



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CIIDIR UNIDAD OAXACA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y  
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

**DESARROLLO DE SOFTWARE Y DISEÑO DE UN SISTEMA  
AUTOMATIZADO PARA MONITOREO Y PREDICCIÓN DE EVENTOS  
DE CONTAMINACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA,  
UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:**

**FABIAN ANDRÉS SILES**

**COMITÉ TUTORIAL:**

Director: Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

Co-Director: M. en C. Ma. De los Ángeles

Ladrón de Guevara

Dr. Francisco Castellanos León

Dr. J. Alejandro Vázquez Feijoo

Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas

Oaxaca de Juárez, Oax. a 05 de Diciembre de 2015



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 30 del mes de noviembre del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Desarrollo de software y diseño de un sistema automatizado para monitoreo y predicción de eventos de contaminación en sistemas de distribución de agua, utilizando inteligencia artificial "

Presentado por el alumno:

<b>Andrés</b> Apellido paterno	<b>Siles</b> materno	<b>Fabián</b> nombre(s)
-----------------------------------	-------------------------	----------------------------

Con registro: 

B	1	3	0	3	3	5
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

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

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

M. en C. María de los Angeles Ladrón de Guevara Torres

Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas

Dr. Francisco Castellanos León

Dr. Juan Alejandro Vazquez Feijoo

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 07 del mes de diciembre del año 2015, el (la) que suscribe Andrés Siles Fabián, alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro B130335, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y la M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres y cede los derechos del trabajo titulado: "Desarrollo de software y diseño de un sistema automatizado para monitoreo y predicción de eventos de contaminación en sistemas de distribución de agua, utilizando inteligencia artificial", 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 **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradooax@ipn.mx](mailto:posgradooax@ipn.mx) ó [apres.mex@gmail.com](mailto:apres.mex@gmail.com) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Andrés Siles Fabián



---

## RESUMEN

La presente investigación se ha centrado en la construcción de un índice de calidad de agua con seis variables (pH, temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y cloro residual libre) y el desarrollo de un sistema basado en un modelo de inteligencia artificial que combina las técnicas de lógica difusa, una red neuronal artificial tipo perceptrón y un método de umbrales dinámicos para detectar y predecir automáticamente eventos de contaminación en sistemas de distribución de agua potable en tiempo real.

El modelo se programó en un software e incluye etiquetas lingüísticas para cada valor de cada una de las variables seleccionadas y el índice de calidad de agua; y cuando dicho valor está fuera de un límite de rango permisible para el agua de consumo humano, entonces se activan alarmas para evitar el suministro inadecuado. Finalmente se ha diseñado un sistema de supervisión, control y adquisición de datos que puede ser integrado en plataformas tecnológicas dedicadas a los organismos operadores de agua potable.

---

## **ABSTRACT**

This research has focused on the construction of a water quality index with six variables (pH, temperature, turbidity, dissolved oxygen, electrical conductivity and free residual chlorine) and the development of a system based on a model of artificial intelligence that combines fuzzy logic, perceptron artificial neural network and a method of dynamic thresholds in order to automatically detect and predict pollution events in real time in drinking water distribution systems.

The model was programmed in a software and includes linguistic labels for each value of the selected variables and the rate of quality water index; and when the value is outside of allowable limits for drinking water range, then alarms are activated to avoid the inadequate supply. Finally, was designed a system of supervisory control and data acquisition that can be integrated into technology platforms dedicated to water utilities.

---

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco al Instituto Politécnico Nacional por ser una institución educativa de alta calidad y al CONACYT por impulsar la investigación y el desarrollo científico y tecnológico en el país.

Me permito brindar un extenso agradecimiento por el apoyo, seguimiento y principalmente por creer desde el principio en éste proyecto al Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez, quien además ha representado un ejemplo al ser una persona con un gran liderazgo basado en confianza, trabajo e independencia.

A la M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara por su seguimiento, apoyo, constructivas críticas y por los conocimientos transmitidos a lo largo del programa de estudios.

Otro agradecimiento al Dr. Feijoo y al Dr. Rodolfo Martínez por el tiempo invertido en la revisión y críticas constructivas hechas al trabajo.

También agradezco al Dr. Castellanos por haber sido un excelente guía durante las materias cursadas con él y por haber mostrado siempre un espíritu humilde en sus actos.

Agradezco al Dr. Ahmed Elshafie por el apoyo brindado durante la estancia de investigación en Malasia.

No obstante, agradezco el apoyo, comprensión y cariño de mi tía Magdis y sobre todo por estar conmigo en momentos adversos.

Un último agradecimiento para mis padres y mi hermana que siempre me han impulsado a perseverar metas en la vida enfocados a aportar cosas positivas para la sociedad.

Finalmente, dedico el presente trabajo a quienes desean hacer de México un mejor país mediante la transferencia de conocimiento a la sociedad y espero corresponder al gran arquitecto del universo por la oportunidad que me ha brindado para cursar el programa de maestría.

---

# Desarrollo de software y diseño de un sistema automatizado para monitoreo y predicción de eventos de contaminación en sistemas de distribución de agua, utilizando inteligencia artificial.

## Índice

<b>CAPÍTULO 1. GENERALIDADES</b> .....	10
1.1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.3. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	13
1.4.1. Ambiental.....	13
1.4.2. Científica y Legal.....	13
1.4.3. Económica.....	13
1.4.4. Tecnológica.....	14
1.5. ANTECEDENTES.....	14
1.6. HIPÓTESIS.....	16
1.7. OBJETIVOS.....	17
1.7.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO</b> .....	17
2.1. Contaminación e índice de calidad del agua.....	17
2.1.1. Definición de contaminación del agua.....	17
2.1.2. Índice de Calidad de agua.....	17
2.2. Variables asociadas a la contaminación del agua.....	18
2.2.1. Características físicas y organolépticas.....	18
2.2.2. Características químicas.....	18
2.2.3. Características microbiológicas.....	19
2.2.4. Normativa vigente aplicable a contaminación del agua.....	19
2.2.5. Descripción de variables seleccionadas.....	20
2.2.5.1. pH.....	20
2.2.5.2. Temperatura.....	20
2.2.5.3. Turbidez.....	20
2.2.5.4. Oxígeno disuelto.....	20

2.2.5.5.	Conductividad eléctrica .....	21
2.2.5.6.	Cloro residual libre .....	21
2.3.	Sistemas SCADA .....	21
2.4.	Inteligencia artificial.....	22
2.4.1.	Definición .....	22
2.4.2.	Técnicas de inteligencia artificial .....	22
2.4.2.1.	Lógica difusa .....	22
2.4.2.2.	Redes Neuronales Artificiales .....	22
2.4.2.2.1.	Red neuronal artificial tipo perceptrón .....	23
2.4.3.	Técnicas de predicción de variables .....	23
2.4.3.1.	Método de umbrales dinámicos .....	23
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EMPLEADA .....</b>		<b>24</b>
3.1.	Descripción de la metodología empleada .....	24
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>		<b>26</b>
4.1.	Modelado neurodifuso .....	26
4.1.1.	Modelado con lógica difusa (FLM) .....	26
4.1.2.	Modelado con red neuronal artificial tipo perceptrón (ANN) .....	34
4.1.3.	Modelado con umbrales dinámicos .....	37
4.1.4.	Pruebas del modelo .....	44
4.2.	Propuesta del sistema SCADA .....	55
4.2.1.	Filosofía de operación .....	56
4.2.2.	Diseño del sistema.....	57
4.2.2.1.	Ingeniería Básica.....	57
4.2.2.1.1.	Bosquejo.....	57
4.2.2.2.	Ingeniería Conceptual.....	59
4.2.2.2.1.	Especificaciones de desempeño .....	59
4.2.2.2.2.	Diagrama de funciones por tiempos, generación y evaluación de conceptos .....	60
4.2.2.2.3.	Breve descripción de dispositivos seleccionados .....	70
4.2.2.2.3.1.	Interface .....	70
4.2.2.2.3.2.	Selección y especificaciones de equipos .....	70
4.2.2.2.3.3.	Sistema de Adquisición de datos.....	70
4.2.2.2.3.4.	Sensores.....	70
4.2.2.2.3.5.	Otros equipos asociados.....	71



---

4.2.2.2.4.	Diagrama general de funcionamiento del sistema.....	71
4.3.	Desarrollo de software.....	72
4.3.1.	Selección de la plataforma de programación utilizada.....	72
4.3.2.	Diseño de software .....	73
4.3.2.1.	Definición de variables de entrada .....	73
4.3.2.2.	Definición de variables de salida .....	73
4.3.2.3.	Interfaces de operación.....	74
4.3.2.4.	Resumen del funcionamiento del software de programación desarrollado ..	79
4.3.2.5.	Catálogo de conceptos para determinar los costos del sistema .....	80
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>83</b>
<i>CONCLUSIONES.....</i>		<i>83</i>
<i>RECOMENDACIONES .....</i>		<i>85</i>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>86</b>

---

## **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales; por lo cual, se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas de distribución de agua (Secretaría de Salud, 2001). De esta manera, es importante recalcar que el término calidad de agua es utilizado para describir la condición del agua tomando en cuenta sus características físico-química y biológicas (Arad et al., 2013).

Existen normas sobre el agua de consumo, que pueden diferir en naturaleza y en forma de unos países o regiones a otros, y adicionalmente se han diseñado guías para la calidad del agua. El monitoreo operativo correcto de algunos parámetros asociados es uno de los requisitos básicos y esenciales para garantizar la calidad del agua y se logra mediante observaciones o mediciones cuya frecuencia varían en función de la naturaleza de la medida de control, según un plan establecido, para determinar si las medidas de control existentes en un sistema de abastecimiento de agua de consumo funcionan correctamente (World Health Organization, 2006).

Es posible establecer límites asociados a las medidas de control, monitorear dichos límites y adoptar medidas correctoras cuando se detecte una desviación, con el fin de evitar el suministro de agua potencialmente insalubre. La normativa mexicana establece un listado de múltiples variables a monitorear; sin embargo todos los parámetros que establece la NOM-127-SSA1-1994 no pueden ser monitoreados continuamente, periódicamente y en tiempo real en todos los sistemas de distribución de agua; lo cual se contrapone a lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud sobre que los países deben adoptar un plan basado en objetivos modestos pero realistas (que incluya un menor número de parámetros de calidad del agua prioritarios para la salud y que establezca niveles alcanzables que ofrezcan un grado razonable de protección de la salud pública en términos de reducción de la incidencia

---

de enfermedades o del riesgo de contraerlas por la población) puede resultar más eficaz que uno demasiado ambicioso, sobre todo si las metas se amplían periódicamente (World Health Organization, 2006).

