbidez en el PCB.

La programación de este sensor se llevó a cabo en dos partes: la primera consiste en obtener la medición del sensor y transfórmalo a un valor en voltaje, mientras que la segunda consta de convertir el voltaje a la unidad de medida estándar para valores de turbidez, es decir a NTU, estableciendo una función que relacione a ambas, como se expresa a continuación:

$$NTU = 660 - ((150 * voltaje) - 80)$$

Una vez establecida la expresión anterior, el código de programación de la función turbidez es el siguiente:

```
float turbidez()
{
  int sensorValue = analogRead(A0);
  float voltage = sensorValue * (5.0 / 1024.0);
  float NTU = 660 - ((150 * voltage) - 80);
  return NTU;
}
```

Fig. 5.13 Código de programación de la función turbidez.

Tal y como se aprecia en el código, las dos primeras líneas de este se encargan de hacer la lectura de la medición y convertirlo a voltaje, mientras que, la tercera línea de código transforma el voltaje obtenido a valores de NTU.

4. Sensor de Nivel de Agua

Este sensor fue acoplado para conocer si el MCTR presentaba alguna filtración de agua hacia su interior que pudiera dañar la electrónica. El sensor de nivel de agua fue conectado en la terminal A1 de la tarjeta Arduino, ya que su salida es analógica. La programación de dicha función se presenta a continuación:

```
void nivel(void)
{
    float nivel=analogRead(A1);
    float conversion= (5*nivel)/720;
    if(conversion>1){
        Serial.print("AYUDA*");}
}
```

Fig. 5.14 Código de programación de la función nivel.

Como se puede apreciar, se realiza una conversión para obtener el voltaje, sin embargo, el sensor arroja valores de 5 volts si detecta agua o 0 volts si no hay presencia de esta. Por esta razón, se estableció una condición que evalúa la presencia de agua dentro del MCTR y en caso de cumplirla, se imprime la palabra “AYUDA”.

5. Arduino

Se utilizó la placa Arduino UNO para llevar a cabo la programación y acoplamiento de todo el dispositivo DAQ, debido a la cantidad de entradas analógicas y digitales con las que cuenta. En la Figura 5.5, se muestra el sistema de adquisición de datos.

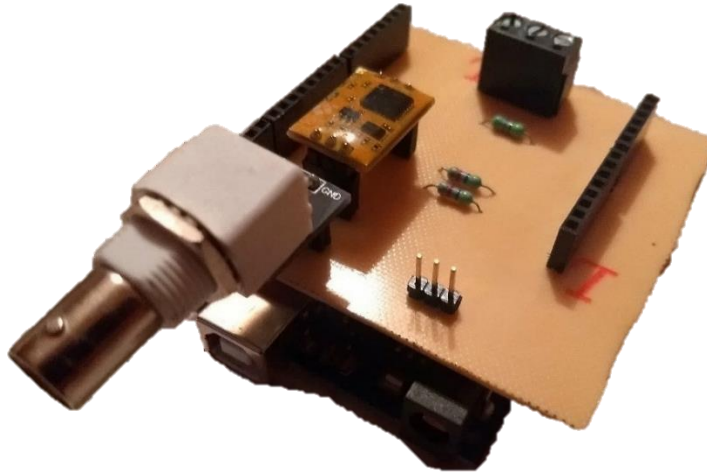


Fig. 5.15 Tarjeta de Adquisición de datos.

La programación del sistema en general es la siguiente:

```
void loop()
{
  char inChar= Serial.read();
  if(inChar=='r')
  {
    temp=temperatura();
    tu=turbidez();
    pre=101.3;
    ox=oxigeno(float (temp), float (pre));
    imprimir(float (temp), float (tu), float (ox));
    Serial.print("END");
    nivel();
    Serial.print("\n");
  }
  if(inChar=='R')
  {
    temp=temperatura();
    tu=turbidez();
    pre=152;
    ox=oxigeno(float (temp), float (pre));
    imprimir(float (temp), float (tu), float (ox));
    Serial.print("END");
    nivel();
    Serial.print("\n");
  }
}
```

Fig. 5.16 Código de programación de la función principal.

Nótese que para iniciar la medición de todos los sensores es necesario esperar un carácter de entrada, ya sea un “r” o un “R”, el cual es dependiente de la profundidad a la que el DCS sea sumergido, es decir, si el dispositivo se encuentra a 10 metros o menos, el sistema recibe el carácter “r”, lo cual implica que el valor de la presión con

la que el sensor de oxígeno disuelto necesita ser compensado es de 101.3 kPa; en caso contrario, de superar los 10 metros de sumersión, el dispositivo DAQ recibe el carácter “R”, indicando que el valor de la presión con el que se debe compensar los niveles de oxígeno disuelto es de 152 kPa.

Posteriormente, se manda a llamar la función de cada parámetro para obtener su medición y finalmente el dispositivo DAQ envía los resultados obtenidos al SAM-L en forma de cadena para su análisis y visualización.

b) Módulo GPS

El sensor utilizado para obtener el posicionamiento dentro del lago es el NEO-6M GPS, este se conecta de manera directa al puerto USB de la computadora, utilizando un adaptador USB-Serial para establecer la comunicación entre ambos. Las mediciones son leídas y procesadas posteriormente en el SAM-L. En la Figura 5.6, se observa la conexión del dispositivo con su adaptador.



Fig. 5.17 Dispositivo GPS.

c) Módulo Contenedor Tri-paramétrico.

Este módulo es de gran relevancia ya que es el encargado de salvaguardar el dispositivo de adquisición de datos, para ser sumergido dentro del lago. Es por eso, que se decidió realizar una estructura de acero inoxidable con el espacio necesario para almacenar el dispositivo DAQ y solo dejar al descubierto los sensores encargados de realizar las mediciones. En las Figuras 5.18-22, se muestra el diseño de la estructura.

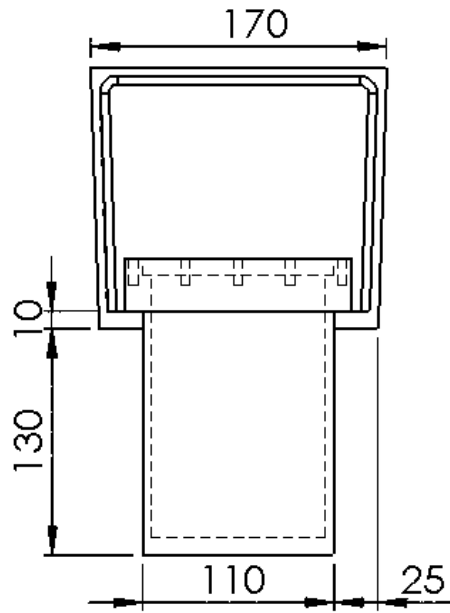


Fig. 5.18 Vista frontal del MCTR.

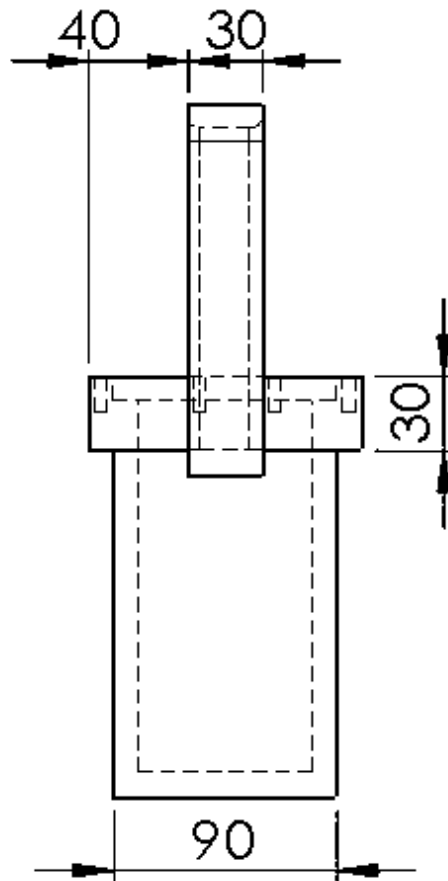


Fig. 5.19 Vista lateral del MCTR sin tapa.

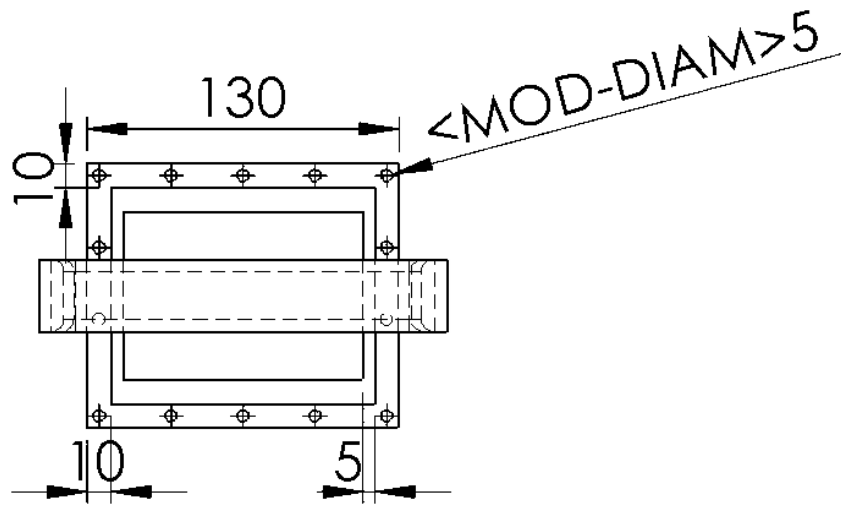


Fig. 5.20 Vista superior del MCTR sin tapa.

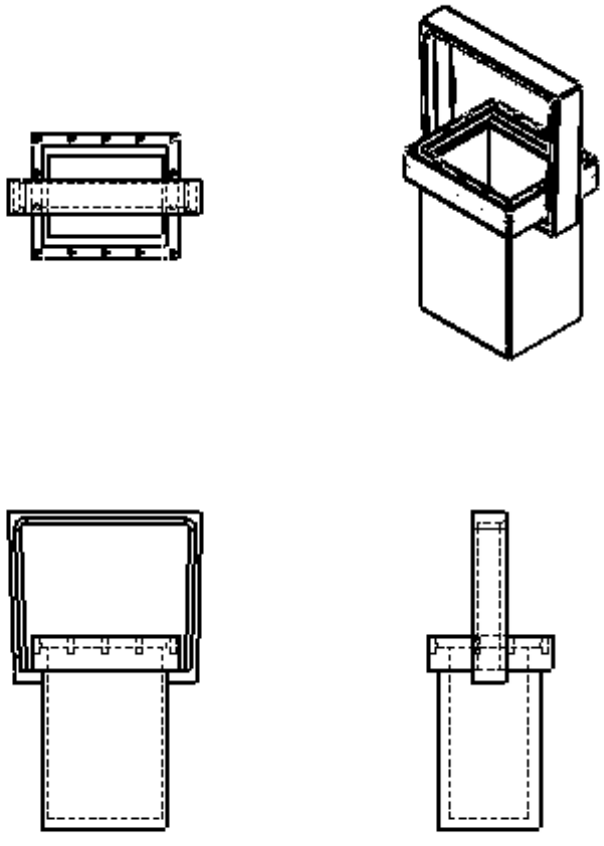


Fig. 5.21 Plano del MCTR sin tapa.

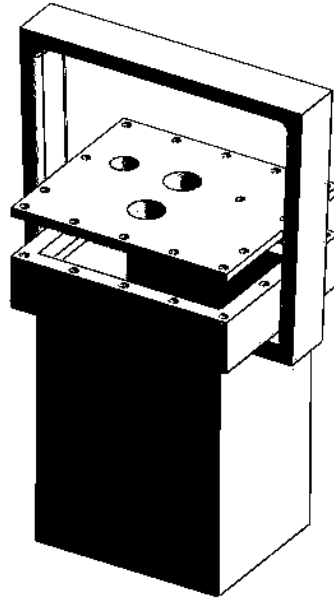


Fig. 5.22 Isométrico del MCTR con tapa.

La tapa del módulo cuenta con cuatro orificios, tres de ellos se emplean para exteriorizar los sensores de turbidez, temperatura y oxígeno disuelto, ya que necesitan tener contacto directo con el agua, con el objetivo de realizar las mediciones; el cuarto se ocupa para permitir la conexión vía USB del cable de datos entre el dispositivo DAQ y la computadora. En las Figuras 5.23-25, se muestra el diseño de este.

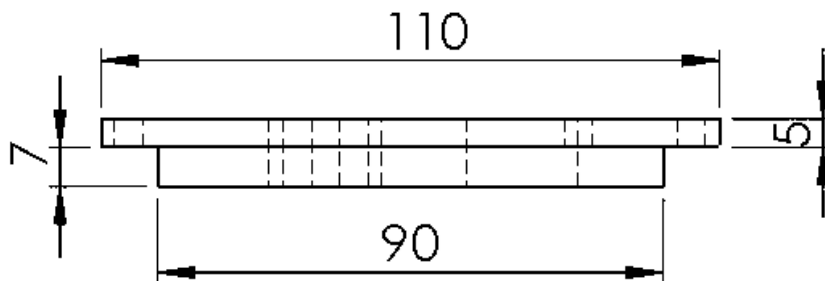


Fig. 5.23 Vista lateral de la tapa del MCTR.

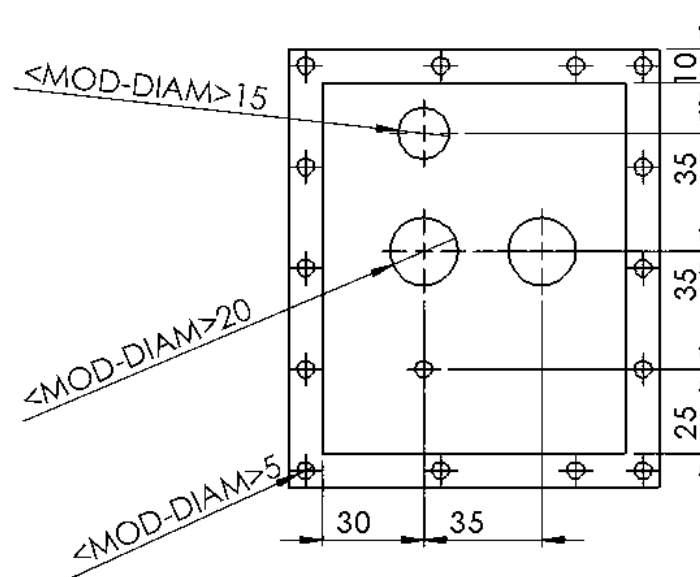


Fig. 5.24 Vista superior de la tapa del MCTR.

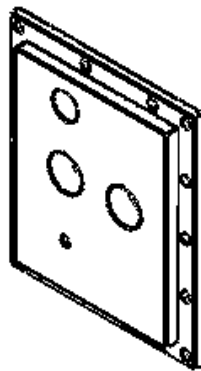


Fig. 5.25 Isométrico de la tapa del MCTR.

Su visualización en 3D se muestra en la Figura 5.26.