La calidad del agua puede mantenerse en una condición normal siempre y cuando no se introduzca alguna forma de contaminación. La instrumentación en línea para monitorear todos los parámetros requeridos aún no está disponible; sin embargo es viable hacer mediciones puntuales de algunas variables y cada vez que se altere su valor, entonces se infiere que existe la presencia de algún contaminante, cuyo origen puede ser una sustancia o alguna forma de energía, por lo cual mediante la obtención y procesamiento de datos es posible indicar la existencia de contaminantes en un sistema de distribución de agua (Arad et al., 2013).

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según una de las estimaciones más aceptadas, poco más del 97% del volumen de agua existente en nuestro planeta es agua salada y está contenida en océanos y mares; mientras que menos del 3% es agua dulce o de baja salinidad (Comisión Nacional del Agua, 2013).

Del volumen total de agua dulce, estimado en unos 38 millones de kilómetros cúbicos, poco más del 75% está concentrado en casquetes polares, nieves eternas y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo, y el 4% restante corresponde a los cuerpos y cursos de agua superficial (lagos y ríos) (Comisión Nacional del Agua, 2013).

La escasez de agua es un fenómeno principalmente inducido por la intervención humana. A pesar de que hay suficiente reserva de agua dulce para satisfacer las necesidades de la población mundial, su distribución no es equitativa y en algunos casos es desperdiciada, contaminada o afectada por una gestión inapropiada produciendo efectos perjudiciales para las comunidades. Como resultado, en el mundo actual cerca de una quinta parte de la población mundial habita en áreas que enfrentan escasez de agua, y otro cuarto de la población mundial enfrenta recortes en el suministro de agua por insuficiencia de infraestructura para abastecerse de agua (UNESCO, 2013).

Se estima que en el mundo hay unos 884 millones de personas privadas de acceso a agua y que el crecimiento demográfico, la urbanización creciente, el vertido de productos químicos e industriales y la proliferación de especies invasivas son los

---

factores que más contribuyen al deterioro de la calidad del agua y cerca de un millón y medio de niños mueren cada año por enfermedades transmitidas por el agua (UNESCO, 2013).

El subsuelo mexicano aloja gran número de acuíferos y fuentes de agua que funcionan a la vez como cuerpos de almacenamiento, redes de acueductos y plantas de tratamiento naturales. En México se han definido 653 acuíferos para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (SEMARNAT, 2013).

Actualmente en México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) cuenta con el Sistema Nacional de Información del Agua (SNIA), con 368 estaciones hidrométricas instaladas, estas miden la cantidad de agua que fluye y es almacenada en ríos, canales, tuberías y presas. Sirven para conocer la cantidad, disponibilidad del recurso y su distribución entre usuarios, también registran algunos parámetros climatológicos. El monitoreo de dichas estaciones, no permiten hacer predicciones del índice de calidad de agua de acuíferos, tales como pozos, plantas de tratamiento y potabilizadoras, redes de distribución de agua potable, sistemas de bombeo municipales, etc. (Comisión Nacional del Agua, 2013).

Para comparar la eficiencia del servicio que proporcionan los organismos de agua y brindar a los consumidores una medida objetiva de la calidad del servicio, se tienen definidos por la Comisión Nacional del Agua los términos de: índice de calidad, cobertura, cantidad, continuidad y precio (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Otra problemática detectada es la falta de redes de monitoreo de fuentes superficiales y subterráneas, que permitan inferir características generales o al menos índices de calidad y cantidad de manera continua para en su caso tomar las medidas preferentemente preventivas o correctivas, según el caso.

Bajo este marco, desafortunadamente no se cuenta con un sistema que tenga un software diseñado exclusivamente para que, a partir de ciertos algoritmos, sea capaz de ejecutar en forma automática la detección de eventos de contaminación de agua incluyendo el cálculo en tiempo real y predicción del índice de calidad del agua. Mucho menos existen estaciones automatizadas flexibles y escalables que permitan ir integrando en un solo sistema las mediciones de parámetros físico químicos, cálculo y predicción de índices de calidad de agua (Buscador de patentes de Google, 2013; Registro de patentes europeas, 2013 y TaKaDu Ltd., 2013).

### 1.3. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Dada la escasez de programas de monitoreo de las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, en muchas ocasiones es inevitable el suministro de

---

agua contaminada a los usuarios, por lo cual es necesario abordar esta problemática específica a través del diseño de un software para un sistema de monitoreo automatizado que permita la detección de eventos de contaminación incluyendo el cálculo y predicción del índice de calidad de agua a partir de medición en tiempo real de parámetros físico químicos de acuíferos tipo libre y en medio granular.

#### 1.4. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

##### 1.4.1. Ambiental

La escasez de agua puede empeorar a causa del cambio climático y fenómenos como la acelerada urbanización, el incremento en la intensidad de las actividades agrícolas, afectando así la disponibilidad de los recursos de agua dulce. El deterioro de la calidad del agua, la vuelve no apta para el consumo humano disminuyendo su abundancia en la naturaleza provocando efectos nocivos en la salud de quienes la consuman en esas condiciones, y alterando diversos ecosistemas relacionados con zonas de recarga de acuíferos, al cambiar las coberturas que propician la infiltración al subsuelo (UNESCO, 2013).

##### 1.4.2. Científica y Legal

La comunidad científica mexicana, ha desarrollado y escalado un amplio conjunto de competencias en el campo de la investigación en materia de agua que incluye, entre otros, el desarrollo de productos tecnológicos innovadores para el mejor aprovisionamiento y consumo del agua, así como acervos de mediciones, modelación numérica, sistemas de alerta, procesos para la gestión sostenible del agua y las cuencas, seguridad del agua, desarrollo urbano, aspectos institucionales fundamentales para garantizar la gobernanza del recurso y participación social. Para atender éste campo de investigación, se creó la “Red Temática del Agua del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología” (RETAC), la cual promueve la coordinación de los esfuerzos entre las competencias existentes en investigación del agua en México (PECyT, 2012).

Un aspecto consensado durante el Foro Nacional para la Elaboración del Programa Especial de Ciencia y Tecnología en Materia de Agua, fue la identificación de ocho grandes retos de investigación que pueden ser usados posteriormente para formular programas de investigación a detalle, dentro de los cuales, el sexto reto definido es el monitoreo e instrumentación en los sistemas de agua (PECyT, 2012).

En México, es responsabilidad de los municipios el suministro de los servicios de agua potable. Para llevar a cabo esta tarea se requiere, desde el punto de vista técnico, identificar y proteger las fuentes de suministro de la contaminación, vigilar la calidad del servicio, mantener y operar las redes de distribución a los usuarios y otras actividades (Comisión Nacional del Agua, 2007).

##### 1.4.3. Económica

---

En vista de los problemas del agua a nivel mundial, de su creciente demanda en usos distintos a nivel nacional, así como de la necesidad de políticas estratégicas de adaptación ante el cambio climático en el sector hídrico y otras actividades económicas, el país requiere de investigación que genere herramientas tecnológicas para un manejo sostenible del recurso hídrico y garantice el futuro suministro de agua entre sus habitantes (PECyT, 2012).

#### 1.4.4. Tecnológica

La generación y desarrollo de conocimiento en sistemas de monitoreo, permite proporcionar no sólo información del manejo del recurso hídrico, sino que también puede proveer las bases para simular el funcionamiento hídrico por medio de modelos de predicción. Además del monitoreo, es necesaria la dimensión espacial del procesamiento y exploración de información, es decir, se necesita de métodos que nos permitan generar sistemas de entendimiento en un marco muy breve, tales como la instrumentación, medición y procesamiento de señales, que puedan ser usados en muchos lugares y que permita generar sistemas de comprensión de grandes áreas relevantes para la dirección de líneas de investigación y desarrollo tecnológico del agua (PECyT, 2012).

Hoy en día, existe una variedad de herramientas computacionales, instrumentos de medición y tecnologías que hacen viable el diseño y desarrollo de una estación de monitoreo automatizada para la predicción del índice de calidad del agua (Piñeiro et al., 2013).

#### 1.5. ANTECEDENTES

La legislación mexicana vigente, reconoce que la información sobre el agua es vital para que como sociedad, México pueda administrar este recurso vital, y establece para la CONAGUA la atribución de integrar un Sistema Nacional de Información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del agua (SINA), con la participación de los Organismos de Cuenca, en coordinación con los gobiernos de los estados y del Distrito Federal, con los Consejos de Cuenca, en concordancia con la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica y la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública Gubernamental (Comisión Nacional del Agua, 2013).

Por lo que respecta al cálculo de índices de calidad de agua, se tienen los siguientes antecedentes de investigación científica:

A pesar de que en diversas partes del mundo han desarrollado sistemas automáticos de administración del agua, debido al latente riesgo de sufrir ataques terroristas en sus sistemas de distribución del agua, en el país de Israel tienen antecedentes de solución muy aproximados a la hipótesis planteada en el presente trabajo de investigación (Ostfeld et al., 2011; Registro de patentes europeas, 2013 y TaKaDu Ltd., 2013).

---

Existe una metodología basada en un algoritmo genético para un simulador de periodo prolongado que relaciona algunos parámetros hidráulicos, la calidad del agua y un esquema numérico para el procesamiento computarizado del potencial de precipitación de carbonato de calcio (CCPP). Se utilizaron dos ejemplos para demostrar la metodología desarrollada (Ostfeld et al., 2011).

Perelman et al. (2012), plantearon un marco general de la integración de un modelo de estimación de manejo de datos con probabilidad secuencial, sugerido para la detección de alteraciones a la calidad del agua y sus múltiples variaciones en series de tiempo. El método planteado, utiliza redes neuronales artificiales (RNA) para el estudio de la interacción entre los múltiples valores de la calidad del agua y la detección de posibles valores atípicos.

Un tercer artículo; muestra un esquema de umbrales dinámicos para detectar eventos de contaminación en sistemas de distribución del agua, basado en la metodología del párrafo anterior, utilizaron un algoritmo genético para el ajuste de cinco variables de decisión: filtros positivos y negativos, umbrales dinámicos positivos y negativos, una ventana deslizante y una regla recursiva de Bayes, que emplea las cinco variables de decisión, para la detección en tiempo real de eventos en operación. Utilizando la misma base de datos, la metodología propuesta se comparó con Perelman et al. (2012) y se demostró una mejora considerable en la capacidad de detección de contaminantes (Arad et al., 2013).

Es importante definir bajo qué criterios se debe evaluar el índice de calidad de agua, por lo que en 2013, hicieron un estudio sobre las medidas subjetivas vs las objetivas en la evaluación de la calidad del agua, en el cual se examinaron los factores que subyacen a la divergencia entre la percepción de la calidad del agua entre los propietarios de casas en verano y la clasificación objetiva de la calidad del agua (Artell et al., 2013).

Utilizaron modelos para identificar los factores que explican tanto la divergencia entre la percepción subjetiva y medida objetiva de la calidad del agua. Los resultados ponen de manifiesto la necesidad de tomar en cuenta las percepciones individuales subjetivas, además de las medidas objetivas de los estudios de valoración, especialmente si la calidad ambiental de la zona de estudio presenta una diferencia considerable de la calidad media en general (Artell et al., 2013).

En este mismo sentido, hay un estudio sobre un nuevo método para la detección de valores atípicos en los parámetros de calidad del agua, tales como la turbidez, conductividad y contenido de amonio como variables indicadoras, que consiste en considerar el monitoreo de la calidad del agua a través del tiempo como curvas continuas en lugar de como puntos discretos, es decir, el conjunto de datos estudiado se considera como una función dependiente del tiempo en lugar de como un conjunto de valores discretos en diferentes instantes de tiempo. Esta metodología, se aplicó a

---

la detección de valores atípicos en las muestras de control de calidad del agua en la cuenca del río Miño con éxito (Piñeiro et al., 2013).

Utilizando otros parámetros que determinan la calidad del agua tales como la temperatura, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos y bacterias coliformes, es posible predecir mediante modelos de regresión múltiple un índice de la calidad de agua y la comprensión de estas relaciones (Gyawali et al., 2013).

Por lo que respecta a tecnologías existentes en el mercado, en julio de 2012, se presentó la solicitud de patente de un sistema basado en un método computarizado para el monitoreo de la utilización de la red de distribución de agua potable. El método incluye la recepción de los datos que representan parámetros medidos por diferentes instrumentos, tales como el flujo, la presión, el nivel de cloro, pH y turbidez del agua que se distribuye a través de las tuberías (TaKaDu Ltd., 2013 y Registro de patentes europeas, 2013).

En lo referente a inteligencia artificial, un antecedente que resultó de alta relevancia para la presente investigación, habla sobre un modelado con una red neuronal artificial usando una función de base radial para predecir el valor de sólidos disueltos totales, turbidez y conductividad eléctrica con una serie de datos históricos del Río Johor localizado en Malasia, para lo cual se usaron cuarenta muestreos realizados de 1998 a 2002 (Elshafie et al., 2013).

Sobre ésta temática, también se ha encontrado un modelo de lógica difusa que emplea un índice con indicadores de calidad de agua y fue aplicado con la legislación vigente de Quebec para el río Morocco, sin embargo es un modelo que no puede ser tomado para un análisis en tiempo real ya que considera datos de seis indicadores biológicos y no considera una predicción para eventos futuros (Mouhrir et al., 2014)

Por otro lado, se aplicó un modelo hidrodinámico bidimensional y un modelo de la calidad del agua en tres depósitos de agua, para predecir la carga de contaminante liberado de cada depósito en respuesta a diferentes escenarios de flujo para un canal de interconexión. El modelo fue calibrado usando dos nuevos métodos: un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros del modelo y una búsqueda de patrones para optimizar dichos parámetros (Park et al., 2014).

Derivado de la incertidumbre y la complejidad en el proceso de evaluación de la calidad del agua de las redes de abastecimiento, se desarrolló un nuevo modelo de variación del coeficiente de grado de discrepancia sobre la base de la teoría de conjuntos análisis par. El modelo fue probado evaluando las condiciones de calidad del agua de las redes de abastecimiento de agua de 3 puntos de control (Li, 2014).

## 1.6. HIPÓTESIS



---

Es posible el diseño de un sistema flexible y escalable capaz de monitorear y predecir automáticamente el índice de calidad del agua en tiempo real utilizando inteligencia artificial, desde un ambiente de programación gráfico y compatible con instrumentos de medición, software y hardware de diferentes marcas.

## 1.7. OBJETIVOS

### 1.7.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema para el monitoreo automatizado que permita detectar eventos de contaminación en sistemas de distribución de agua mediante técnicas de inteligencia artificial hasta lograr su predicción.

### 1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer un modelo matemático que permita detectar y predecir eventos de contaminación en sistemas de distribución de agua mediante técnicas de inteligencia artificial.
- Diseñar a nivel conceptual y a detalle un sistema de monitoreo automatizado, escalable y flexible que permita detectar y predecir eventos de contaminación de agua en un acuífero tipo libre y en medio granular.
- Desarrollar un software que permita el funcionamiento del sistema de monitoreo y predicción automatizado mediante un algoritmo basado en el modelo matemático obtenido.

## **CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO**

### 2.1. Contaminación e índice de calidad del agua

A continuación se presenta una revisión de los conceptos básicos que se atendieron para lograr comprender fácilmente la temática abordada.

#### 2.1.1. Definición de contaminación del agua

La contaminación del agua se puede definir como: la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, así como la inducción de condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica (Sánchez et al., 2007).

#### 2.1.2. Índice de Calidad de agua

El índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento, en tanto que

---

en el agua en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100% o a un valor de 1 (Mouhrir et al., 2014).

En México, el ICA fue desarrollado de acuerdo con las siguientes etapas: La primera consistió en crear una escala de calificación de acuerdo con los diferentes usos del agua. La segunda involucró el desarrollo de una escala de calificación para cada parámetro de tal forma que se estableciera una correlación entre los diferentes parámetros y su influencia en el grado de contaminación.

Después de que fueron preparadas estas escalas, se formularon los modelos matemáticos para cada parámetro, los cuales suponen convertir los datos físicos en correspondientes índices de calidad por parámetro ( $X_i$ ). Debido a que ciertos parámetros son más significativos que otros en su influencia en la calidad del agua, este hecho se modeló introduciendo pesos o factores de ponderación ( $W_i$ ) según su orden de importancia respectivo. Finalmente, los índices por parámetro son promediados a fin de obtener el ICA de la muestra de agua (Comisión Nacional del Agua, 2007).

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n X_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \dots \dots \dots (1)$$

## 2.2. Variables asociadas a la contaminación del agua

Para medir la calidad del agua se emplean una serie de parámetros o índices, que nos permiten cuantificar el grado de alteración de sus características naturales, teniendo en cuenta su uso.

Para evaluar correctamente el funcionamiento de un sistema de abastecimiento de agua potable comunitario, deben tenerse en cuenta varios factores. Algunos países que han desarrollado estrategias nacionales de vigilancia y control de la calidad de sistemas de abastecimiento de agua potable, han adoptado indicadores cuantitativos del servicio (es decir, indicadores de la calidad, cantidad, accesibilidad, cobertura, asequibilidad y continuidad del servicio) para su aplicación en los ámbitos comunitario, regional y nacional. Lo habitual es incluir los parámetros fundamentales de calidad tales como cloro, turbidez y pH (Secretaría de Salud, 2001; World Health Organization, 2006; Comisión Nacional del Agua, 2007; Elshafie et al., 2013 y Mouhrir et al., 2014).

### 2.2.1. Características físicas y organolépticas

Características físicas y organolépticas: son aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos, y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio (World Health Organization, 2006).

### 2.2.2. Características químicas

---

Características químicas: son las debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana (World Health Organization, 2006).

### 2.2.3. Características microbiológicas

Características microbiológicas: son las debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y *Escherichia coli* o coliformes fecales (Secretaría de Salud, 2001).

Los parámetros biológicos fundamentales de calidad del agua son *E. coli*, que se acepta como sustituto adecuado la detección de coliformes termo tolerantes (fecales) y residuo de cloro (si se practica la cloración del agua). Estos parámetros pueden medirse in situ mediante instrumentos de análisis relativamente sencillos. El análisis in situ es fundamental para la determinación de la turbidez y el residuo de cloro, que cambian rápidamente durante el transporte y almacenamiento, pero resulta también de interés para otros parámetros que no puedan determinarse en el laboratorio por no disponerse de los servicios pertinentes o cuando el transporte de las muestras plantea problemas que hacen que la toma de muestras y análisis convencionales no resulten prácticos.

La vigilancia de las fuentes de agua, sobre todo si es responsabilidad de operadores comunitarios o de los hogares, debe conllevar normalmente a la realización de inspecciones sanitarias periódicas. Los formularios de inspección sanitaria utilizados deben ser comprensibles y fáciles de utilizar; pueden, por ejemplo, consistir en representaciones pictográficas. Los factores de riesgo incluidos deben preferiblemente referirse a actividades que puede controlar el operador y que pueden afectar a la calidad del agua.

Las recomendaciones de adopción de medidas ligadas a los resultados obtenidos en la vigilancia operativa deben ser claras, y deben proporcionar la formación precisa. Los operadores deben realizar también evaluaciones físicas periódicas del agua, especialmente después de lluvias abundantes, para determinar si se producen cambios evidentes en la calidad del agua (por ejemplo, cambios de color, olor o turbidez) (World Health Organization, 2006 y Comisión Nacional del Agua, 2007).

### 2.2.4. Normativa vigente aplicable a contaminación del agua

Para medir la calidad del agua se emplean una serie de parámetros o índices, que nos permiten cuantificar el grado de alteración de sus características naturales, teniendo en cuenta su uso. Tras revisar algunas investigaciones relativas a calidad de agua, las guías de la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud y la legislación vigente en México, para el presente trabajo, resultaron de gran

---

relevancia seis propiedades físico-químicas ya que han sido empleadas con éxito y su valor nos brinda una tendencia de eventos de contaminación al ser variables que pueden ser medidas con elementos sensores en tiempo real y no implican un análisis de laboratorio (Gümrah et al., 2000; World Health Organization, 2006; Sánchez et al., 2007; Comisión Nacional del Agua, 2007; Perelman et al., 2012; Arad et al., 2013; Artell et al., 2013; Elshafie et al., 2013 y Mouhrir et al., 2014).

#### 2.2.5. Descripción de variables seleccionadas

En los siguientes subtemas, se describen las seis variables seleccionadas y descripciones generales que fueron los motivos principales por los cuales se ha elegido trabajar con éstas.

##### 2.2.5.1. pH

El pH permite detectar sustancias ácidas o básicas dentro del agua y al ser un factor logarítmico se interpreta que cuando una solución incrementa diez veces su acidez, el pH disminuye una unidad y cuando la solución aumenta cien veces su acidez, el pH disminuye en dos unidades. A medida que el valor de entrada se aproxima más al cero se considera que la sustancia tiende a ser un extremo de la acidez y entre más se aproxima al 14 se considera la mayor presencia de sustancias base. Su intervalo del valor ideal es [6.5, 8.5] en unidades de pH (Secretaría de Salud, 2001; World Health Organization, 2006; Comisión Nacional del Agua, 2007 y Arad et al., 2013).