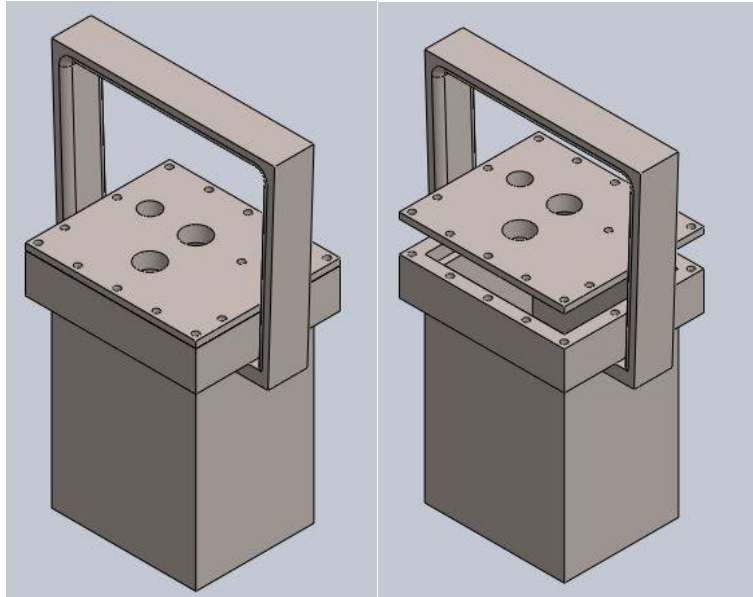


Fig. 5.26 Visualización 3D del MCTR completo.

En la Figura 5.27, se muestra la estructura final del DCS.



Fig. 5.27 MCTR.

5.3 Sistema de Análisis y Monitoreo Limnológico (SAM-L)

El Sistema de Analisis y Monitoreo Limnológico es un software de aplicación dedicado al procesamiento de los datos obtenidos respecto de los parámetros limnológicos requeridos. El SAM-L consta de tres principales módulos: medición, análisis y visualización. La Interfaces Gráficas de Usuario mostradas en las siguientes secciones y la programación involucrada fue desarrollada gracias al software de Desarrollo LabVIEW 14.0.

a) Software de medición

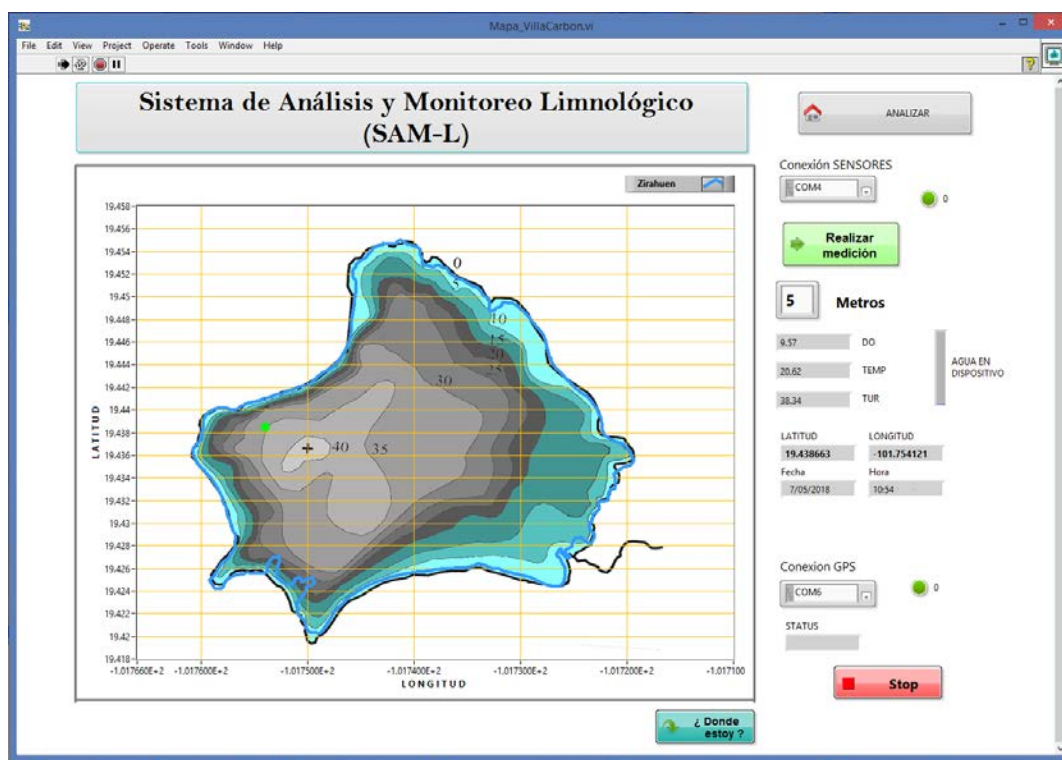


Fig. 5.28 GUI del Software de Medición del SAM-L.

El software de medición es el encargado de obtener las coordenadas geográficas del punto a caracterizar, así como los valores medidos por el DCS referentes a los niveles de oxígeno disuelto, temperatura, turbidez y nivel de agua si es que existe presencia de ésta dentro del MCTR. Para poder llevar a cabo esta medición se realiza el siguiente procedimiento:

1. El SAM-L necesita geoposicionarse en el mapa, por lo tanto, es necesario realizar la lectura del DGPS por medio de la comunicación serial mediante la configuración mostrada en la Fig. 5.29.
2. Una vez configurado y seleccionado el puerto de comunicación, el SAM-L se encuentra listo para geoposicionarse siempre y cuando el botón con la leyenda “¿Dónde Estoy?” haya sido presionado.
3. Después de ser presionado el botón que nos permite el geoposicionamiento, un punto verde dentro de nuestro gráfico es visualizado, dicho punto indica la posición exacta leída por el DGPS.
 - i. Con el objetivo de extraer los valores de longitud y latitud el sistema debe realizar la conversión de coordenadas de tipo Decimal Minutos (DM) a coordenadas de tipo Decimal Grados (DD), pues el DGPS envía las coordenadas en DM y el gráfico necesita leer los valores de las coordenadas en DD.

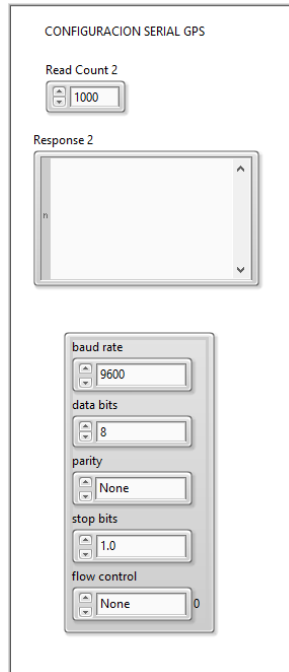


Fig. 5.29 Bloque de la configuración serial GPS.

- En dado caso de arrojar una medición incorrecta, el sistema lo advierte coloreando de rojo el indicador que se encuentra a un costado de la selección del puerto COM para la lectura del DGPS, de ser así, se debe volver a presionar el botón “¿Dónde Estoy?” hasta que la medición arrojada sea la correcta.

```

SGPGSV,3,3,09,51,65,203,33*46
SGPGLL,1930.21617,N,09908.89056,W,010214.00,A,A*7F
SGPRMC,010215.00,A,1930.21595,N,09908.89012,W,0.692,,180418,,A*64
SGPVTG,T,,M,0.692,N,1.281,K,A*24
SGPGGA,010215.00,1930.21595,N,09908.89044,W,1,05,1.47,2228.8,M,-7.5,M,*6B
SGPGSA,A,3,02,06,19,24,28,,,,,3.29,1.47,2.94*07
SGPGSV,3,1,09,02,65,282,28,06,56,014,28,12,24,326,23,17,29,050,36*75
SGPGSV,3,2,09,19,37,031,31,24,32,275,26,28,23,127,19,46,67,176,33*7A
SGPGSV,3,3,09,51,65,203,33*46
SGPGLL,1930.21595,N,09908.89044,W,010215.00,A,A*74
SGPRMC,010216.00,A,1930.21527,N,09908.89012,W,1.350,,180418,,A*67
SGPVTG,T,,M,1.350,N,2.500,K,A*23

```

LECTURA EXITOSA

```

SGPGSV,2,2,08,19,37,031,29,24,32,275,18,28,23,127,18,51,65,203,37*7E
SGPGLL,,,,,010147.00,V,N*49
SGPRMC,010148.00,V,,,,,180418,,N*75
SGPVTG,,,,,N*30
SGPGGA,010148.00,,,,,0,03,21.38,,,,,*61
SGPGSA,A,1,02,06,19,,,,,21.40,21.38,1.00*02
SGPGSV,3,1,09,02,65,280,25,06,56,014,28,07,,21,12,24,326,25*45
SGPGSV,3,2,09,17,,36,19,37,031,29,24,32,275,18,28,23,127,*46
SGPGSV,3,3,09,51,65,203,37*42
SGPGLL,,,,,010148.00,V,N*46
SGPRMC,010149.00,V,,,,,180418,,N*74
SGPVTG,,,,,N*30
SGPGGA,010149.00,,,,,0,04,21.34,,,,,*6B
SGPGSA,A,1,02,06,19,24,,,,,21.37,21.34,1.00*08
SGPGSV,3,1,09,02,65,280,25,06,56,014,28,07,,21,12,24,326,26*46
SGPGSV,3,2,09,17,,37,19,37,031,29,24,32,275,22,28,23,127,20*4C
SGPGSV,3,3,09,51,65,203,37*42

```

LECTURA FALLIDA

Fig. 5.30 Lectura exitosa y fallida provenientes del DGPS.

- Si el sistema ya ha logrado geoposicionarse, es momento de obtener los valores de las mediciones realizadas por el DCS; el SAM-L requiere del

ingreso por teclado de la profundidad, una vez indicado dicho valor, se procede a seleccionar el puerto de comunicación y el botón “Realizar Medición” puede ser presionado.

6. La configuración para el puerto de comunicación es la que se muestra en la figura 5.31.

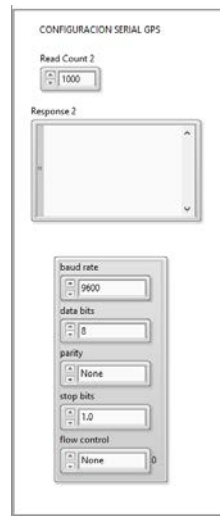


Fig. 5.31 Bloque de la configuración serial del DCS.

7. Cuando el botón “Realizar Medición” es presionado, el SAM-L envía el carácter “r” o “R” al DCS, el cual indica la toma de medición de los valores de los parámetros involucrados en ese punto específico.
8. Los valores obtenidos son mostrados en pantalla y almacenados en la base de datos.
9. En caso de estar algún error de comunicación entre el SAM-L y el DCS se muestra en pantalla el error que el sistema está presentando.

10. Si se requieren nuevas lecturas es necesario repetir los pasos del 3 al 10, en caso contrario puede terminar el programa con el botón de paro, denominado “Stop”.

11. Una vez que las mediciones han sido almacenadas, se puede presionar el botón “Analizar” con el objetivo de unir la información y visualizarla.

La programación a bloques del Software de Medición se puede apreciar en las figuras 5.32-41.

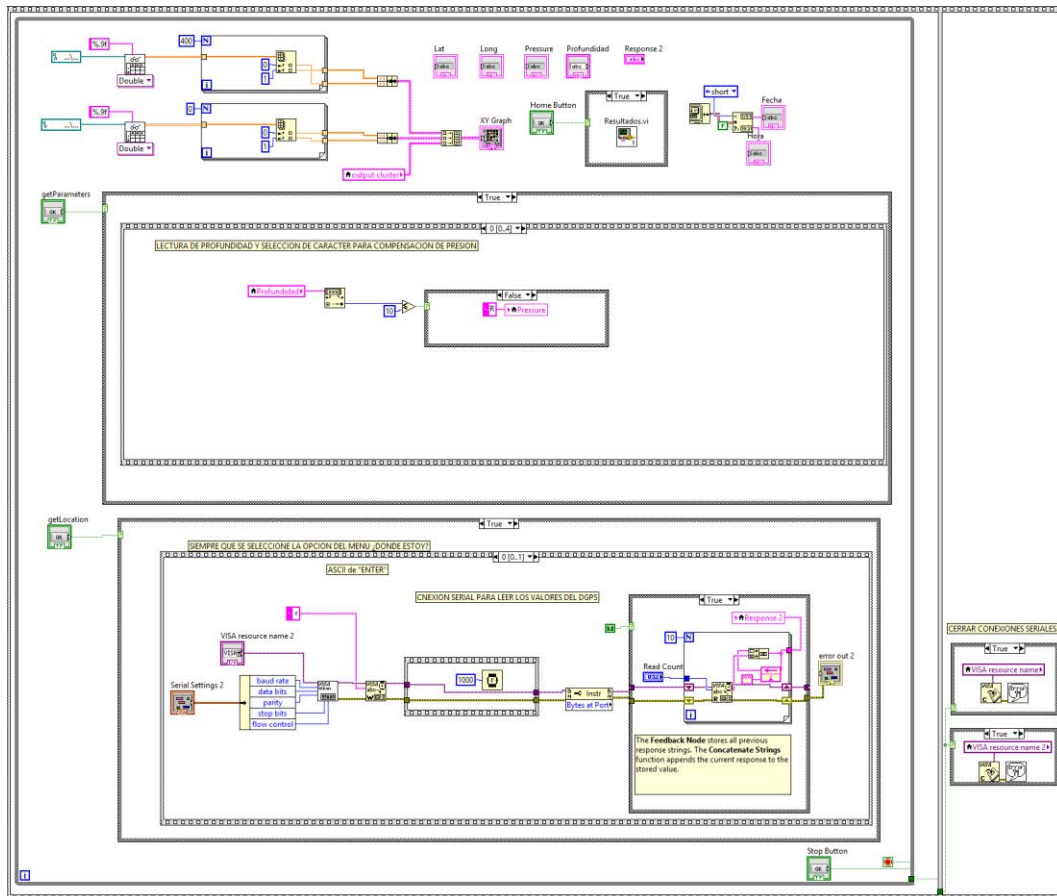


Fig. 5.32 Programación general del Software de Medición.

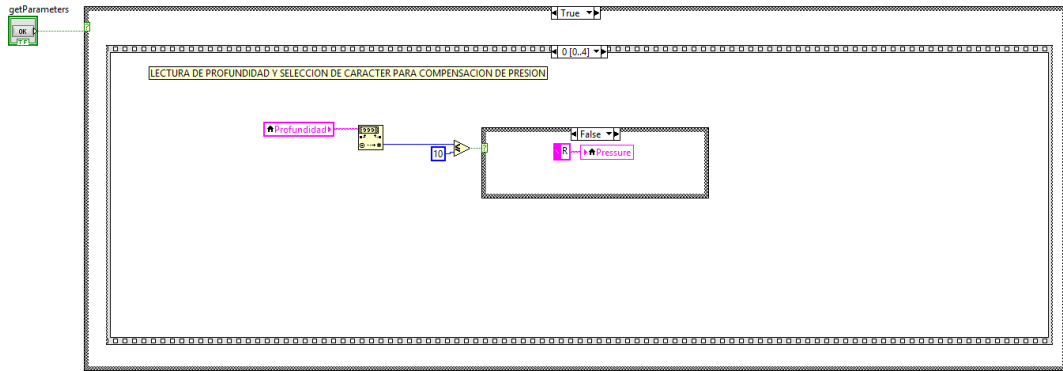


Fig. 5.33 Programación del bloque encargado de selección de carácter.