##### 2.2.5.2. Temperatura

La temperatura permite detectar descargas de contaminación térmica por fuentes externas en aguas subterráneas ya que es relativamente constante y un aumento de ésta disminuye la solubilidad de los gases y aumenta, en general, la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones metabólicas, acelerando la putrefacción y al mismo tiempo brinda información de la posible existencia de contaminación biológica. Su intervalo del valor ideal es [10, 14] en grados Celsius (Secretaría de Salud, 2001; World Health Organization, 2006; Comisión Nacional del Agua, 2007 y Gyawali et al., 2013).

##### 2.2.5.3. Turbidez

La turbidez aumenta el color aparente del agua y debido a la presencia de materia orgánica e inorgánica en suspensión, tales como arcillas, limos, plancton y organismos microscópicos. Entre mayor sea la turbidez se considera un color de agua menos deseado y entre más pequeño sea su valor se considera una turbidez ideal. El intervalo posible del valor ideal es [0,5] en unidades de turbidez nefelométricas (UTN) (Secretaría de Salud, 2001; World Health Organization, 2006; Comisión Nacional del Agua, 2007; Elshafie et al., 2013 y Piñeiro et al., 2013).

##### 2.2.5.4. Oxígeno disuelto

Entre más baja sea la concentración de oxígeno disuelto la contaminación orgánica se incrementa, el intervalo de valores establecido como ideal es [4, 10] en miligramos

---

de oxígeno por litro (Secretaría de Salud, 2001; World Health Organization, 2006; (Comisión Nacional del Agua, 2007 y Gyawali et al., 2013).

#### 2.2.5.5. Conductividad eléctrica

Cuando la conductividad eléctrica presenta cambios significativos en su valor, puede ser un indicador de una descarga tóxica o alguna otra fuente de contaminación o bien lo más común es que este valor se incrementa ante una presencia importante de sales. El intervalo propuesto como ideal es [0, 0.05] en Siemens por metro (Secretaría de Salud, 2001; World Health Organization, 2006; Comisión Nacional del Agua, 2007 y Elshafie et al., 2013).

#### 2.2.5.6. Cloro residual libre

En el agua potable es común utilizar el hipoclorito como desinfectante, entonces su ausencia resulta ser un indicador de que no ha existido desinfección y por tanto se tiene la posibilidad de presencia de contaminación en el agua y por otro lado tampoco es recomendable el exceso, por lo que el intervalo de valores ideal de ésta variable es [0.2, 1.5] en miligramos por litro (Secretaría de Salud, 2001; World Health Organization, 2006 y Comisión Nacional del Agua, 2007).

### 2.3. Sistemas SCADA

Los sistemas SCADA (Supervisión, control y adquisición de datos) son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones y han permitido logros sustanciales en términos de funcionalidad, escalabilidad, el rendimiento y la apertura de tal manera que son una alternativa para el desarrollo de los más exigentes y complejos sistemas de monitoreo y control. Los elementos principales de un sistema SCADA son: una arquitectura de hardware encargada de adquirir señales del mundo real, una arquitectura de software encargada de procesar información con base en las señales adquiridas y algoritmos programados y protocolos de comunicación que enlazan el hardware con el software e interfaces correspondientes (Daneels et al., 1999; National Instruments, 2013; SIEMENS, 2013 y Bogdanchikov et al., 2014).

Entonces, para monitorear automáticamente cualquier señal del mundo real es necesario tener mínimamente lo siguiente (figura 1):

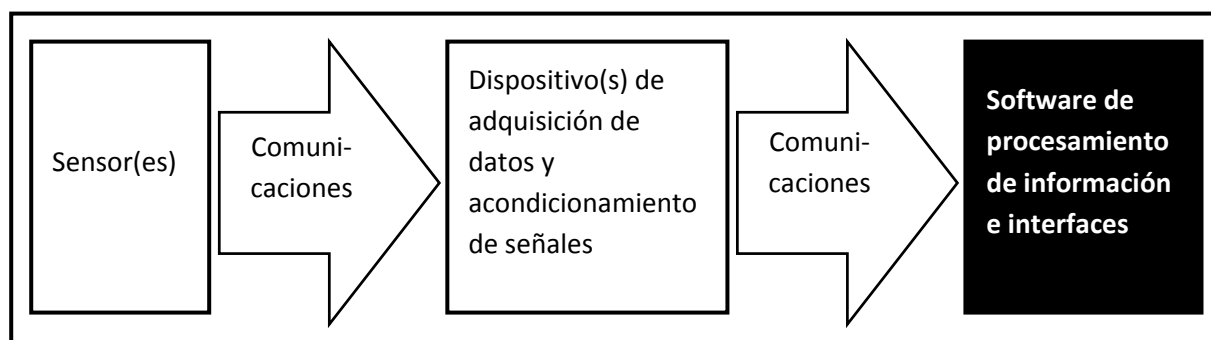


Figura 1. Elementos mínimos para monitorear una señal del mundo real (Autor).

---

De esta figura, se infiere que para monitorear y predecir eventos de contaminación de agua, se deben definir las variables que puedan ser medidas mediante elementos sensores y un modelo que después pueda desarrollarse en un software que permita determinar y predecir la condición del agua en sistemas de distribución en tiempo real.

## 2.4. Inteligencia artificial

El cerebro humano es hasta el momento, un sistema de cálculo complejo con que cuenta el hombre. Una computadora y el hombre realizan distintas actividades, de tal forma que una operación relativamente sencilla para el hombre puede representar una tarea difícil de resolver por una computadora y viceversa (Gümrah et al., 2000; Basogain, 2007; Elshafie et al., 2013 y Sprockel et al., 2014).

### 2.4.1. Definición

En éste sentido, la capacidad del cerebro humano de pensar, recordar y resolver problemas ha inspirado a diversas investigaciones científicas a tratar de modelar en una computadora el funcionamiento y toma de decisiones de un ser humano lo cual es usualmente denominado como inteligencia artificial. Los profesionales de diferentes campos como la ingeniería, filosofía, fisiología y psicología han unido sus esfuerzos debido al potencial que ofrece esta tecnología y están encontrando diferentes aplicaciones en sus respectivas áreas de interés (Gümrah et al., 2000; Basogain, 2007; Elshafie et al., 2013; Chen et al., 2014; Mouhrir et al., 2014 y Sprockel et al., 2014).

### 2.4.2. Técnicas de inteligencia artificial

Para la presente investigación y derivado de los antecedentes revisados, han resultado de mucho interés tres técnicas utilizadas en el campo de la inteligencia artificial, que son: Lógica difusa, redes neuronales artificiales y método de umbrales dinámicos, los cuales se describen en los puntos que siguen.

#### 2.4.2.1. Lógica difusa

Normalmente en la lógica convencional tenemos un conjunto de enunciados que pueden ser verdaderos o falsos, sí o no, 1 o 0. En el contexto de la lógica difusa, el enunciado de “la temperatura es de 25 ° Celsius” puede ser verdadero o falso. Sin embargo en muchas ocasiones la respuesta puede necesitar más que un simple valor de verdadero o falso como está muy templado, está templado, está caliente o no está nada frío. La lógica difusa copia este patrón usando niveles de posibilidad en un número de categorías inciertas o difusas (Mouhrir et al., 2014).

#### 2.4.2.2. Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales (ANN) son una herramienta adaptada para imitar las redes neuronales naturales del cerebro humano utilizando un proceso de cálculo computacional.

---

Los modelos de ANN han sido utilizados con éxito para modelar las relaciones de entrada-salida de funciones relativamente complejas en diversas disciplinas. El comportamiento natural hidrológico es apropiado para la aplicación de los métodos de ANN, sin embargo, para esta disciplina el modelado de ANN aún se encuentra en sus etapas iniciales y se utilizan porque se cree que permite hacer aproximaciones universales de cualquier función continua. Una red neuronal consta de al menos tres o más capas, que comprenden una capa de entrada, una capa de salida, y un determinado número de capas ocultas que es donde se procesa la mayor parte de la información requerida, donde cada neurona está conectada a las neuronas de la capa que sigue (Gümrah et al., 2000; Basogain, 2007; Elshafie et al., 2013; y Ong et al., 2014).

#### 2.4.2.2.1. Red neuronal artificial tipo perceptrón

Una ANN tipo perceptrón multicapa está formada por múltiples capas por lo cual permite resolver problemas que no son linealmente separables ya que puede ser total o localmente conectado y es una de las arquitecturas de red más utilizadas al momento. El proceso de elaboración de una red neuronal es, en su mayoría, un trabajo de ensayo y error (según algunas apreciaciones de investigaciones revisadas) e implica realizar una arquitectura muy específica para cada problema a resolver por lo cual no hay una metodología bien definida para ello (Gümrah et al., 2000; Basogain, 2007; Elshafie et al., 2013; Ong et al., 2014 y Sprockel et al., 2014).

#### 2.4.3. Técnicas de predicción de variables

Tras la revisión de antecedentes, se ha verificado la existencia de una técnica que utiliza umbrales dinámicos, la cual permite el entrenamiento de sistemas tomando como referencia datos históricos (Correal et al., 2008; Arad et al., 2013 y Chen et al., 2014).

##### 2.4.3.1. Método de umbrales dinámicos

Mediante ésta técnica que combina algunas herramientas de estadística básica y programando un algoritmo en alguna computadora, de forma dinámica se van almacenando datos históricos que se van actualizando a través del tiempo con ayuda de una función de ventana deslizante de determinada variable con la finalidad de establecer dos límites que son un valor inferior y un valor superior. A dichos valores límite, se les denomina umbrales dinámicos y varían en función de la desviación estándar y el promedio de datos almacenados a través del tiempo para un periodo que es fijado previamente. Ésta técnica permite la detección de eventos atípicos en algunos fenómenos, partiendo de que la detección de un cambio significativo en alguna variable representa un evento anómalo en cualquier instante de tiempo sobre todo si se sale de los umbrales definidos (Correal et al., 2008; Arad et al., 2013 y Chen et al., 2014).

---

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EMPLEADA

### 3.1. Descripción de la metodología empleada

Como se ha mencionado en la introducción, los métodos de detección de eventos de contaminación están dirigidos a identificar el comportamiento anormal en los sistemas de distribución de agua. La identificación de la mayoría de contaminantes normalmente requiere de una toma de muestras puntuales seguidos por análisis de laboratorio, y dado que la instrumentación en línea capaz de medir y detectar todos los posibles contaminantes no existe, la presencia de contaminantes puede ser inferido sólo a través de mediciones sustitutas. Tales mediciones pueden distinguir irregularidades en el monitoreo de calidad de agua, parámetros hidráulicos, y su interacción durante condiciones normales. El enfoque de ésta investigación, se basa en la premisa de que cuando un contaminante se inyecta en un sistema de distribución de agua, ya sea deliberada, accidental, o naturalmente, afectará al menos uno de los parámetros de calidad monitoreados en línea y las interacciones entre ellos. Basado en esta idea, el análisis de datos monitorizados continuamente se pueden utilizar para dar una indicación de la presencia de contaminantes en un sistema de distribución de agua (Perelman et al., 2012 y Arad et al., 2013).

En primer lugar, se seleccionaron seis variables que permiten monitorear la condición del agua en tiempo real y de forma periódica y continua. Lo habitual es incluir los parámetros fundamentales de calidad (tales como cloro, turbidez y pH). En este trabajo se determinaron como parámetros clave el pH, la temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y cloro residual libre. A partir de dichas variables se desarrolló un índice de calidad de agua tomando como parámetro centinela al pH y asignando pesos sinápticos a cada variable seleccionada, (Secretaría de Salud, 2001; World Health Organization, 2006; Echarri, 2008; Masters et al., 2008; Hernández, 2013 y Elshafie et al., 2013).



---

En seguida, se desarrolló un modelo de inteligencia artificial, cuyo funcionamiento general se describe en la figura 2.

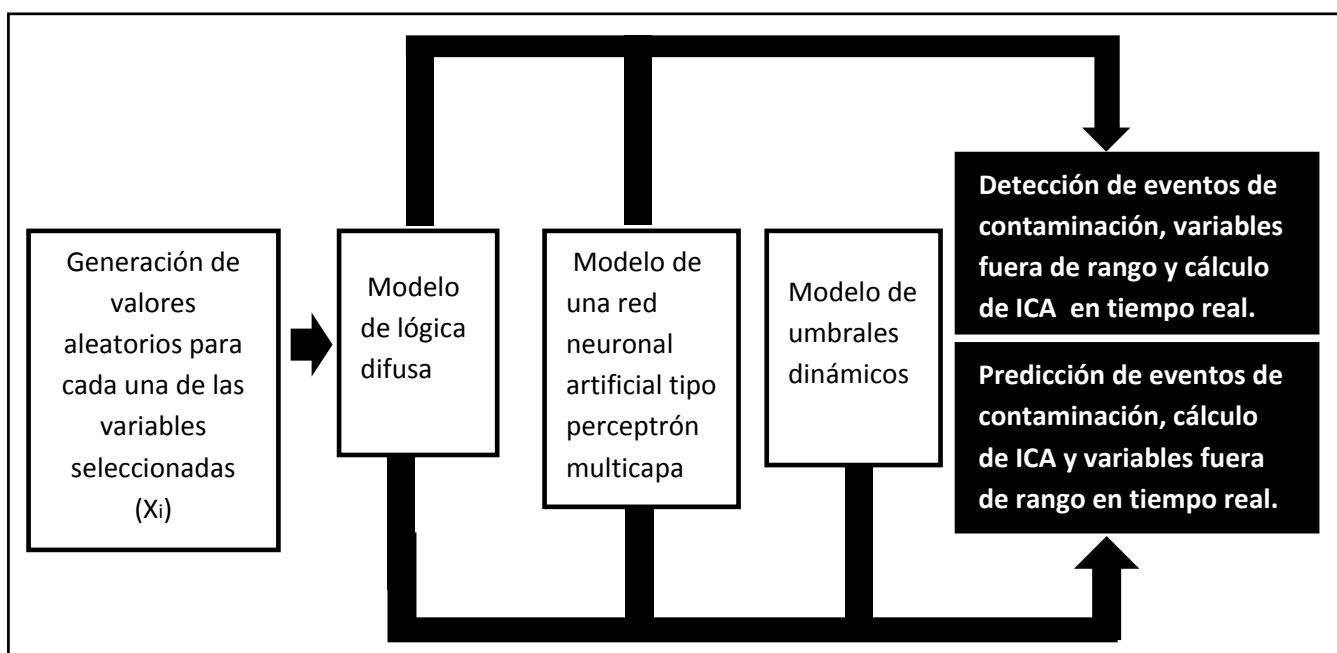


Figura 2. Descripción general del modelo de inteligencia artificial desarrollado (Autor).

El modelo desarrollado combina las técnicas de lógica difusa y una red neuronal tipo perceptrón multicapa para detectar eventos de contaminación y variables fuera de los límites establecidos en 2006 por la Organización Mundial de la Salud, lineamientos de CONAGUA, 2007 y la NOM-127-SSA1-1994, junto con sus posibles causas y al mismo tiempo calcula el valor del índice de calidad de agua construido a partir de dichas técnicas.

Posteriormente, se ha agregado un modelo de umbrales dinámicos con un periodo de seis horas con ambas técnicas para lograr la predicción de eventos de contaminación de agua y variables fuera de los límites mencionados en tiempo real para una ventana dinámica.

El modelo tiene integrado un sistema de autoaprendizaje y dependiendo del valor de cada variable y del propio índice, el modelo desarrollado activa alarmas con interpretaciones lingüísticas para diagnosticar eventos de contaminación de agua tal y como lo haría un ser humano experto.

En lo que respecta a la parte de umbrales dinámicos, el modelo está diseñado para funcionar con base en una serie de 72 datos para cada variable de intervalos cincominutales que se van actualizando en horarios definidos para 4 series de datos

---

por día. El modelo antes descrito se ha programado en un software basado en una plataforma de LabView que permite simular generando valores aleatorios para todas las variables seleccionadas.

Para probar el modelo se ha conseguido una base de datos de fuentes de agua de un sistema de distribución de Malasia y se introdujeron valores reales al modelo de pH y temperatura, y en LabView se logró hacer un simulador de valores aleatorios para cada una de las seis variables seleccionadas, lo cual ha sido suficiente para probar el modelo desarrollado y específicamente la parte del autoaprendizaje de la red.

Finalmente, proponiendo tres alternativas, se ha logrado diseñar un sistema de supervisión, control y adquisición de datos eligiendo la alternativa más adecuada cuya selección ha dependido de una evaluación que considera las necesidades y especificaciones de diseño requeridas, con una arquitectura de hardware encargada de adquirir señales del mundo real, una arquitectura de software encargada de procesar información con base en las señales adquiridas y algoritmos programados de acuerdo al modelo desarrollado y protocolos de comunicación que enlazan el hardware con el software e interfaces correspondientes.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **4.1. Modelado neurodifuso**

En éste punto se muestra a detalle la forma en que se desarrolló la construcción de un índice de calidad de agua con las seis variables seleccionadas (pH, temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y cloro residual libre) y el desarrollo de un modelo de inteligencia artificial que combina las técnicas de lógica difusa, una red neuronal artificial tipo perceptrón y un método de umbrales dinámicos para detectar y predecir automáticamente eventos de contaminación en sistemas de distribución de agua potable en tiempo real.

#### **4.1.1. Modelado con lógica difusa (FLM)**

Se ha planteado el diseño general del modelo desarrollado mediante lógica difusa para detectar eventos de contaminación junto con sus posibles causas, para lo cual se ha construido un índice de calidad de agua a partir de seis variables tomando como referencia los límites establecidos por la “Comisión Nacional del Agua” y la “Organización Mundial de la Salud” y cuyas consideraciones necesarias se han enunciado en el capítulo referente a marco conceptual y teórico.

El modelo desarrollado se describe de forma general en la figura 3:

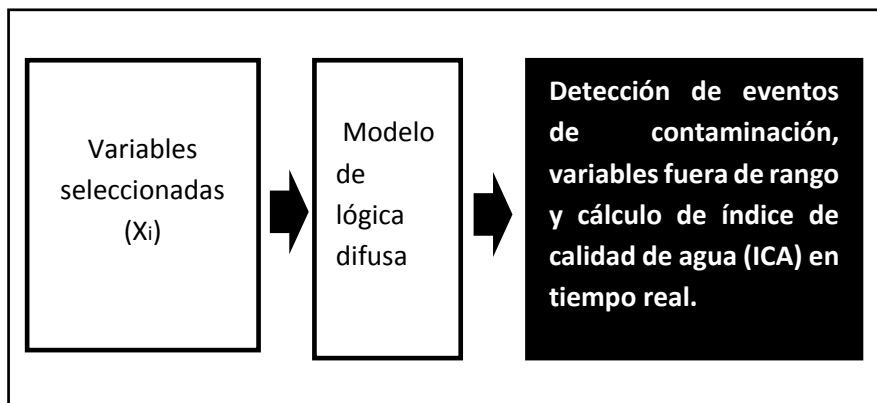


Figura 3. Diagrama general del modelado con lógica difusa (Autor).

La manera en que se ha construido la parte de lógica difusa del modelo ha sido la siguiente:

A) Se ha definido el intervalo posible de operación para cada una de las seis variables seleccionadas  $X_i$  [Mínimo valor posible, Máximo valor posible], dependiendo del valor numérico que se tenga y la interpretación del mismo.

B) Se definieron rangos que corresponden a valores lingüísticos para cada caso y en seguida se establecieron valores difusos para cada una de ellas en un rango  $[0, 1]$ .

C) También se definieron cinco intervalos de valores difusos dentro de ese universo que posteriormente asigna uno de cinco valores difusos numéricos que son: 0, 0.25, 0.5, 0.75 ó 1; entre más cerca esté del cero indica que el valor de la variable se aleja del valor ideal y entre más cerca esté del 1 significa que está dentro del rango permitido o deseable.

Para asignar los intervalos del valor numérico mostrado, para cada una de las variables se tomaron en cuenta los rangos establecidos como permitidos por la OMS, la normatividad Mexicana con algunos lineamientos y las consideraciones relevantes para cada una de las variables que se enuncian más adelante (Secretaría de Salud, 2001) y (Comisión Nacional del Agua, 2007).

D) Se planteó una ecuación para calcular el índice de calidad de agua (ICA), considerando pesos sinápticos para cada una de las variables elegidas.

Para comprender lo anterior, por ejemplo **SI** a la entrada se tiene un valor de pH igual a 7.2, **ENTONCES** cae dentro del intervalo  $[6.5, 8.5]$ , lo cual indicaría en etiqueta lingüística que está dentro del rango ideal y por tanto le corresponde un valor difuso numérico de 1. Los valores difusos numéricos asociados han sido propuestos para cada una de las variables seleccionadas. De acuerdo con las seis variables definidas, se ha construido un índice de calidad de agua. Se observa que el pH es un importante

---

parámetro que permite detectar sustancias dentro del agua, por lo cual se ha decidido usarlo como parámetro centinela de dicho modelo (Perelman et al., 2012).