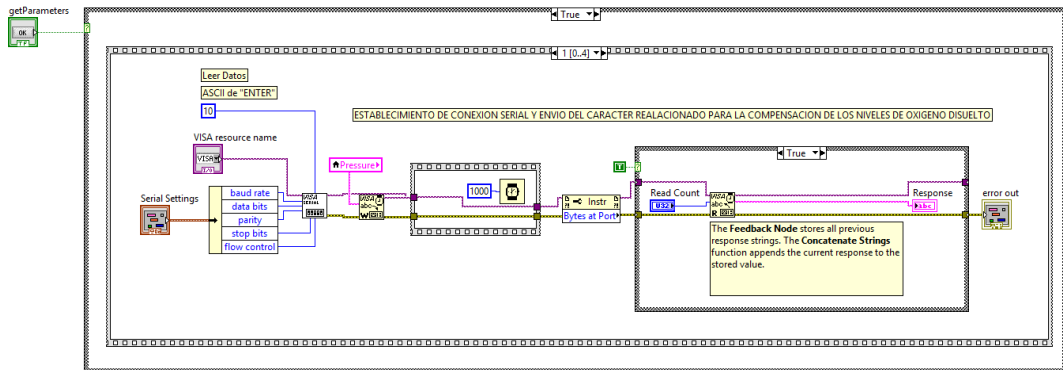


Fig. 5.34 Programación del bloque encargado de la comunicación serial.

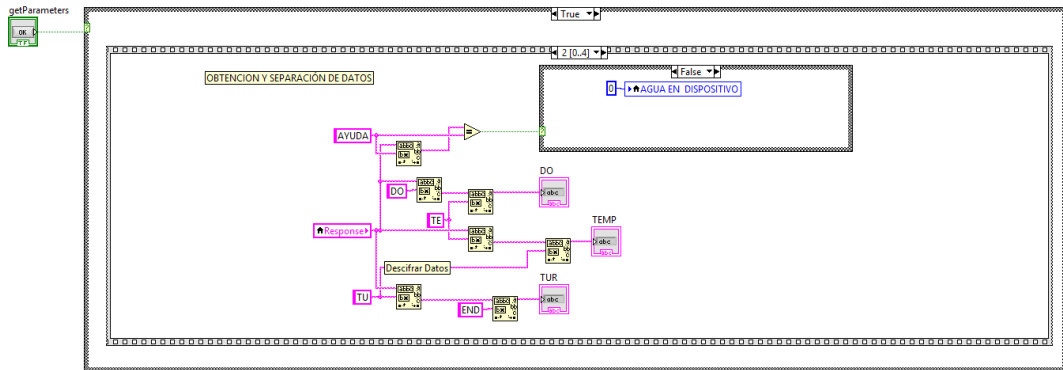


Fig. 5.35 Programación del bloque encargado de obtener y separar los datos medidos.

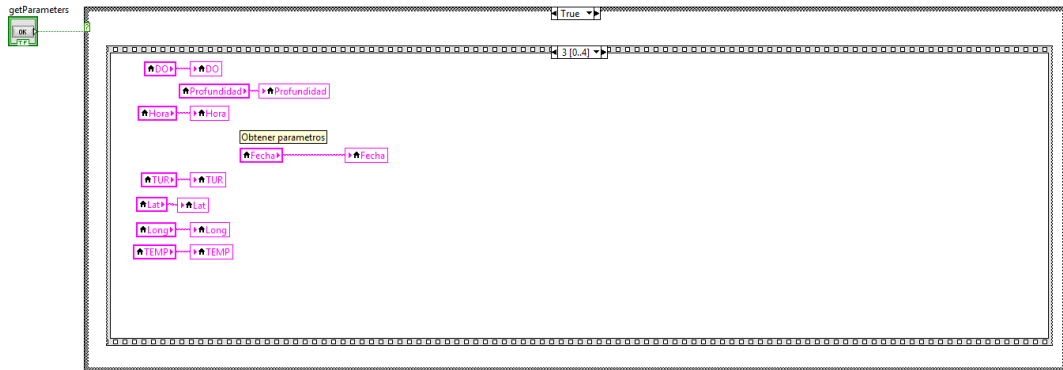


Fig. 5.36 Programación del bloque encargado de actualizar valores.

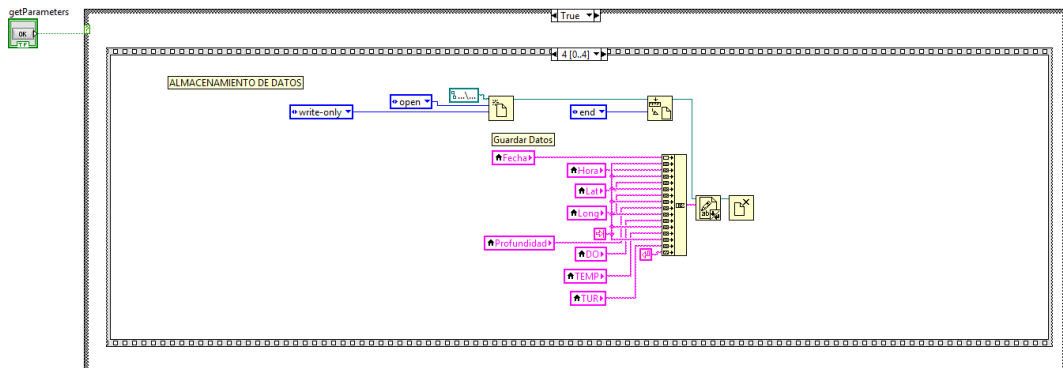


Fig. 5.37 Programación del bloque encargado de almacenar los datos en la base de datos.

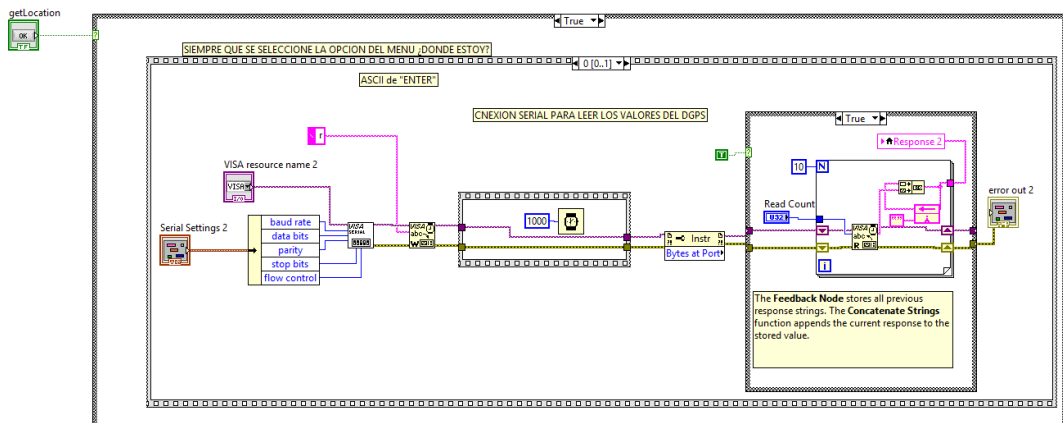


Fig. 5.38 Programación del bloque encargado realizar la conexión serial para lectura de datos del DGPS.

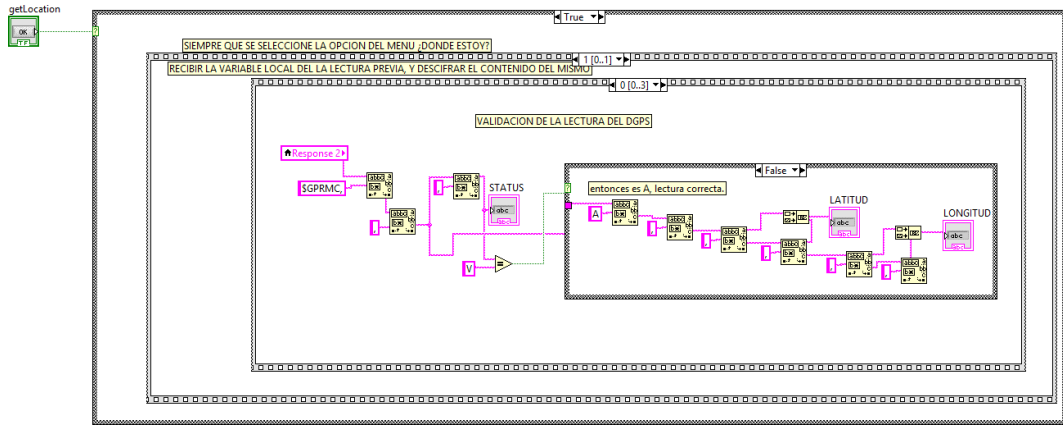


Fig. 5.39 Programación del bloque encargado de la validación de la lectura del GPS.

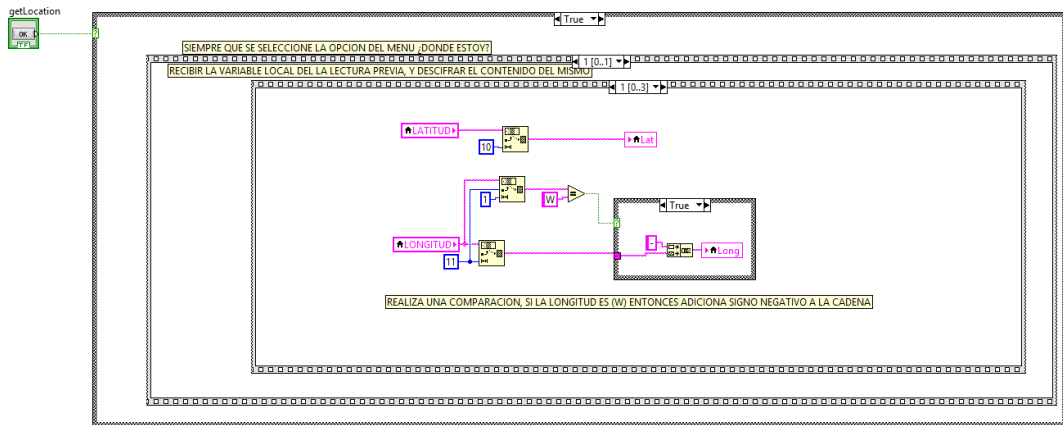


Fig. 5.40 Programación del bloque encargado de la conversión de coordenadas geográficas.

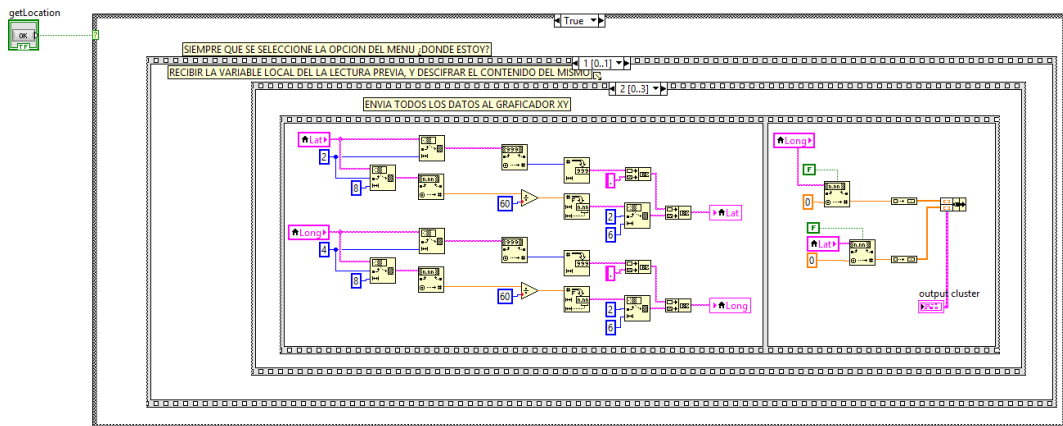


Fig. 5.41 Programación del bloque encargado de graficar los datos extraídos.

b) NI fuzzy logic API

El software de Programación LabVIEW cuenta con una herramienta de Control y Simulación llamada Fuzzy System Designer. La cual nos permitió la programación del Modelo de Evaluación mediante la implementación del sistema de inferencia difuso. Como se mencionó en el Capítulo 3, un sistema difuso consta de tres partes principales: variables lingüísticas, funciones de los miembros y reglas. Por lo tanto, el diseño del sistema difuso es un proceso de tres pasos: creación de variables lingüísticas, creación de funciones de membresía y creación de una base de reglas.

1. Creación de variables lingüísticas.

Cuando se diseña un sistema difuso, las variables lingüísticas representan las variables de entrada y salida del sistema, por lo tanto la API requirió de éstas. La fig. 5.42, muestra dicha creación.