Se han asignado los pesos sinápticos dejando al pH como parámetro centinela tal como se explicó anteriormente, por lo cual considerando que el ICA representa un valor igual a 1, entonces cuando el pH aporta el 0.5 que equivale al peso sináptico cuando sus valores se encuentran dentro del rango aceptable y los otros 0.5 los aportan las cinco variables restantes que representan cada una de ellas un 0.1 de dicho índice cuando sus valores estén dentro de los rangos deseables.

Esta técnica de inteligencia computacional ha permitido llevar a cabo una multivaluación similar a cómo puede procesar el cerebro humano el valor de cada variable seleccionada y el ICA.

La clave para entender cómo trabaja el modelo desarrollado es el siguiente: teniendo un posible rango de valores, se determina un universo de discurso, dentro del cual se ha definido un conjunto difuso de valores el cual es caracterizado por una función de pertenencia. Los elementos básicos del modelo de lógica difusa son:

**Fuzzificador:** La entrada del modelo presentado es un valor numérico proveniente de cada una de las variables definidas que se pretenden evaluar, que en este caso son señales generadas que representan valores de un sensor y para que este valor pueda ser procesado por el sistema difuso, es necesario convertirlo a un lenguaje que un mecanismo de inferencia pueda procesar. Esta es la función de dicho elemento fuzzificador, tomar los valores numéricos generados y convertirlos en valores difusos que pueden ser procesados por un mecanismo de inferencia. Así entonces, los valores difusos son los niveles de pertenencia de los valores de entrada (las variables seleccionadas para determinar el ICA) a los diferentes conjuntos difusos en los cuales se ha dividido el universo de discurso de las diferentes variables de entrada al sistema.

**Mecanismo de inferencia:** Teniendo los niveles de pertenencia arrojados por el fuzzificador, los mismos deben ser procesados para generar una salida difusa. La tarea del sistema de inferencia es tomar los niveles de pertenencia y apoyado en la base de reglas construida y que se describe más adelante en las tablas 1 a 6, generar la salida del sistema difuso.

**Base de reglas difusas:** La base de reglas es la forma en que el sistema difuso puede guardar el conocimiento lingüístico que han permitido resolver el problema para el cual se ha diseñado. Estas reglas son del tipo condicional Si - Entonces. Una regla de la base de reglas o conocimiento tiene dos partes: el antecedente y la conclusión y se muestran en las tablas 1 a 6.

Un ejemplo es: SI el pH es igual a cero ENTONCES el pH está fuera del rango establecido y el agua está extremadamente ácida. De lo anterior, el antecedente es "SI el valor de pH es igual a cero"; y el consecuente es "el pH está fuera del

rango establecido y el agua está extremadamente ácida”. El antecedente y el consecuente son presentados por expresiones lingüísticas.

Defuzzificador: La salida que genera el mecanismo de inferencia es una salida difusa, lo cual significa que no puede ser interpretada por un elemento externo que solo manipule información numérica. Para lograr que la salida del sistema difuso pueda ser interpretada por elementos que solo procesen información numérica, hay que convertir la salida difusa del mecanismo de inferencia; dicho proceso lo lleva a cabo el defuzzificador.

Para explicar lo anterior, se muestra a continuación la siguiente figura 4.

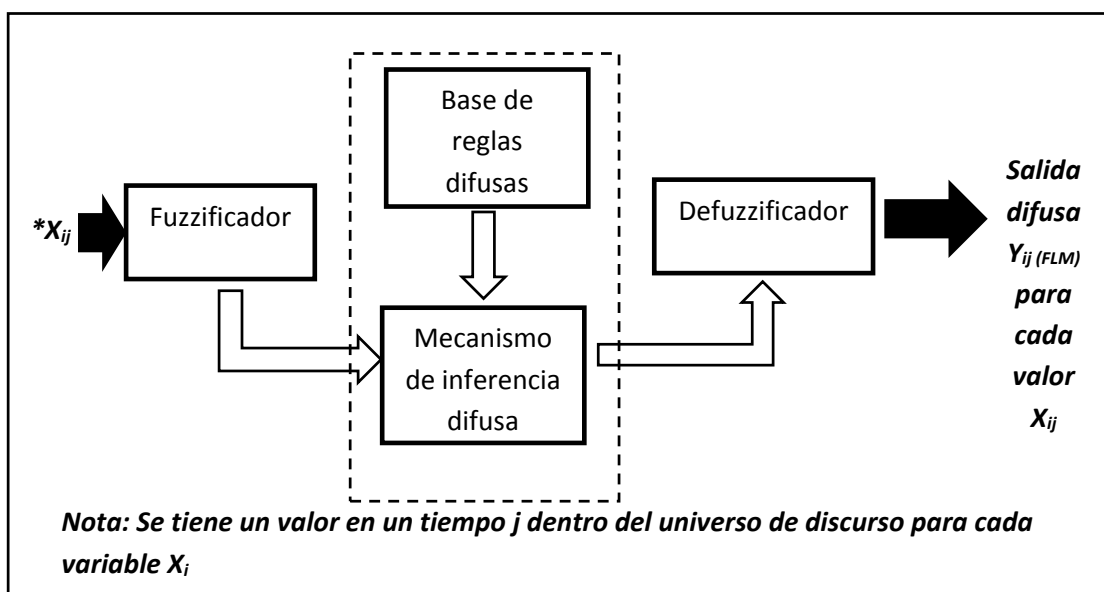


Figura 4. Estructura general del modelo de lógica difusa (Autor).

Se creó la base de reglas difusas, las cuales se pueden observar en los resultados mediante tablas que incluyen los valores de entrada y salida y los valores difusos planteados para cada una de las variables.

Se presenta la Tabla 4, en la cual se describe el índice construido para el pH con sus respectivas etiquetas lingüísticas dependiendo del valor que tome la variable en determinado instante de tiempo. El valor de pH considera unidades de pH como medida.

Tabla 1. Índice de pH construido y asignación de valores lingüísticos (Autor).

Índice de pH	1	0.75	0.75	0.5	0.5	0.25	0.25	0	0
Valor de pH	$\geq 6.5$ Y $\leq 8.5$	$\geq 4.875$ Y $< 6.5$	$> 8.5$ Y $\leq 9.875$	$\geq 3.25$ Y $< 4.875$	$> 9.875$ Y $\leq 11.25$	$\geq 1.625$ Y $< 3.25$	$> 11.25$ Y $\leq 12.625$	$\geq 0$ Y $< 1.625$	$> 12.625$ Y $\leq 14$
Valor lingüístico	En rango ideal	Poco ácida	Poco base	Ácida	Base	Muy Ácida	Muy Base	Ácida extrema	Base extrema

De acuerdo con la Tabla 1, si el agua tiene en un instante de tiempo un valor de pH = 3, entonces el índice de pH tomaría un valor igual a 0.25, lo cual indica que el agua se encuentra con presencia de una sustancia muy ácida.

En la Tabla 2, se describe el índice construido para la variable temperatura con sus respectivas etiquetas lingüísticas dependiendo del valor que adquiera considerando unidades en grados Celsius (°C) en determinado instante de tiempo.

Tabla 2. Índice de Temperatura construido y asignación de valores lingüísticos (Autor).

Índice de Temperatura	1	0.75	0.5	0.25	0	0	0
Valor de Temperatura	$\geq 10$ Y $\leq 14$	$\geq 0$ Y $< 10$ ; Ó $> 14$ Y $\leq 25$	$> 25$ Y $\leq 30$	$> 30$ Y $< 35$ ; Ó $> 37$ Y $< 44$	$\geq 35$ Y $\leq 37$	$\geq 44$ Y $\leq 45$	$> 45$ Y $\leq 100$
Valor lingüístico	En rango ideal	Temperatura aceptable	Baja posibilidad de descargas térmicas	Valor cercano a la formación de coliformes y alta posibilidad de descargas térmicas	Riesgo de formación de coliformes totales y muy alta posibilidad de descargas térmicas	Riesgo de formación de coliformes fecales y muy alta posibilidad de descargas térmicas	Extremadamente muy alta posibilidad de descargas térmicas

De acuerdo con la Tabla 2, si el agua tiene en un instante de tiempo un valor de temperatura = 13, entonces el índice de temperatura tomaría un valor igual a 0.75, lo cual indica que el agua se encuentra con una temperatura aceptable.

En la Tabla 3, se muestra el índice construido para la variable turbidez con sus respectivas etiquetas lingüísticas dependiendo del valor que adquiera considerando unidades de turbidez nefelométricas (UTN) en determinado instante de tiempo.

Tabla 3. Índice de turbidez construido y asignación de valores lingüísticos (Autor).

Índice de Turbidez	1	0.75	0.5	0.25	0
Valor de Turbidez	>=0 Y <=5	>5 Y <=6	>6 Y <=7	>7 Y <=8	>8
Valor lingüístico	Turbidez ideal	Turbidez baja	Turbidez media	Turbidez alta	Turbidez muy alta

Según la Tabla 3, si el agua presenta un valor de turbidez = 6.5, entonces el índice de turbidez tomaría un valor igual a 0.5, lo cual indica que el agua se encuentra media turbia.

En la siguiente Tabla 7, se muestra el índice construido para la variable oxígeno disuelto con sus respectivas etiquetas lingüísticas dependiendo del valor que adquiera considerando miligramos de oxígeno por litro (mg de O<sub>2</sub>/l) como unidad de medida.

Tabla 4. Índice de Oxígeno disuelto construido y asignación de valores lingüísticos (Autor).

Índice de Oxígeno disuelto	1	0.75	0.5	0.25	0
Valor de Oxígeno disuelto	>= 4	< 4 Y >= 3	< 3 Y >= 2	< 2 Y >= 1	< 1 Y >= 0
Valor lingüístico	Concentración ideal de O <sub>2</sub>	Posibilidad baja de contaminación orgánica	Posibilidad media de contaminación orgánica	Posibilidad alta de contaminación orgánica	Posibilidad muy alta de contaminación orgánica

La Tabla 4 muestra que si el agua presenta un valor Oxígeno Disuelto = 4.5, entonces el índice de Oxígeno Disuelto tomaría un valor igual a 1, lo cual indica que el agua se encuentra con una concentración ideal de O<sub>2</sub>.

Para la conductividad eléctrica se ha considerado como unidad de medida los Siemens por metro (S/m) y en la Tabla 5 se muestra el índice construido junto con sus etiquetas lingüísticas generadas.

Tabla 5. Índice de conductividad eléctrica construido y asignación de valores lingüísticos (Autor).