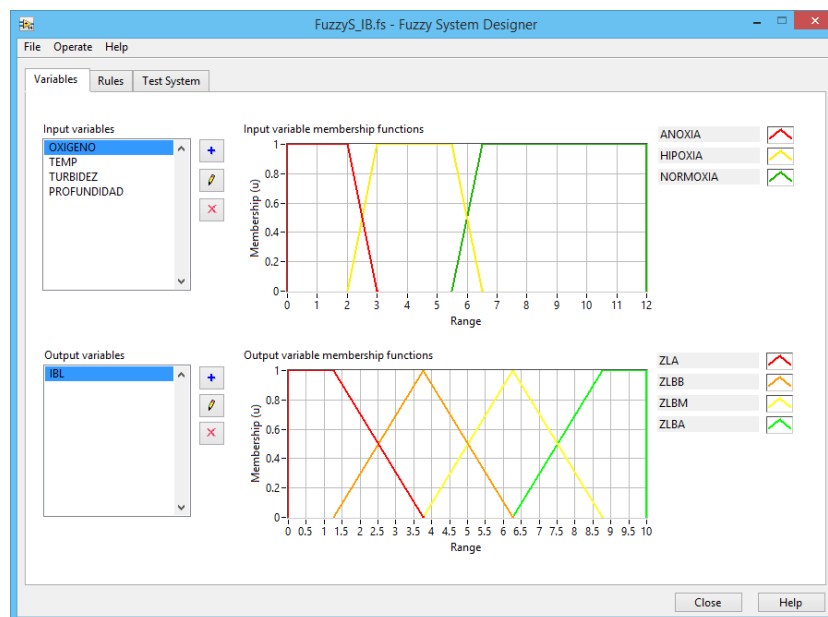
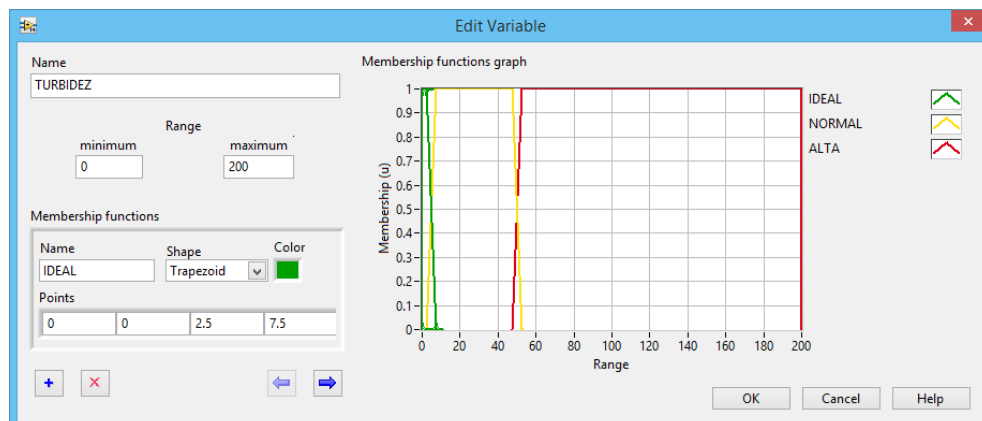
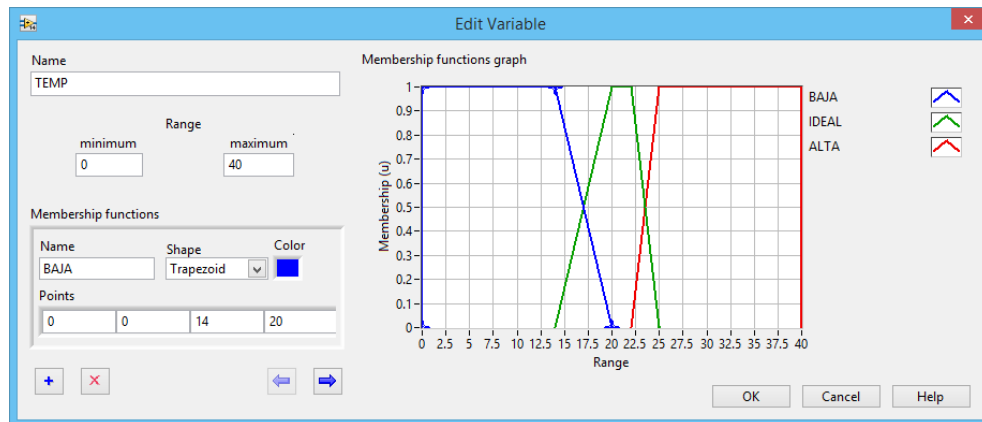
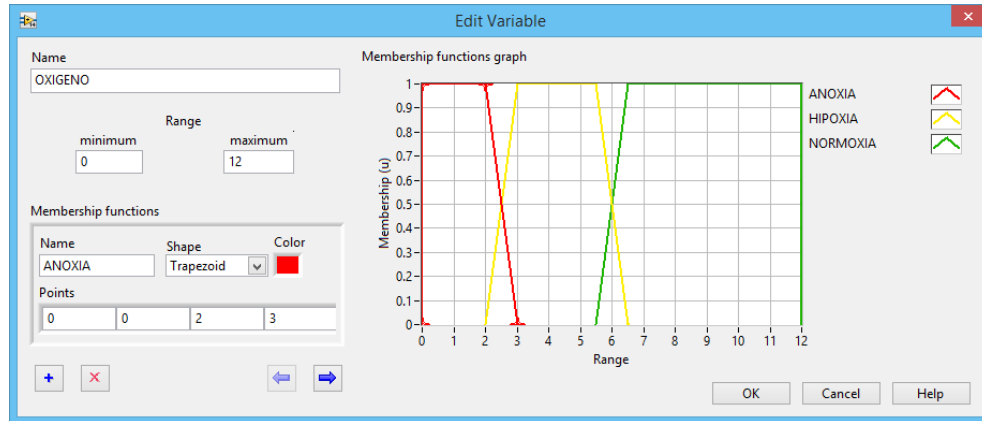


Fig. 5.42 Variables lingüísticas del FIS.

2. Creación de funciones de membresía

Después de definir las variables lingüísticas, se deben aplicar funciones de membresía a dichas variables. Como las funciones de membresía son funciones

numéricas que corresponden a términos lingüísticos, éstas representan el grado de membresía de las variables lingüísticas. Las funciones de membresía creadas en el sistema son las mismas funciones de membresía mencionadas en el Capítulo 4.



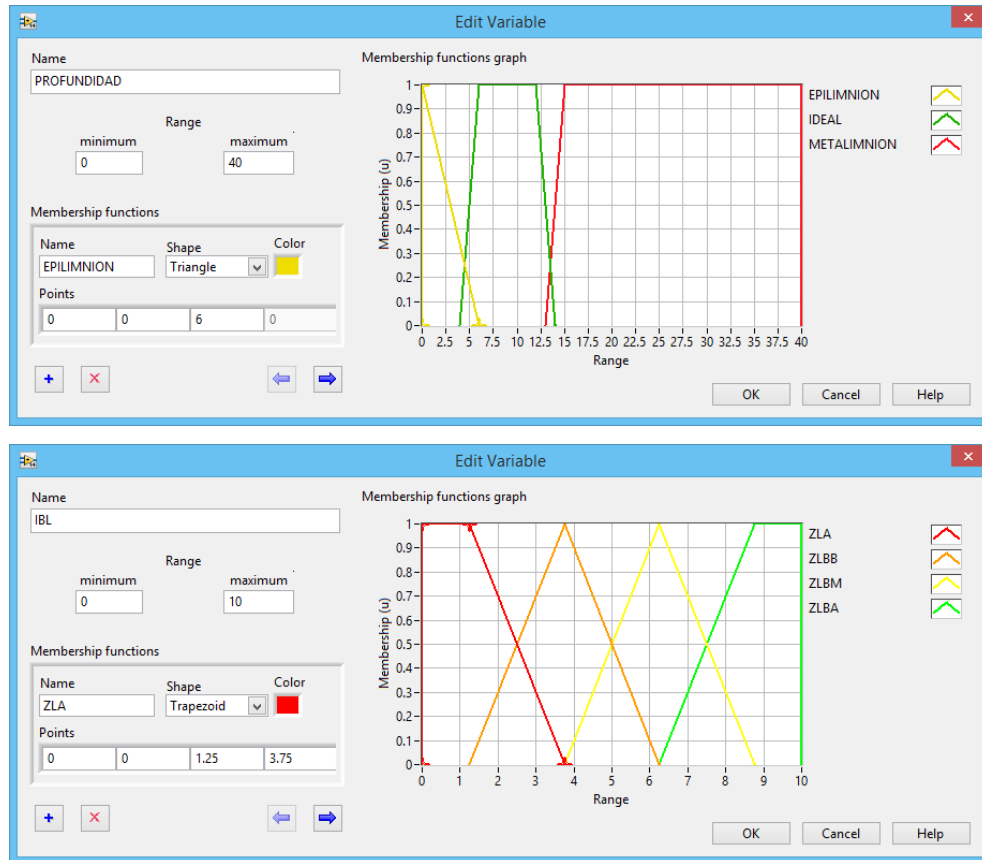


Fig. 5.43 Funciones de pertenencia del FIS.

3. Creación de una base de reglas

El último paso del diseño de sistemas difusos es crear una base de reglas. Las reglas describen, en palabras, las relaciones entre las variables lingüísticas de entrada y salida basadas en sus términos lingüísticos. Una base de reglas es el conjunto de reglas para un sistema difuso, y la herramienta de LabVIEW nos permite implementar esta base como la siguiente interfaz lo muestra.

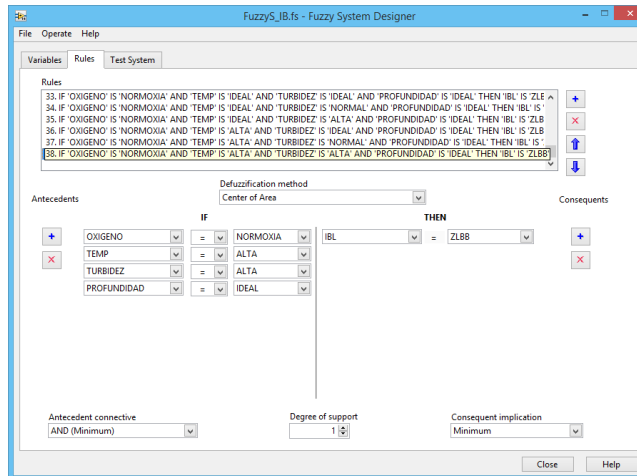


Fig. 5.44 Reglas de razonamiento del FIS.

c) Software de Visualización

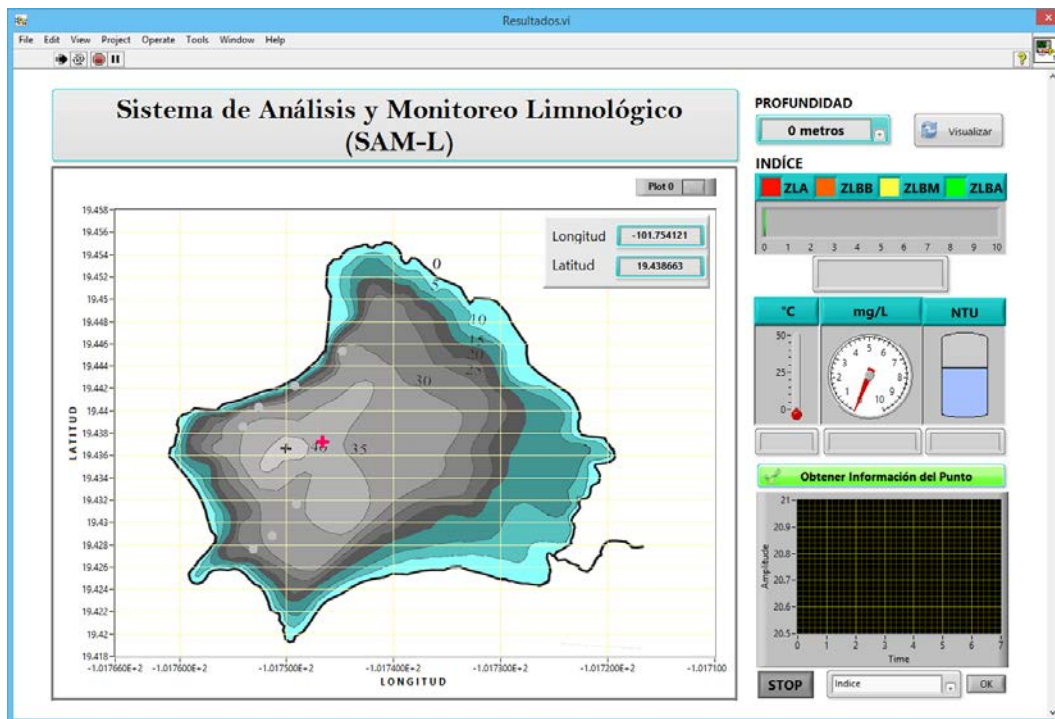


Fig. 5.45 GUI del Software de Visualización del SAM-L.

El software de visualización es el encargado de analizar la información recopilada por el software de medición, así como de visualizar a detalle cada parámetro respecto de un punto

geográfico específico a una profundidad indicada. Para poder llevar a cabo esta visualización y análisis se realiza el siguiente procedimiento:

1. Para poder visualizar los puntos geográficos obtenidos con el software de medición, así como la caracterización de cada punto, es necesario indicarle al sistema la profundidad a representar y posteriormente presionar el botón “Visualizar”
2. En la GUI de este módulo podemos apreciar cómo se colorean los puntos geográficos de acuerdo con el Índice Biótico Lacustre, el cual fue obtenido gracias a los VI's de lógica difusa implementados con el apoyo de la API de LabVIEW anteriormente mencionada.
3. También es posible apreciar un cursor en forma de cruz dentro del gráfico, el cual nos indica la posición de los puntos geográficos analizados; mediante el cursor se puede seleccionar el punto a visualizar su información correspondiente, es decir, altitud, longitud, puntuación del IBL, niveles de oxígeno disuelto, temperatura, así como turbidez medida en ese punto a esa profundidad, siempre y cuando el botón “Obtener información del Punto” haya sido presionado.
4. En la parte inferior derecha de la GUI, se observa un gráfico que nos muestra los valores obtenidos por conjunto de los diferentes parámetros visualizados, respecto de la profundidad indicada en un principio; es necesario seleccionar el parámetro a visualizar dentro de ese gráfico y después presionar el botón de “OK”.
5. En caso de requerir analizar un nivel diferente de profundidad, repetir los pasos 1-4
6. El botón de “STOP” debe ser presionado cuando se requiera salir de la aplicación.

La programación a bloques del Software de Visualización se puede apreciar en las figuras 5.46-49.