Índice de Conductividad eléctrica	1	0.75	0.5	0.25	0
Valor de Conductividad eléctrica	$\geq 0$ Y $\leq 0.05$	$> 0.05$ Y $\leq 0.5$	$> 0.5$ Y $\leq 1$	$> 1$ Y $\leq 1.5$	$> 1.5$ Y $\leq 3$
Valor lingüístico	Conductividad eléctrica ideal	Baja posibilidad de presencia de sales, descargas tóxicas u otra fuente de contaminación	Media posibilidad de presencia de sales, descargas tóxicas u otra fuente de contaminación	Alta posibilidad de presencia de sales, descargas tóxicas u otra fuente de contaminación	Muy alta posibilidad de presencia de sales, descargas tóxicas u otra fuente de contaminación

De la Tabla 5, se muestra que si el agua presenta un valor de conductividad eléctrica = 2.5, entonces el índice construido para dicha variable tomaría un valor igual a 0, lo cual indica que el agua se encuentra con una muy alta posibilidad de presencia de sales, descargas tóxicas u otra fuente de contaminación.

En la Tabla 6, se muestra el índice construido para el cloro residual libre con sus respectivas etiquetas lingüísticas dependiendo del valor que adquiera considerando unidades los miligramos por litro (mg/l) en determinado instante de tiempo.

Tabla 6. Índice de cloro residual libre construido y asignación de valores lingüísticos (Autor).

Índice de Cloro Residual Libre	1	0.75	0.5	0.25	0	0
Valor de Cloro Residual Libre	$\geq 0.2$ Y $\leq 1.5$	$> 1.5$ Y $\leq 2.5$	$> 2.5$ Y $\leq 3.5$	$> 3.5$ Y $\leq 5$	$> 5$ Y $\leq 5.5$	$\geq 0$ Y $< 0.2$



<b>Valor lingüístico</b>	Nivel ideal de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso	Bajo exceso de nivel de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso	Medio exceso de nivel de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso	Alto exceso de nivel de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso	Muy alto exceso de nivel de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso	Sin presencia de hipoclorito y ácido hipocloroso
--------------------------	---	--	---	--	--	--

Según la Tabla 6, si el agua presenta un valor de cloro residual libre =0.8, entonces el índice de turbidez tomaría un valor igual a 1, lo cual implica que el agua tiene un nivel ideal de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso para el consumo humano.

Hasta esta parte del modelo es posible determinar si las variables están dentro o fuera de rango y arrojar el estatus del agua dependiendo del valor que tenga en tiempo real cada una de ellas. Obviamente, si cualquiera de estas variables se encuentra fuera del rango establecido por la normatividad Mexicana y la OMS, entonces de forma automática es posible determinar que existe un evento de contaminación de agua, pero hasta el momento aún no se ha construido un ICA, cuyo universo de discurso es el rango de posibles valores que puede tener numéricamente dicho índice, que es entre 0 y 1.

En la siguiente Tabla 7, se muestra la manera en que puede ser concebido el índice de calidad de agua, tal y como lo interpretaría un ser humano.

Tabla 7. Índice de calidad de agua y sus valores lingüísticos (Autor).

Índice de Calidad de Agua	1	0.75	0.5	0.25	0
<b>Valor numérico del índice</b>	=1	<1 Y >=0.75	<0.75 Y >=0.5	<0.5 Y >=0.25	<0.25 Y >=0
<b>Valor lingüístico</b>	Sin contaminación	Con poca contaminación	Con media contaminación	Con mucha contaminación	Con extrema contaminación

De acuerdo con la Tabla 7, para denominar los conjuntos difusos se asignaron las etiquetas lingüísticas similares a las que el ser humano usa de forma coloquial definiendo cinco valores de contaminación de agua que son: Con extrema contaminación (ICA=0), con mucha contaminación (ICA=0.25), con media contaminación (ICA=0.50), con poca contaminación (ICA=0.75) y sin contaminación (ICA=1).

Hasta este momento, entonces es complicado determinar un valor numérico para el ICA que asocie las variables seleccionadas, por lo cual, para poder construir un ICA a partir de las 6 variables, se ha recurrido al modelado de una red neuronal artificial que se describe a continuación.

#### 4.1.2. Modelado con red neuronal artificial tipo perceptrón (ANN)

Para desarrollar la red neuronal tipo perceptrón se ha retomado la definición del ICA en la siguiente ecuación ya mostrada anteriormente

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n X_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \dots (1)$$

Dónde:

$n$  = Número de variables seleccionadas que para este caso es igual a 6

$X_i$  = Variable de entrada ;  $W_i$  = Peso sináptico ;  $j = j$  – ésimo valor de la serie

De acuerdo con las seis variables definidas y lo mencionado en el párrafo anterior, se ha construido un índice de calidad de agua. Se observa que el pH es un parámetro importante que permite detectar sustancias dentro del agua, por lo cual se ha decidido usarlo como parámetro centinela de dicho modelo (Arad et al., 2013). Se han asignado los pesos sinápticos dejando al pH como parámetro centinela tal como se explicó anteriormente, por lo cual considerando que el ICA representa un valor igual a 1, entonces cuando el pH aporta el 0.5 que equivale al peso sináptico cuando sus valores se encuentran dentro del rango aceptable y los otros 0.5 aportan las cinco variables restantes que representan cada una de ellas un 0.1 de dicho índice cuando sus valores estén dentro de los rangos aceptables. En la Tabla 8 se muestran los pesos asignados por variable:

Tabla 8. Pesos sinápticos asignados a cada variable (Autor).

$X_i$	Variable	Peso sináptico $W_i$
$X_1$	pH	$W_1=0.5$
$X_2$	Temperatura	$W_2=0.1$
$X_3$	Turbidez	$W_3=0.1$
$X_4$	Oxígeno disuelto	$W_4=0.1$
$X_5$	Conductividad eléctrica	$W_5=0.1$

---

$X_6$	Cloro	$W_6=0.1$
	residual libre	

---

Una vez definida la ecuación del ICA y los pesos sinápticos para cada variable, se procedió a construir la red neuronal que básicamente consiste en capas de neuronas, pesos sinápticos, funciones umbrales, una función de activación escalón unitario y sus respectivas conexiones que dan como salida un valor de ICA.

A partir de la estructura mostrada en la figura 5 mostrada a continuación, las capas del perceptrón pueden mapear las entradas para obtener a la salida una respuesta que pertenece a una función determinada con base en el concepto de ICA y que, debido a una función de activación  $U(t)$  que la genera, puede caer en cinco categorías correspondientes a los valores posibles de contaminación mencionados en el punto 4.1.1. Esta respuesta depende en primer lugar de las entradas de la neurona y en segundo lugar de las operaciones que se realicen al interior de la misma.

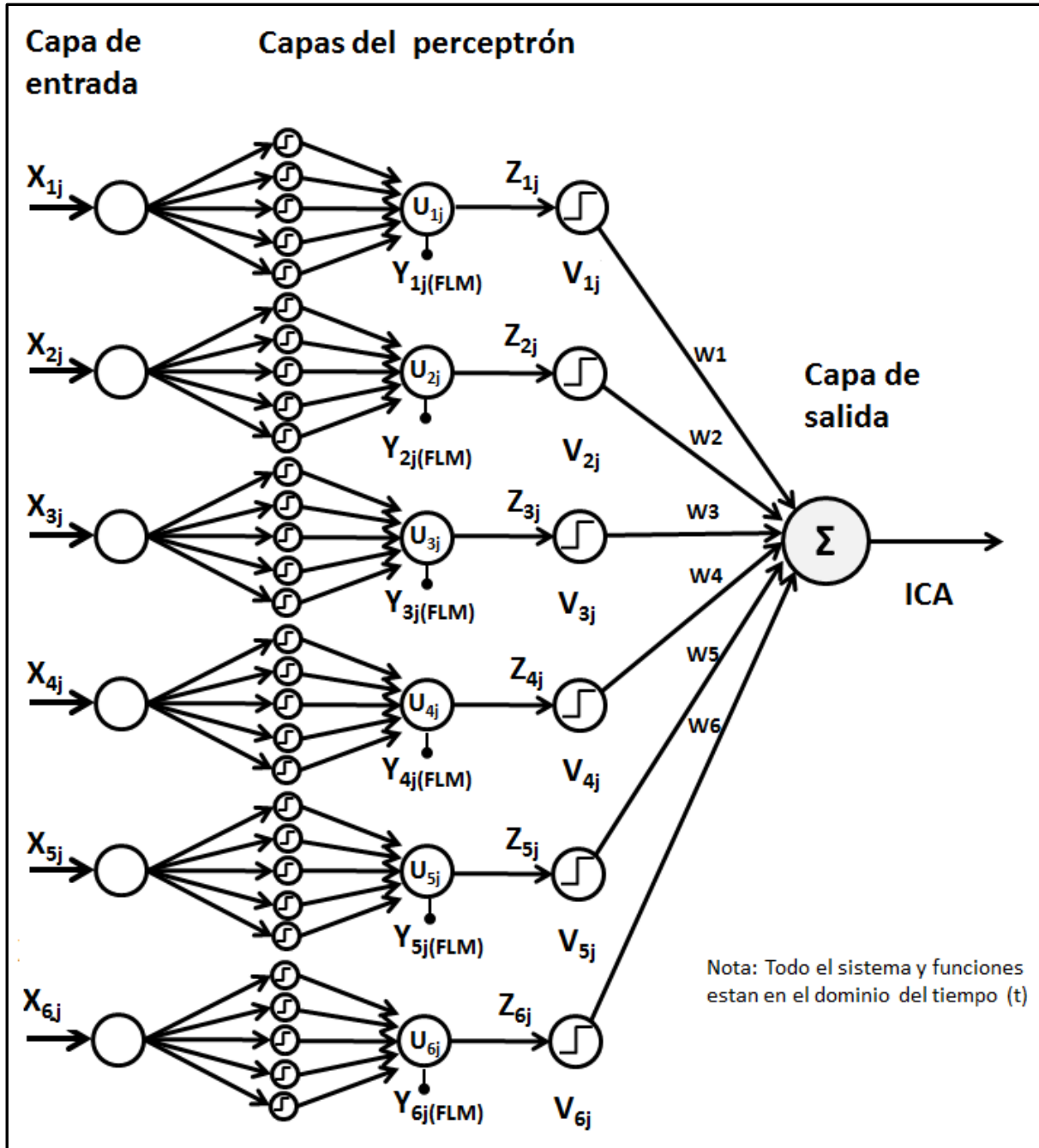


Figura 5. Modelo de red neuronal tipo perceptrón multicapa desarrollado (Autor).