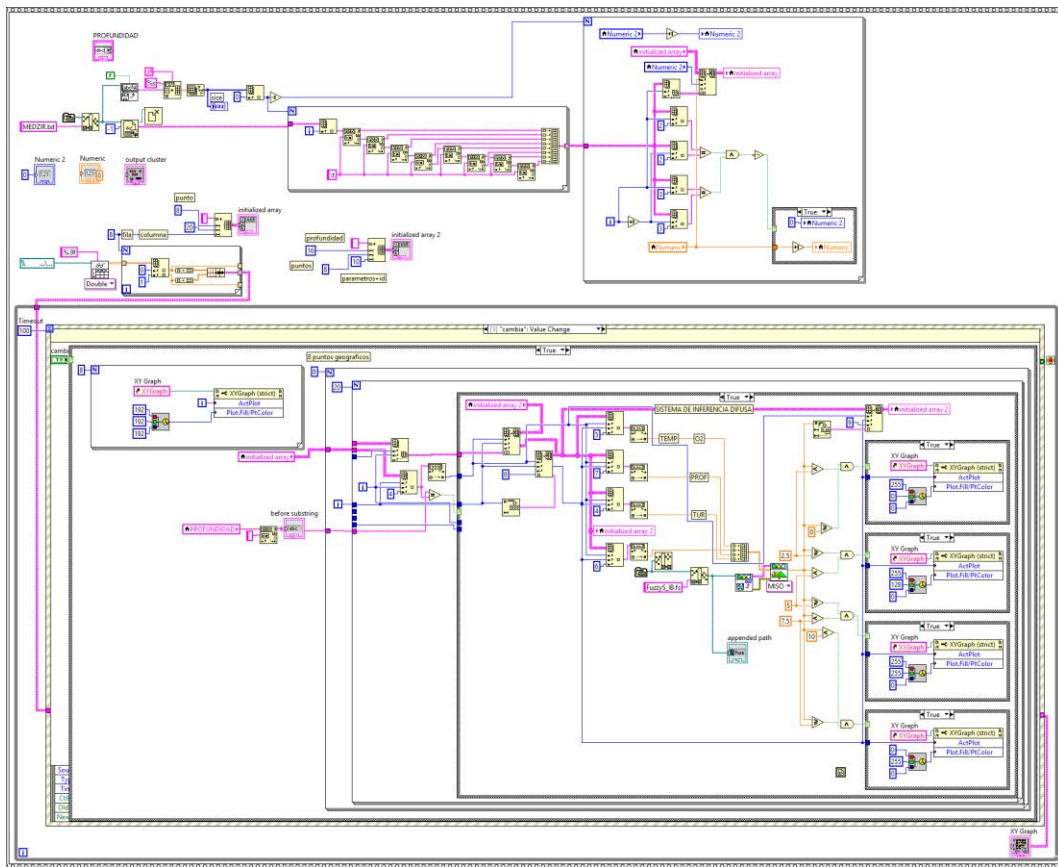


Fig. 5.46 Programación general del Software de Visualización

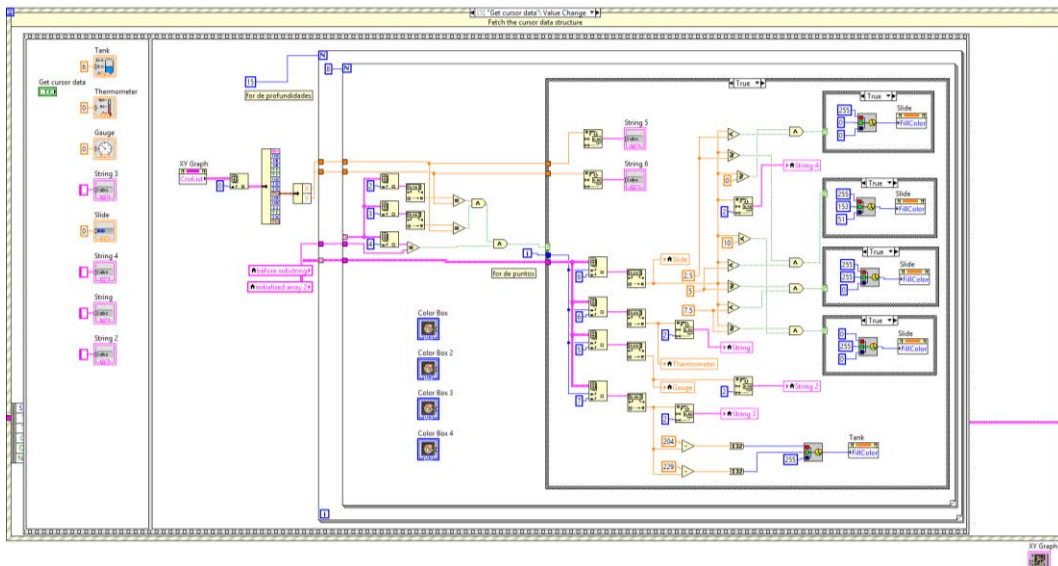


Fig. 5.47 Programación del bloque encargado de la obtención de datos

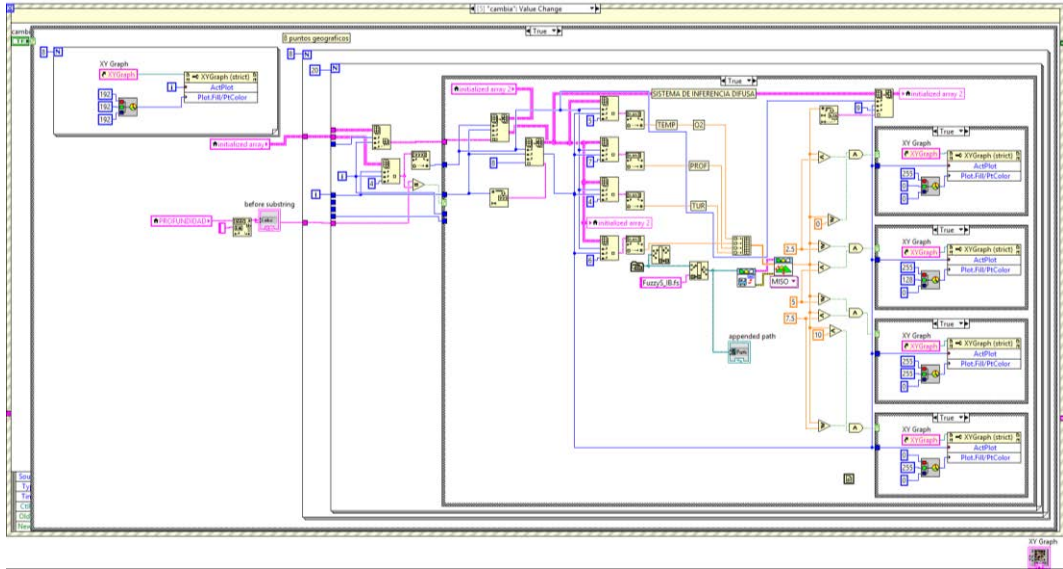


Fig. 5.48 Programación del bloque encargado de la visualización de los datos

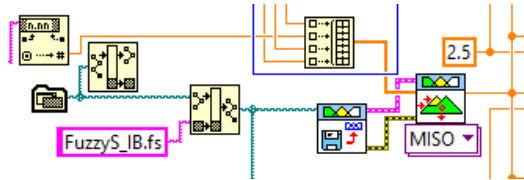


Fig. 5.49 Programación del bloque encargado la implementación del FIS

CAPITULO VI

6 RESULTADOS Y DISCUSIONES.

6.1 Sitio de muestreo

Las mediciones fueron realizadas en el Lago de Zirahuén, durante primavera los días 4 y 5 de mayo del año 2018 en horarios comprendidos de 10:00 – 14:00 hrs. en colaboración con los limnólogos del CRIP- INAPESCA Pátzcuaro y la Capitanía del puerto “C”- Zirahuén de la Secretaria de Marina (SEMAR); obteniendo un total de 8 puntos geográficos caracterizados del lago. La tabla 6.1 muestra la longitud y latitud de los puntos medidos.

Tabla 6.1 Latitud y Longitud de los 8 puntos muestreados

	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>
<i>Punto 0</i>	19.4422758	-101.7493304
<i>Punto 1</i>	19.4404291	-101.7526956
<i>Punto 2</i>	19.4386634	-101.7541212
<i>Punto 3</i>	19.427665	-101.753215
<i>Punto 4</i>	19.428859	-101.751466
<i>Punto 5</i>	19.43173	-101.749156
<i>Punto 6</i>	19.437235	-101.746635
<i>Punto 7</i>	19.44543	-101.744907

Los valores obtenidos de las mediciones realizadas fueron almacenados en una base de datos, la cual cuenta con un total de 50 mediciones distribuidas a lo largo del lago de Zirahuén, tal y como se muestra en la figura 6.1 a una profundidad máxima de 13 metros.

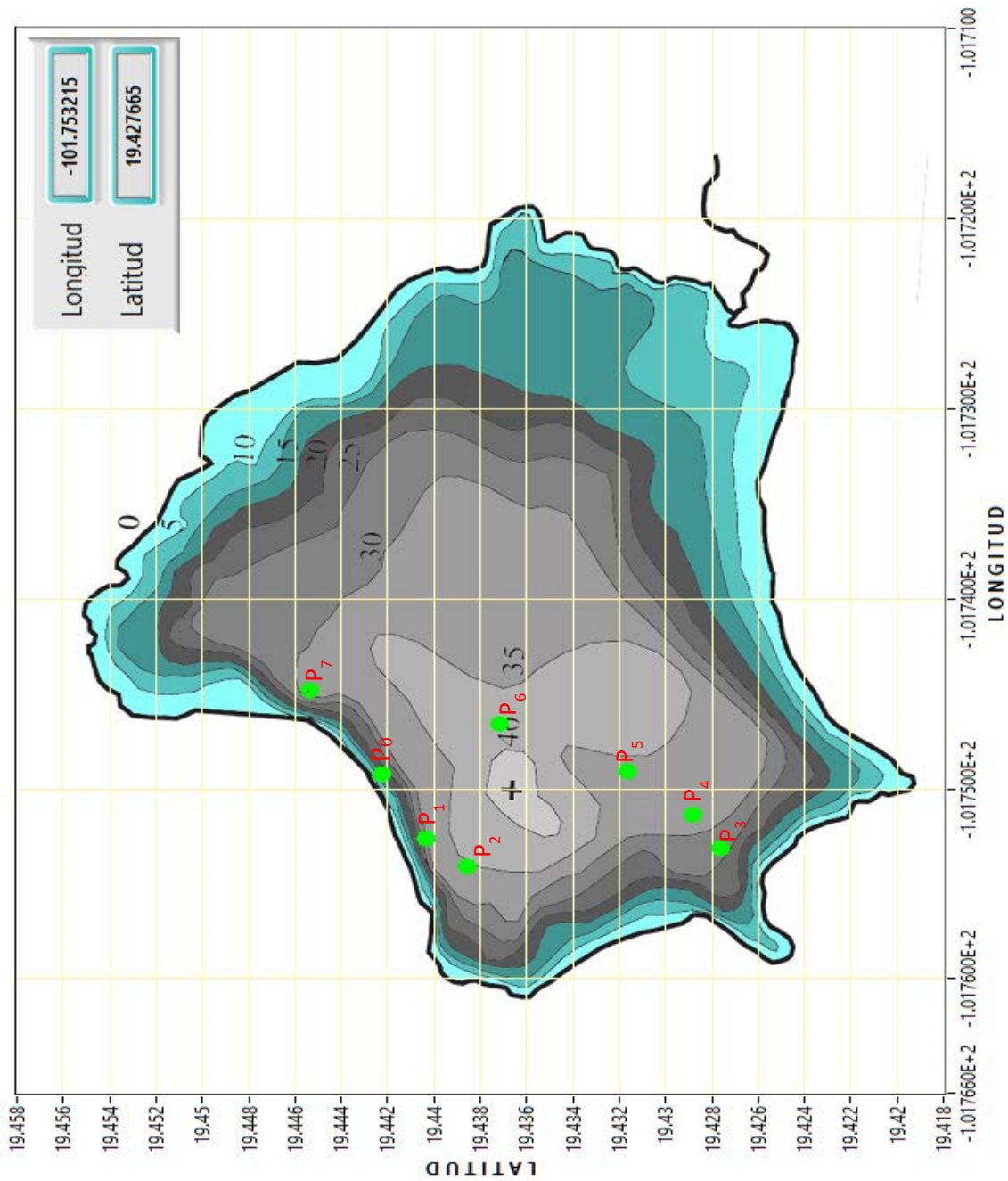


Fig. 6.1 Lago de Zirahuén con los puntos geográficos etiquetados

El tiempo de medición por punto geográfico era de aproximadamente 4 minutos, recorriendo profundidades desde los 0 hasta los 13 metros.

6.2 Comportamiento del Ecosistema Acuático

Para poder caracterizar el comportamiento del lago de Zirahuén fue necesario medir los niveles de oxígeno disuelto, temperatura y turbidez en las diferentes profundidades que el DCS nos permitió medir, es decir, hasta los 13 metros. Se planteó medir estos parámetros con la intención de que sus valores puedan caracterizar el punto geográfico; dicha caracterización se basa en la clasificación del punto de acuerdo con las evaluaciones arrojadas por el Índice Biótico Lacustre de cada zona lacustre medida; es decir, conocer si existen las condiciones ideales para la coexistencia de las especies de peces presentes en el lago de Zirahuén.

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de los niveles de oxígeno disuelto, temperatura y turbidez con respecto a la profundidad del lago de Zirahuén en cada punto georreferenciado.

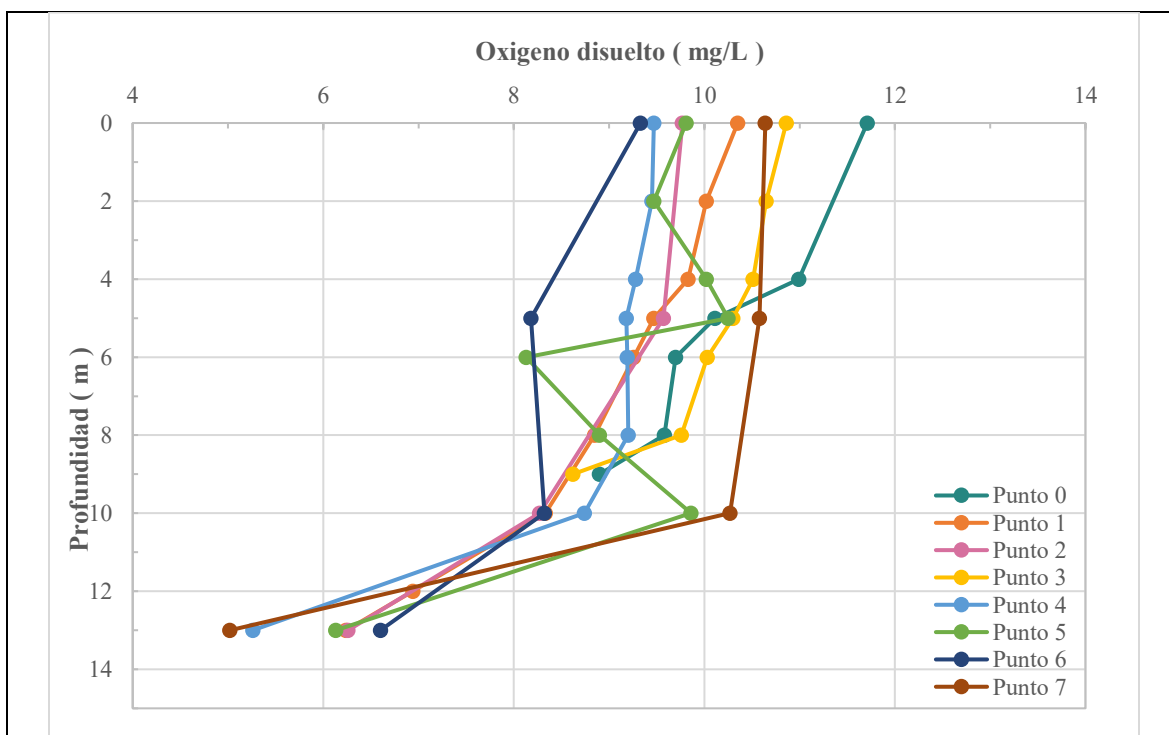


Fig. 6.2 Oxígeno disuelto (mg/L) medido respecto de la profundidad (m.) en el Lago de Zirahuén, durante los días 04 y 05 de mayo del año 2018 en los 8 puntos georreferenciados.

Como podemos observar, en la Figura 6.1 los niveles de oxígeno disuelto son elevados en la superficie del lago, conforme la profundidad del lago aumenta, los niveles de oxígeno disuelto disminuyen; se pueden estimar unas ligeras variaciones en éstos, sin embargo, todos los valores obtenidos antes de los 10 metros de profundidad se encuentran dentro del rango ideal para las especies endémicas, es decir, comprenden valores que van desde los 8 mg/L hasta los 12 mg/L.

Es posible apreciar que después de los 10 metros de profundidad, los niveles de oxígeno disuelto comienzan a descender abruptamente. Cabe mencionar, que aun sin conocer los resultados de la temperatura, es posible predecir que la termoclina del lago comienza pasando esta profundidad, ya que como los niveles de oxígeno disuelto se encuentran estrechamente relacionados con la temperatura.

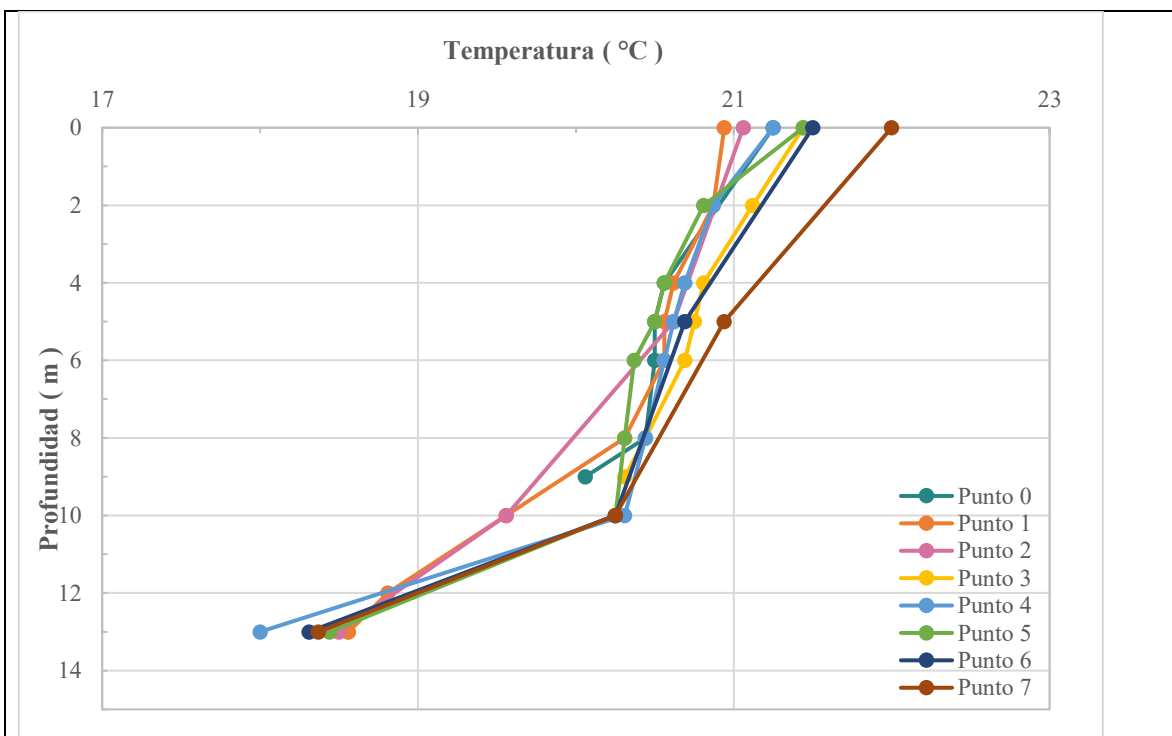


Fig. 6.3 Temperatura (°C) medida respecto de la profundidad (m.) en el Lago de Zirahuén, durante los días 04 y 05 de mayo del año 2018 en los 8 puntos georreferenciados.

La Figura 6.2 muestra los valores medidos de la temperatura con respecto de la profundidad alcanzada en el lago de Zirahuen a lo largo de los 8 puntos georreferenciados. En la gráfica se aprecia que la temperatura desciende conforme la profundidad aumenta; pese a éste comportamiento, la temperatura en la mayoría de los puntos, permanece dentro del rango ideal para las especies endémicas antes de los 10 metros de profundidad, es decir, independientemente de las pequeñas fluctuaciones observables, los valores medidos van desde los 20 °C a los 22 °C, permaneciendo casi constantes alrededor de los 21°C. Pasando los 10 metros de profundidad, es posible apreciar la termoclina, pues después de ésta profundidad, la temperatura comienza a descender exageradamente.

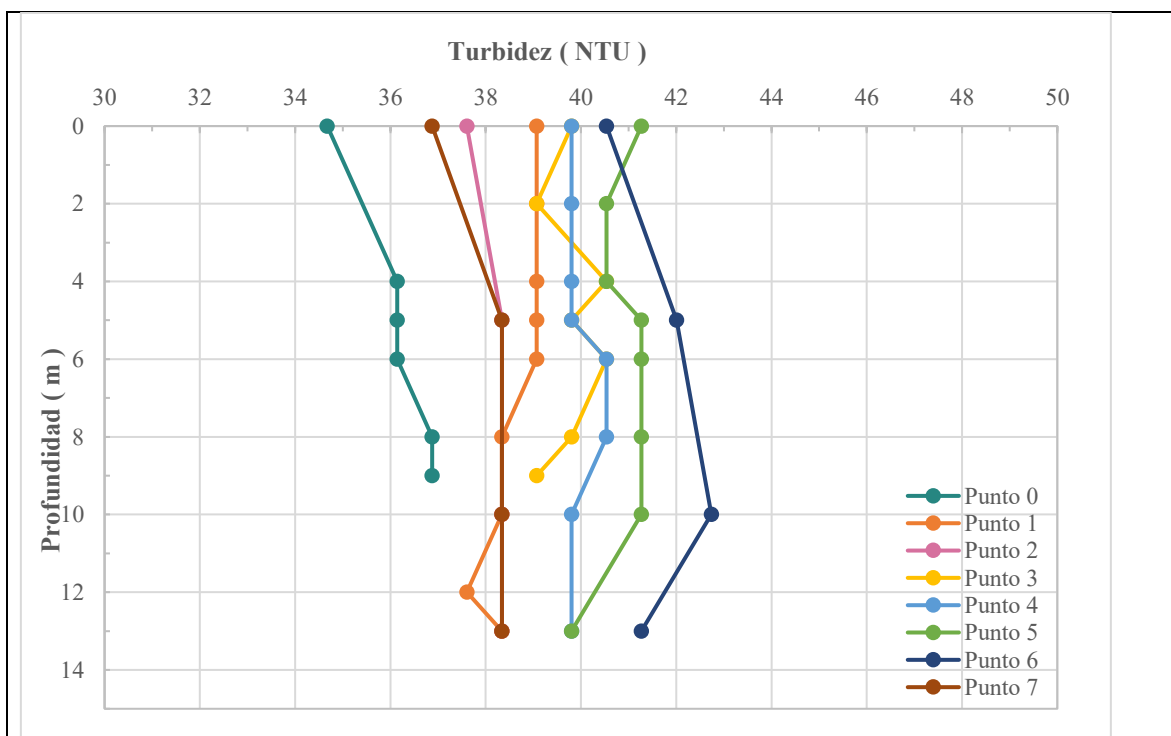


Fig. 6.4 Turbidez (NTU) medida respecto de la profundidad (m.) en el Lago de Zirahuén, durante los días 04 y 05 de mayo del año 2018 en los 8 puntos georreferenciados.

La grafica presentada en la Figura 6.3, expone los valores de turbidez medidos a lo largo de los 8 puntos georreferenciados en las distintas profundidades del lago de Zirahuén medidas. Cabe mencionar que en la mayoría de los puntos se aprecia un

comportamiento similar, con líneas de tendencia casi constantes. Desafortunadamente, los valores medidos de turbidez no se encuentran dentro del rango ideal para para las especies de peces endémicas estudiadas, pero se sitúan dentro de los valores normales para poder coexistir en un ecosistema como Zirahuén. Cabe mencionar que los valores de turbidez obtenidos se encuentran dentro del límite superior que aun los considera valores buenos, pues pasando los 50 NTU de turbidez, los peces comienzan a padecer desnutrición, enfermedades, entre otras afectaciones.

En general, el comportamiento de los niveles de oxígeno disuelto y la temperatura tienden a descender conforme el aumento de la profundidad; mientras que la turbidez muestra un comportamiento casi constante con tendencia a incrementarse. Es importante señalar que antes de los 10 metros de profundidad, los valores obtenidos por los tres parámetros involucrados fueron los ideales para las especies de peces, sin embargo, la profundidad también juega un papel importante en la caracterización de las zonas.

6.3 Análisis del Ecosistema Acuático

El análisis del ecosistema acuático depende principalmente de la profundidad y de los valores obtenidos de cada parámetro, en cada uno de los puntos geográficos. Con ayuda del modelo difuso se obtiene un índice biótico lacustre el cual permite la clasificación de cada punto en zonas; Zona Lacustre Abiótica (ZLA), Zona Lacustre Biótica Baja (ZLBB), Zona Lacustre Biótica Media (ZLBM) y Zona Lacustre Biótica Alta (ZLBA). Esta clasificación evalúa si la zona cuenta con las condiciones idóneas para sustentar la vida de las especies endémicas que habitan el lago de Zirahuén.

A continuación, se muestra el análisis y la clasificación de cada uno de los puntos geográficos a diferentes profundidades.

a) Análisis y clasificación del ecosistema a 0 metros.

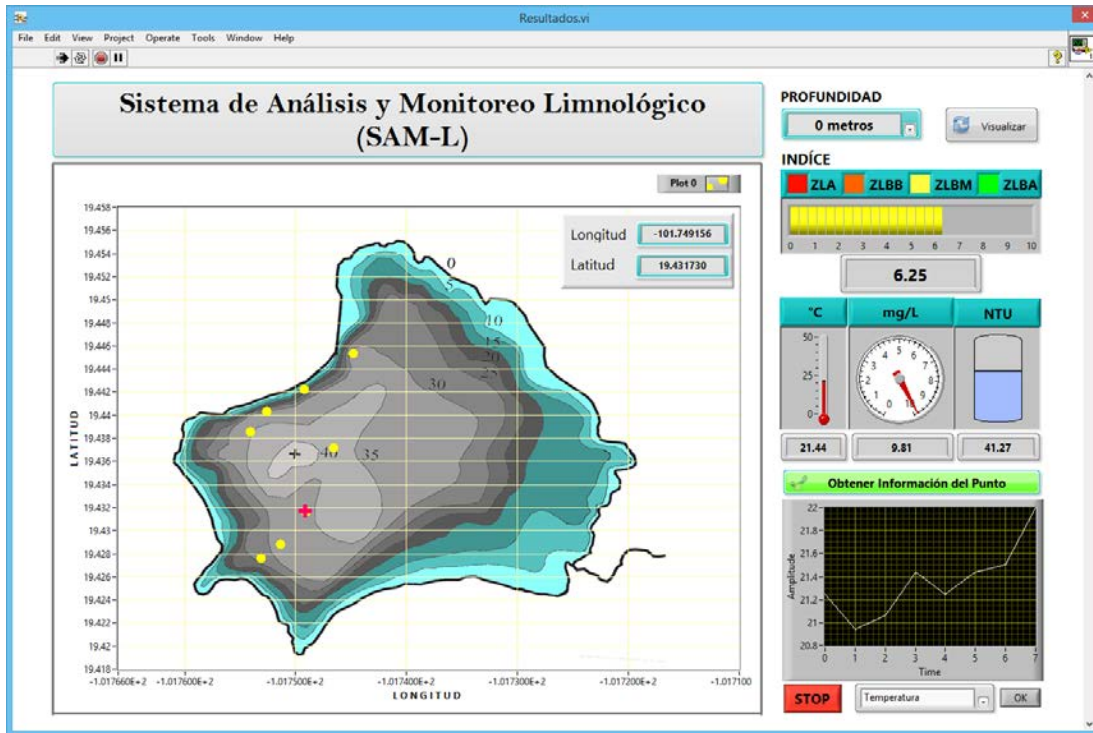


Fig. 6.5 GUI del Software de Visualización representando la evaluación del IBL a 0 metros.

A una profundidad de 0 metros, todos los puntos obtuvieron una clasificación como ZLBM, lo cual nos indica que la zona cuenta con las condiciones necesarias, para albergar la vida los peces endémicos, pero no cumple con las condiciones ideales para encontrarlos en abundancia; esto se debe a que los peces no suelen estar a profundidades bajas, por lo que se espera que en los siguientes puntos de medición antes de los 5 metros, se obtenga el mismo IBL.

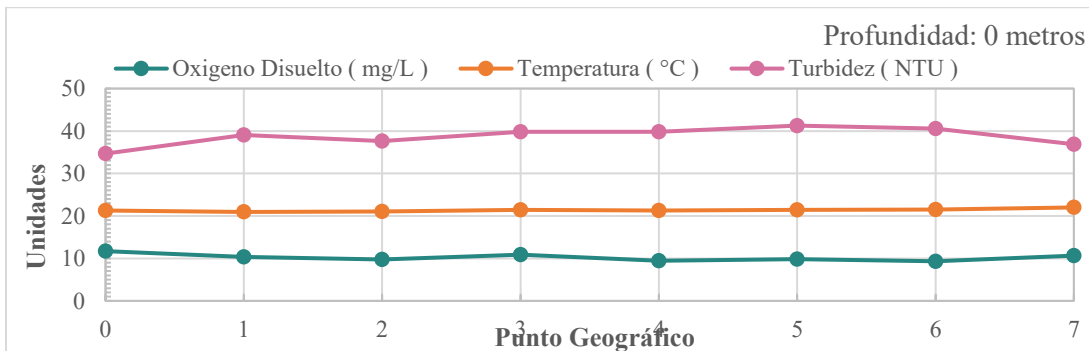


Fig. 6.6 Niveles de Oxígeno disuelto, Temperatura y Turbidez de los 8 puntos georreferenciados a una profundidad de 0 metros.

Como se aprecia en la gráfica de la figura 6.5, los valores de los parámetros son buenos y casi constantes, pese a ello, la profundidad es poca, por lo que el indicador arrojó una evaluación de 6.25 en el IBL en todos los puntos señalados.

b) Análisis del ecosistema a 5 metros.

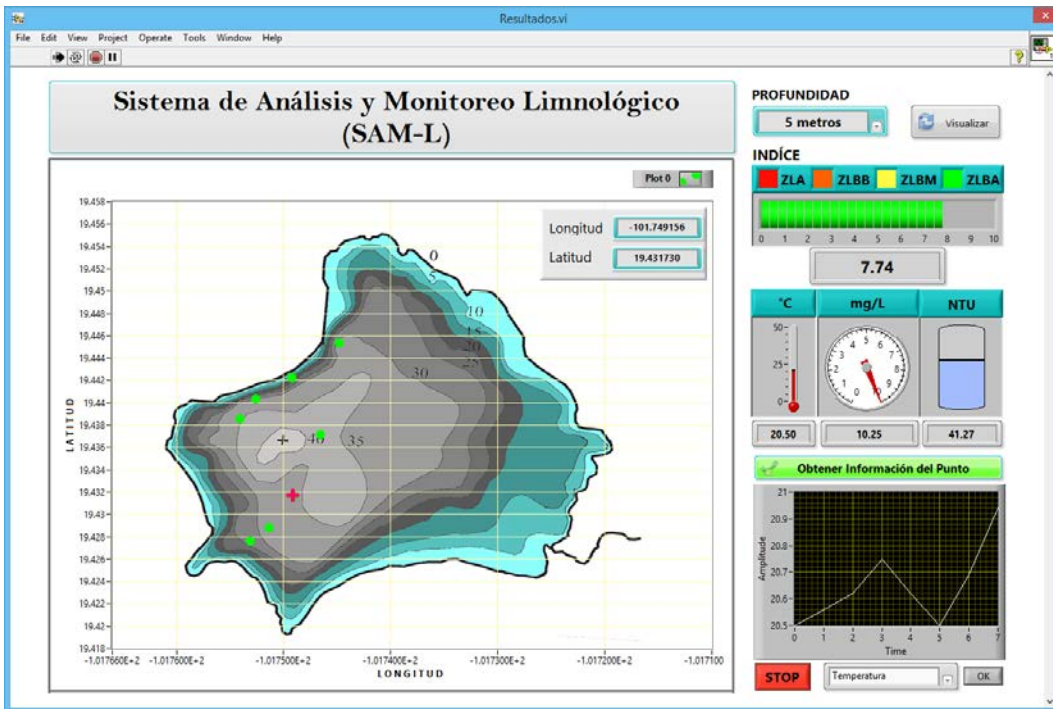


Fig. 6.7 GUI del Software de Visualización representando la evaluación del IBL a 5 metros.

A una profundidad de 5 metros, todos los puntos obtuvieron una clasificación como ZLBA, lo cual nos indica que la zona cuenta con las condiciones ideales para albergar la vida de los peces endémicos, por lo tanto es posible encontrarlos en abundancia; esto se debe a que los peces suelen estar en estas profundidades del lago, por lo que se espera que en los siguientes puntos de medición antes de los 10 metros, se obtenga el mismo, o mejore un poco el IBL,

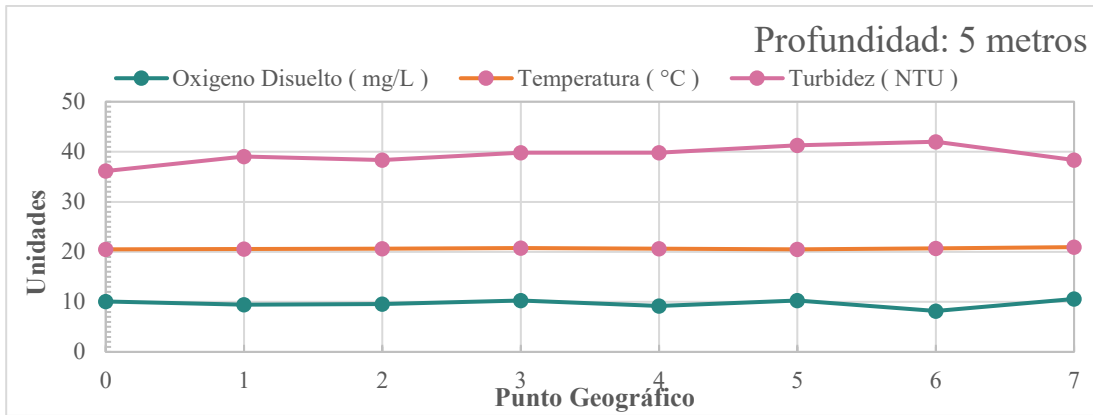


Fig. 6.8 Niveles de Oxígeno disuelto, Temperatura y Turbidez de los 8 puntos georreferenciados a una profundidad de 5 metros.

En el gráfico anterior se observa que todos los parámetros se encuentran en el rango óptimo, la profundidad se encuentra en el límite inferior necesario, aun así, las zonas obtienen una puntuación promedio de 7.74 en el IBL.

c) Análisis del ecosistema a 10 metros.

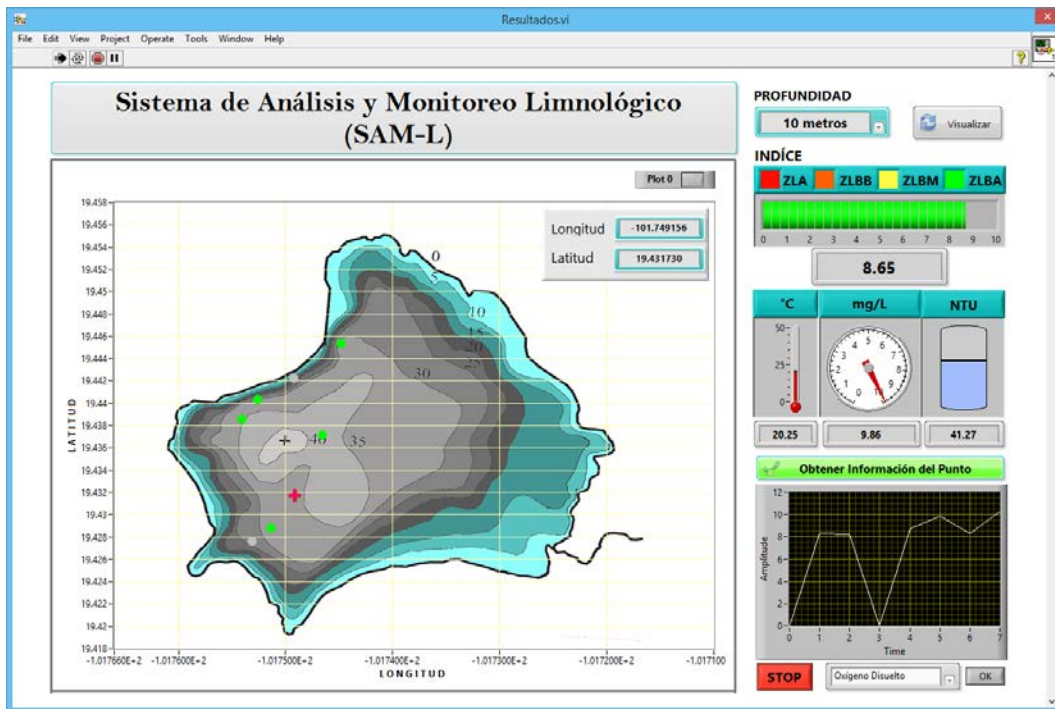


Fig. 6.9 GUI del Software de Visualización representando la evaluación del IBL a 10 metros.

A una profundidad de 10 metros, los seis puntos analizados obtuvieron una clasificación como ZLBA, indicando que la zona cuenta con las condiciones ideales para albergar la vida de los peces endémicos y es posible encontrarlos en abundancia.

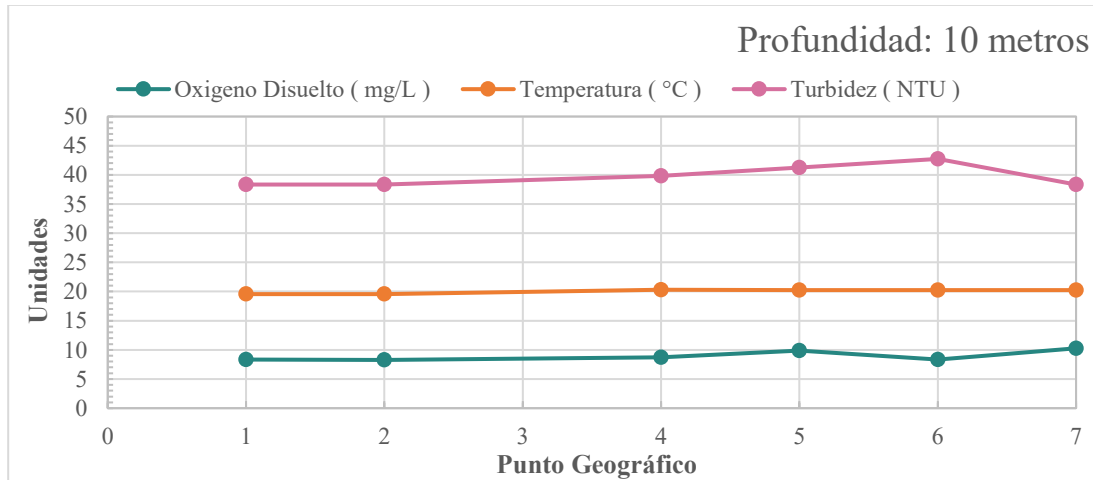


Fig. 6.10 Niveles de Oxígeno disuelto, Temperatura y Turbidez de los 8 puntos georreferenciados a una profundidad de 10 metros.

La figura 6.7 indica que todos los parámetros se encuentran en el rango óptimo para las especies de peces endémicas, por lo tanto las zonas obtienen una puntuación promedio de 8.65 en el IBL, es decir, el máximo valor posible de evaluación.

b) Análisis del ecosistema a 13 metros.

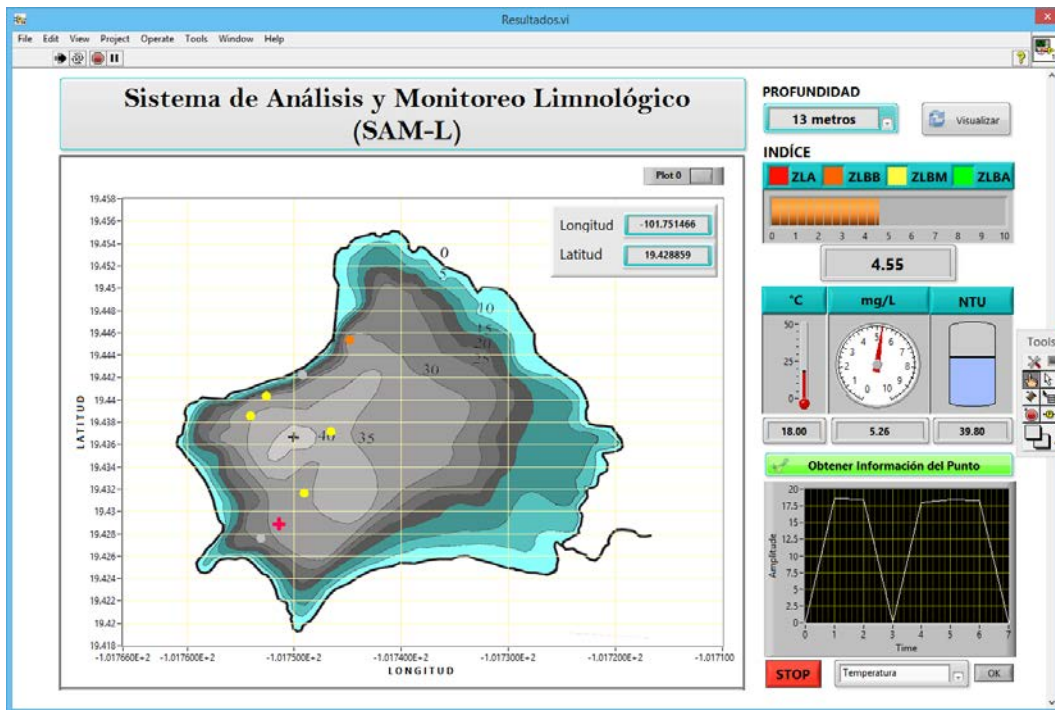


Fig. 6.11 GUI del Software de Visualización representando la evaluación del IBI a 13 metros.

A una profundidad de 13 metros, cuatro de los seis puntos analizados obtuvieron una clasificación como ZLBM, indicando que la zona cuenta con las condiciones necesarias para albergar la vida de los peces endémicos y no es posible encontrarlos en abundancia. Mientras que los dos restantes fueron clasificados como ZLBB, indicando que es difícil encontrar especies endémicas debido a que las condiciones analizadas ponen en riesgo su vida.

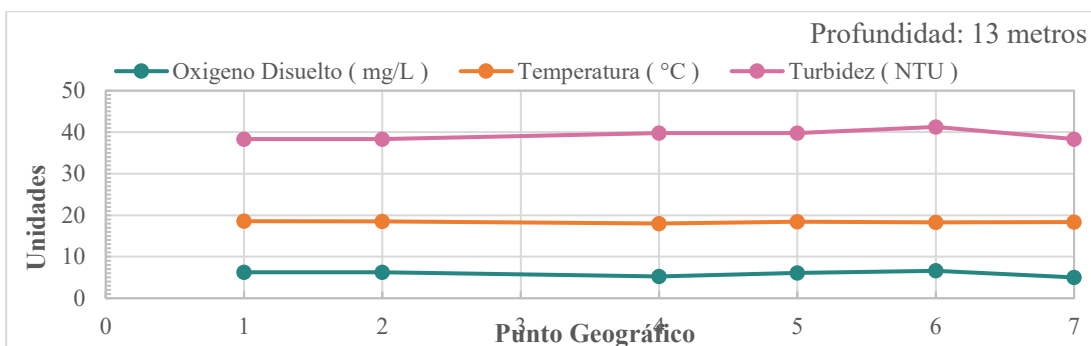


Fig. 6.12 Niveles de Oxígeno disuelto, Temperatura y Turbidez de los 8 puntos georreferenciados a una profundidad de 13 metros.

Los parámetros analizados se encuentran por debajo del rango necesario, tal y como se muestra en la Figura 6.8, por lo tanto las zonas obtienen una puntuación promedio baja; 5.48 en el IBL

6.4 Análisis global

En el siguiente gráfico se muestra el Índice Biótico Lacustre promedio en las distintas profundidades previamente analizadas. Observando que las mejores zonas para albergar la vida de las especies endémicas se encuentran en un rango de 5 a 11 metros de profundidad.

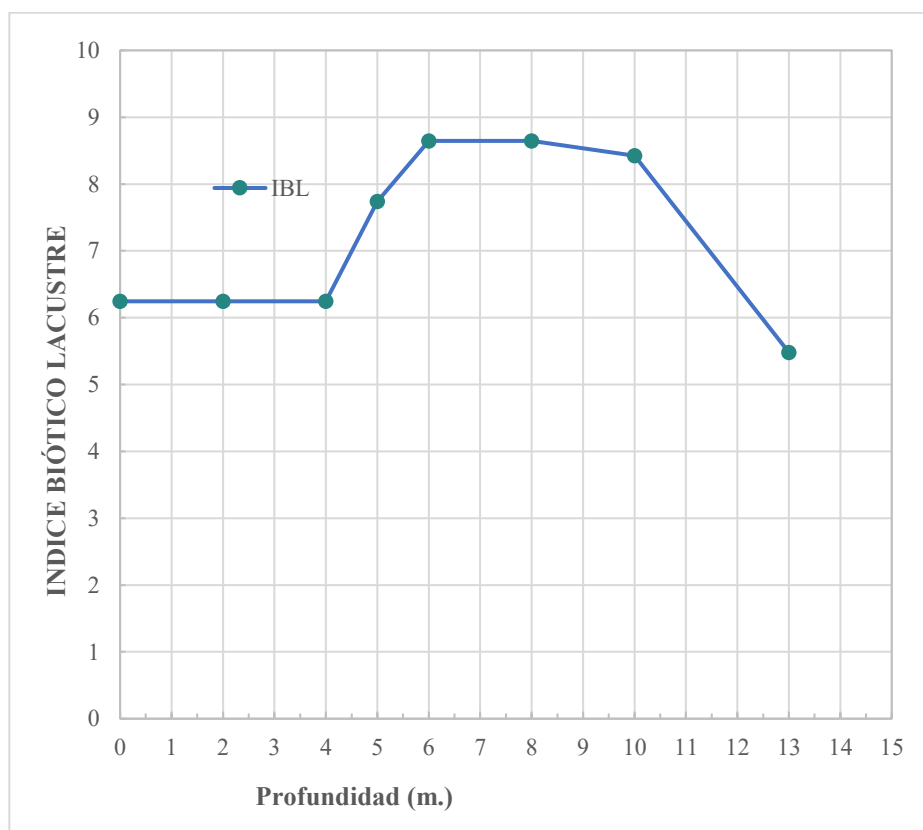


Fig. 6.13 Índice Biótico Lacustre (IBL) promedio de cada punto georreferenciado a las diferentes profundidades medidas en el lago de Zirahuén, evaluado con las mediciones obtenidas el 04 y 05 de mayo del año 2018.

6.5 Discusiones

Actualmente, no existe un sistema que evalúe, mida y clasifique las zonas bióticas lacustres, ya que como se observó en el estado del arte, la mayoría de los trabajos están enfocados a estudios batimétricos. Dichos estudios se apoyan de sondas multiparamétricas YSI las cuales son una gran herramienta de medición, pero por su elevado costo son inaccesibles para los hidrobiólogos mexicanos; por lo que el presente trabajo facilita las mediciones de cuatro factores esenciales en el estudio de ecosistemas acuáticos, además de proveer un Software dedicado al análisis y evaluación de zonas de interés.

a) Mediciones actuales vs mediciones obtenidas en 2002

Las siguientes gráficas muestran una comparativa de las mediciones de temperatura y oxígeno disuelto obtenidas hace 16 años en el lago de Zirahuén, realizadas por Martinez-Almeida et al. (2005), utilizando sondas multiparamétricas YSI; así como las mediciones obtenidas en el presente año por el SAM-L.

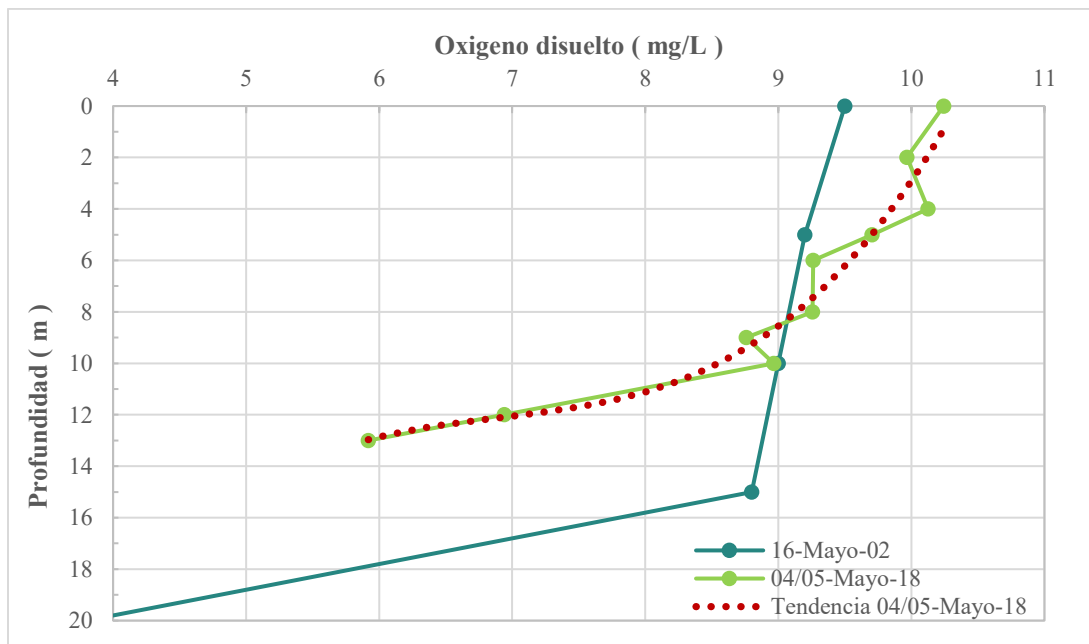


Fig. 6.14 Comparación del comportamiento de los niveles de Oxígeno disuelto en el año 2002 y 2018

Como se aprecia en el grafico anterior, los niveles de oxígeno disuelto han aumentado ligeramente en el transcurso de los años; sin embargo, la termoclina se aprecia a profundidades menos hondas.

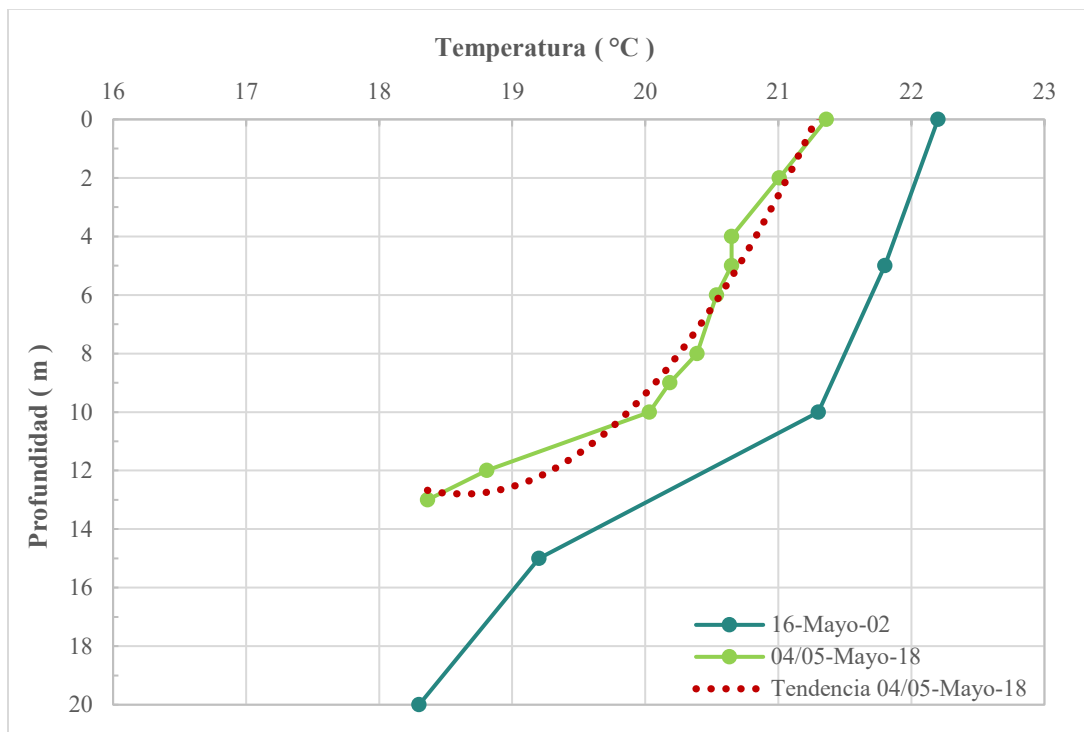


Fig. 6.15 Comparación del comportamiento de la temperatura en el año 2002 y 2018

Por otro lado, la temperatura ha disminuido en el lago sutilmente y la tendencia de su comportamiento se mantiene similar a la medida hace 16 años. Complementando el análisis previo del oxígeno disuelto. En este grafico se vuelve a visualizar la termoclina a profundidades menores en comparación con las medidas en el 2002.

b) Evaluación del IBL

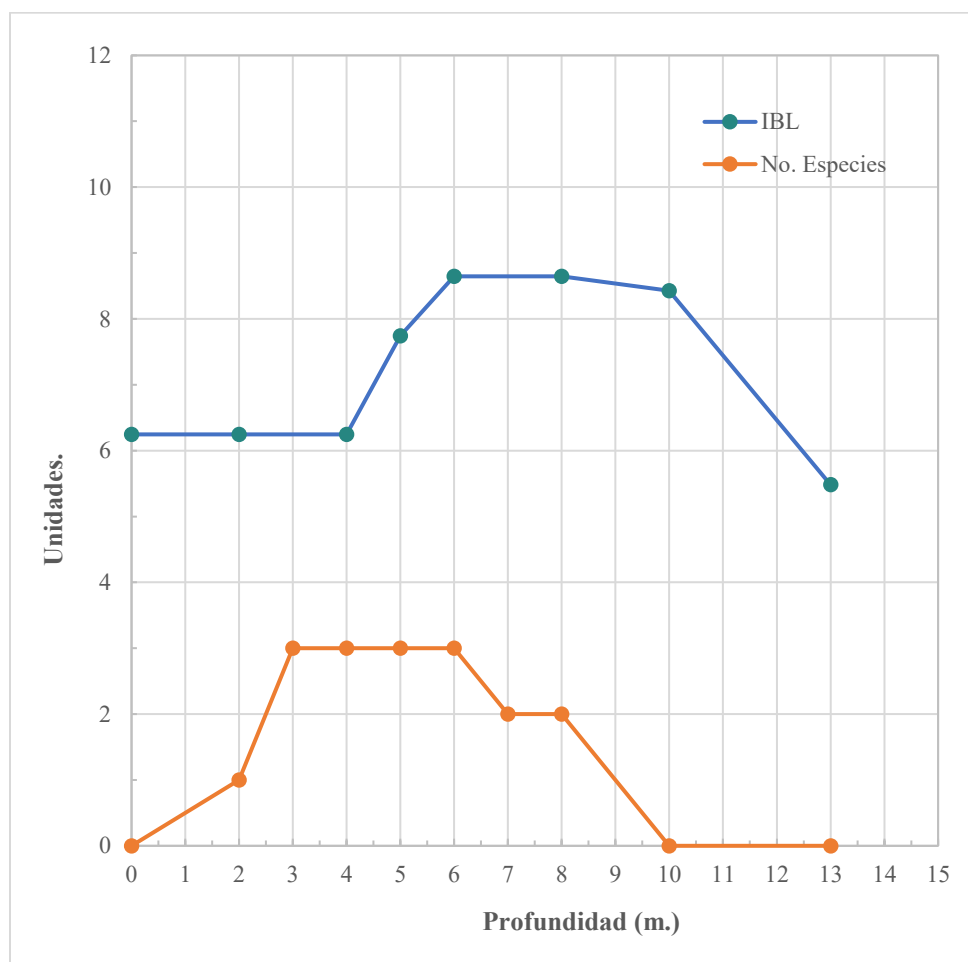


Fig. 6.16 Evaluación del IBL con base en la cantidad de especies encontradas en el lago de Zirahuén en 2004.

El grafico anterior representa la densidad de especies encontradas y analizadas por Madrigal G. et al. (2004) en el lago de Zirahuén y la puntuación promedio del IBL de todos los puntos georreferenciados. Como se observa en las gráficas, en los valores donde se muestra una mejor evaluación del indicador, también existe una mayor cantidad de especies acuáticas, por lo cual se puede aseverar que el IBL realiza una correcta evaluación y clasificación de las zonas lacustres.

7 CONCLUSIONES

El presente trabajo se elaboró para ser una herramienta especializada en la evaluación y análisis de zonas lacustres, su principal ventaja es la rapidez con la que realiza las mediciones y el bajo costo del dispositivo creado en comparación con las existentes en el mercado, lo cual lo hace más accesible para los hidrobiólogos mexicanos. Cabe mencionar que, al presentar las mediciones y evaluaciones de manera visual y dinámica mediante un software dedicado, ayuda al usuario a realizar un mejor análisis de la zona investigada.

El objetivo general planteado se cumplió de manera exitosa, pues el producto final del presente trabajo es un sistema computacional que permite la medición, monitoreo y análisis de los parámetros rinológicos en zonas lacustres. Además, se comprobó la veracidad de la hipótesis, ya que el modelo de razonamiento difuso clasifica de manera adecuada las zonas lacustres, permitiendo identificar las mejores zonas para la diversidad biótica.

El objetivo 1 se cumplió de manera adecuada, ya que el diagrama de Rawson nos dio las bases para definir y estudiar los factores esenciales que están involucrados en los ecosistemas acuáticos.

El objetivo 2 se realizó de manera satisfactoria mediante la implementación de un sistema de inferencia difuso, que tiene por entradas los parámetros limnológicos seleccionados y con el cual se logró obtener un indicador denominado IBL, que evalúa las zonas lacustres propicias para el desarrollo de especies endémicas.

El objetivo 3 fue cumplido adecuadamente, ya que se desarrolló un sistema distribuido que permite el monitoreo y medición de los factores limnológicos involucrados, los cuales son almacenados en una base de datos para su posterior análisis.

El objetivo 4 fue realizado de manera satisfactoria al desarrollar un Software dedicado al monitoreo y análisis de parámetros limnológicos (SAM-L), el cual fue probado en el lago de Zirahuén, al realizar las pruebas de campo pertinentes, cumpliéndose así el Objetivo 5.

Como trabajo futuro se pretende extender la sonda para realizar el estudio de los parámetros limnológicos a mayor profundidad, ya que la sonda actual solo permite una distancia máxima de 13 metros. Además, de ampliar el sistema al involucrar una mayor cantidad de factores esenciales que permitan un estudio mas extenso, como son; salinidad, pH, Conductividad,

penetración de la luz, entre otros, con el objetivo de clasificar las zonas de diversos cuerpos lacustres.

Referencias

- 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. (2018). *Arduino - Introduction*. www.arduino.cc (en inglés). Consultado el 22 de enero de 2018.
- Atlas Scientific. (2016). *Environmental Robotics*. Retrieved from Dissolved Oxygen Probe: https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_probe/DO_probe.pdf
- 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
- ATMEL. (2008). *Two-wire Serial EEPROM 512K (65,536 x 8) AT24C512B*. Retrieved from <http://www.mouser.com/ds/2/268/doc5297-1180763.pdf>
- Bates, M. P. (2013). *Interfacing PIC Microcontrollers*. Newnes.
- Bellman, R., & Zadeh, L. (1970). Decision making in a fuzzy environment. *Management Science*(4), 141- 164.
- Bosque-Sendra, J. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid:
- 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).

- 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.
- Chacón Torres, A., & Múzquiz Iribe, E. (1991). *El Lago de Zirahuén, Michoacán, México: reconocimiento ambiental de una cuenca michoacana* (No. Folleto 14230).
- 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.
- CONABIO (2005). La biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado.
- CONABIO. (2012). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Menidia estor*.
- CONABIO. (2012). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Algansea lacustris*.
- CONABIO. (2013). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Allotoca meeki*.
- CONABIO. (2013). Sistema de información sobre especies invasoras en México. Fichas de especie *Micropterus salmoides*
- 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.

- 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.
- DFROBOT. (2008). Turbidity sensor SKU: SEN0189. Retrieved from https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/SEN0189_Web.pdf
http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/logica_borrosa/web/tutorial_fuzzy/contenido3.html?page=java/fuzzy/tutfuzzy/contenido3
- INAPESCA. (2016). Conoce al INAPESCA. Obtenido de <http://www.inapesca.gob.mx>
- 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>
- 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*.
- 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 Agricola*, 33(5), 1017-1023. doi:10.1590/S0100-69162013000500013.

- 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).
- Mann, K.H. & J.R.N. Lazier. (1996). *Dynamics of Marine Ecosystems: Biological-Physical Interactions in the Oceans*. Blackwell Science, Oxford, Inglaterra.
- Margalef, R. (1974). *Ecología*. Omega, Barcelona.
- Margalef, R. (1983). *Limnología* (Vol. 1009). Barcelona: Omega.
- 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.
- 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.
- 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/
- 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:
- 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.*
- Ramírez, A. F. (2014, Noviembre). Fuzzy logic, truth and cognition. *Revista de Filosofía*, 70.
- 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.
- Read, J. C., Phillipson, G. P., & Glennerster, A. (2009). Latitude and longitude vertical disparities. *Journal of Vision*, 9(13), 11-11.
- 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.
- Sánchez, O. (2007). Ecosistemas acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*, 11.
- Sonda multiparametrica 6600V2. (2018). Retrieved from <http://www.sidmar.es/6600v2.html>
- 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.

- Vich, A. (1996). Aguas continentales. 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.
- 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.