El funcionamiento de la red se describe de la siguiente manera:

- i. Se definió una capa de entradas  $X_{nj}$  que recibe los valores en el tiempo “j” de cada una de las variables “n” seleccionadas para construir el ICA.
- ii. La capa de entrada se conecta con otra capa con 30 neuronas artificiales en donde para cada una de las variables se tienen definidas cinco funciones umbrales (5 neuronas por variable) y en dicha capa se clasifican los valores

de la capa de entrada de acuerdo a las mismas reglas de valores numéricos de la tabla 7 que se utilizaron para el modelo de lógica difusa y se han integrado a esta red. Cuando cae dentro de los rangos respectivos se activa la salida correspondiente y concretamente puede tomar los valores 0, 0.25, 0.5, 0.75 ó 1.

- iii. En seguida, entra a una neurona  $U_{nj}$  que resulta ser la suma de las salidas de las cinco funciones umbrales en las que fue clasificado cada valor  $X_{nj}$  de entrada.
- iv. Se genera la conexión  $Z_{nj}$ :

$$Z_{nj} = |U_{nj} - (U_{nj} - Y_{nj(FLM)})| \dots (2)$$

Donde:

$Y_{nj(FLM)}$  = Es el valor de salida del modelo difuso desarrollado en el punto 4.1.1.

- v. La conexión  $Z_{nj}$  entra a una nueva capa con una neurona  $V_{nj}$  por cada variable (6 neuronas) mediante una función escalón unitario  $U(t) = 1$  cada que se cumple un periodo de tiempo "T" o es desactivada  $U(t) = 0$  mientras se cumple el siguiente periodo.

$$V_{nj} = U(t) Z_{nj} \dots (3)$$

- vi. Finalmente se calcula el ICA en la capa de salida.

$$ICA = \frac{V_{1j} W_1 + V_{2j} W_2 + V_{3j} W_3 + V_{4j} W_4 + V_{5j} W_5 + V_{6j} W_6}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6} \dots (4)$$

El modelo propuesto hasta este momento es no supervisado ya que los elementos del sistema son modificados únicamente con base en los valores de entrada de las variables, de tal forma que con esta parte del modelo solo puede aprender a categorizar las entradas y clasificarlas sin necesidad de una referencia, por lo que solo tenemos el cálculo de ICA en tiempo real sin lograr aún la predicción de variables y del propio ICA.

Dada la aleatoriedad del posible valor de las variables asociadas, es necesario complementar los modelos logrados hasta este punto ya que el modelo de inteligencia artificial aún se nota inadecuado para el problema de detectar eventos de contaminación de agua entendiéndolos como comportamientos anormales o anómalos en cada una de las variables seleccionadas a pesar de que pueden estar dentro del rango de operación establecido por la normativa mexicana y la OMS. Para lograrlo, se ha recurrido al uso de umbrales dinámicos ya que detecta valores atípicos, considerando su valor promedio que se puede ir actualizando con datos de tiempo real.

#### 4.1.3. Modelado con umbrales dinámicos

---

Dado que una condición importante de este modelo es tener valores en tiempo real, para el presente estudio se ha considerado generar datos de las variables en intervalos cinco minútales y a su vez, se contempló hacer 4 series de datos a lo largo del día de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 9. Horarios para generar series de datos en intervalos de cinco minutos (Autor).

No. de Serie	Intervalo de horario
1	00:00 - 06:00 horas
2	06:00 - 12:00 horas
3	12:00 - 18:00 horas
4	18:00 – 24:00 horas

De acuerdo con la Tabla 9, se procedió a calcular la cantidad de datos cincominutales que se generan por cada variable en cada serie con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{No. de valores por variable en cada serie} &= \frac{6 \text{ horas} \times 60 \text{ minutos/hora}}{5 \text{ minutos}} \\ &= 72 \text{ valores ... (5)} \end{aligned}$$

En el presente estudio, para complementar la detección de comportamientos anómalos o atípicos se ha desarrollado también un modelo de umbrales dinámicos que se actualiza cada que se tome una nueva serie de datos en tiempo real. El hecho de utilizar umbrales en cada variable asociada al modelo, es con la finalidad de definir el nivel de entrada en que debería empezar cada variable  $X_i$  cada que se genera una nueva serie de datos.

Al principio, el umbral en cada variable de entrada comienza por los mínimos y máximos valores que puede tomar de acuerdo a la naturaleza del universo de discurso; sin embargo, a medida que se vayan generando más series de datos y bajo condiciones normales de operación del punto de distribución de agua a evaluar, dichos umbrales tienden a reducirse significativamente y entonces es posible detectar comportamientos anómalos e inclusive predecir los futuros valores mínimos máximos y promedio de cada valor  $X_i$  e inclusive el mismo ICA para las siguientes seis horas y así detectar las variables cada que se salgan de los umbrales dinámicos, aunque puedan estar dentro de los rangos establecidos por la OMS y la normativa mexicana.

En las figuras 6, 7, 8 y 9, se describe en bloques el funcionamiento del modelo de umbrales propuesto.

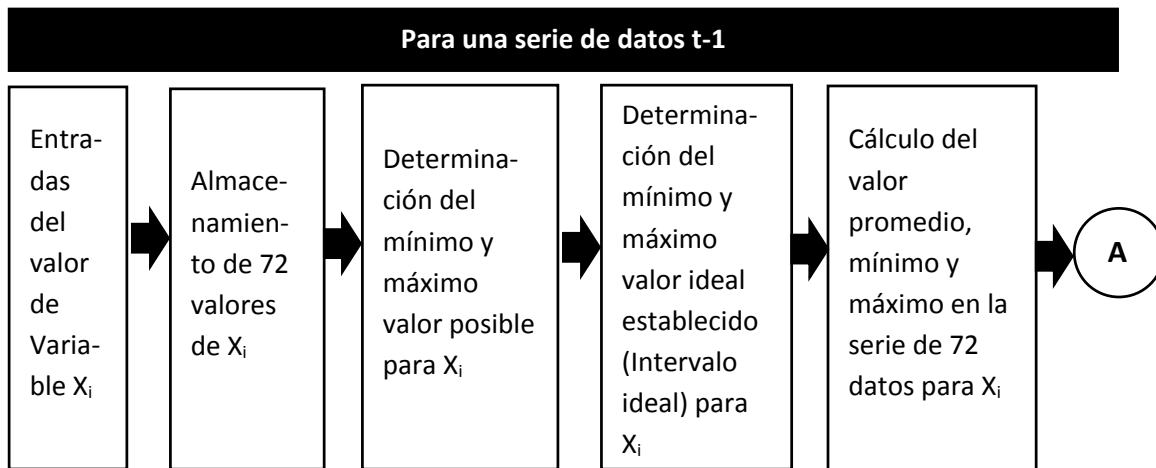


Figura 6. Parte 1 del diagrama de bloques de funcionamiento del modelo de umbrales dinámicos (Autor).

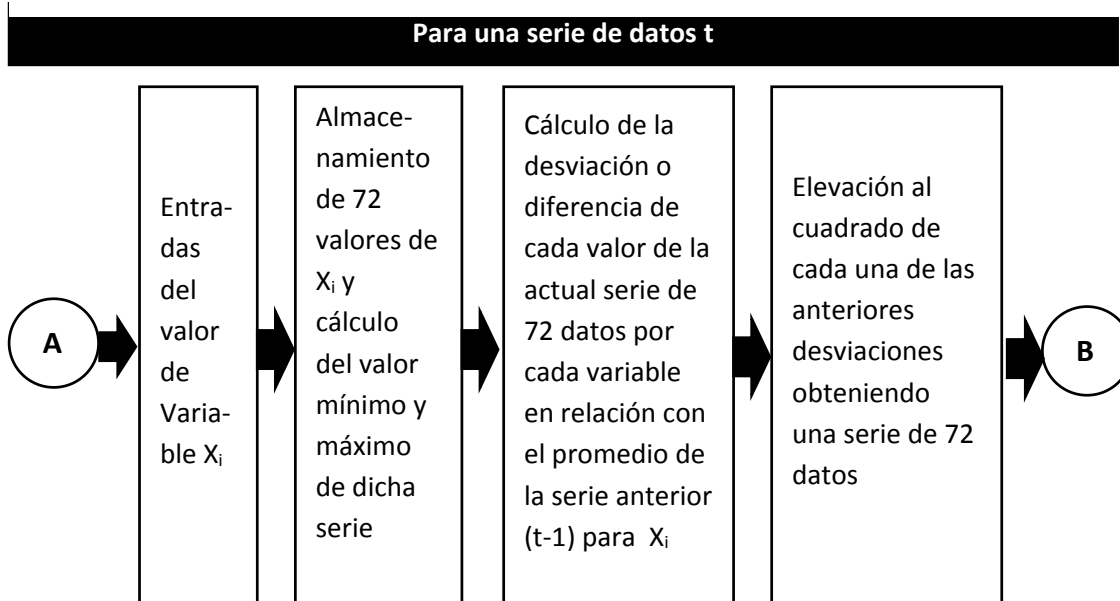


Figura 7. Parte 2 del diagrama de bloques de funcionamiento del modelo de umbrales dinámicos (Autor).

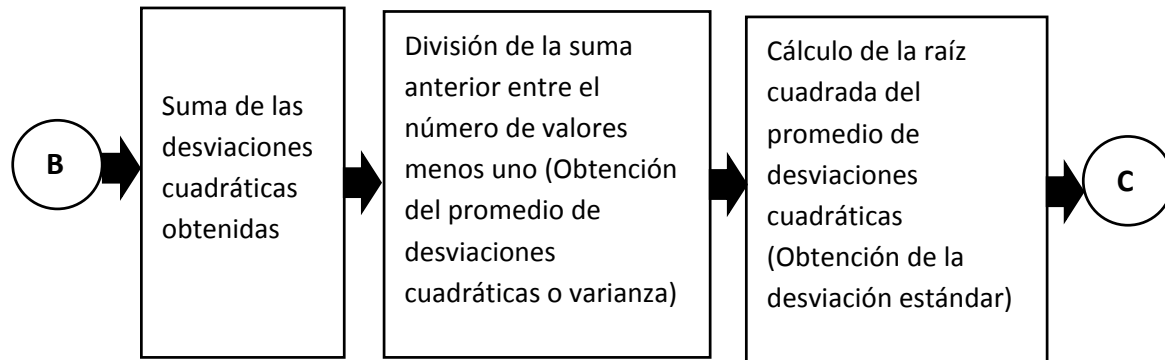


Figura 8. Parte 3 del diagrama de bloques de funcionamiento del modelo de umbrales dinámicos (Autor).

**Predicción de datos y detección de eventos anómalos para una serie  $t$  y  $t+1$**

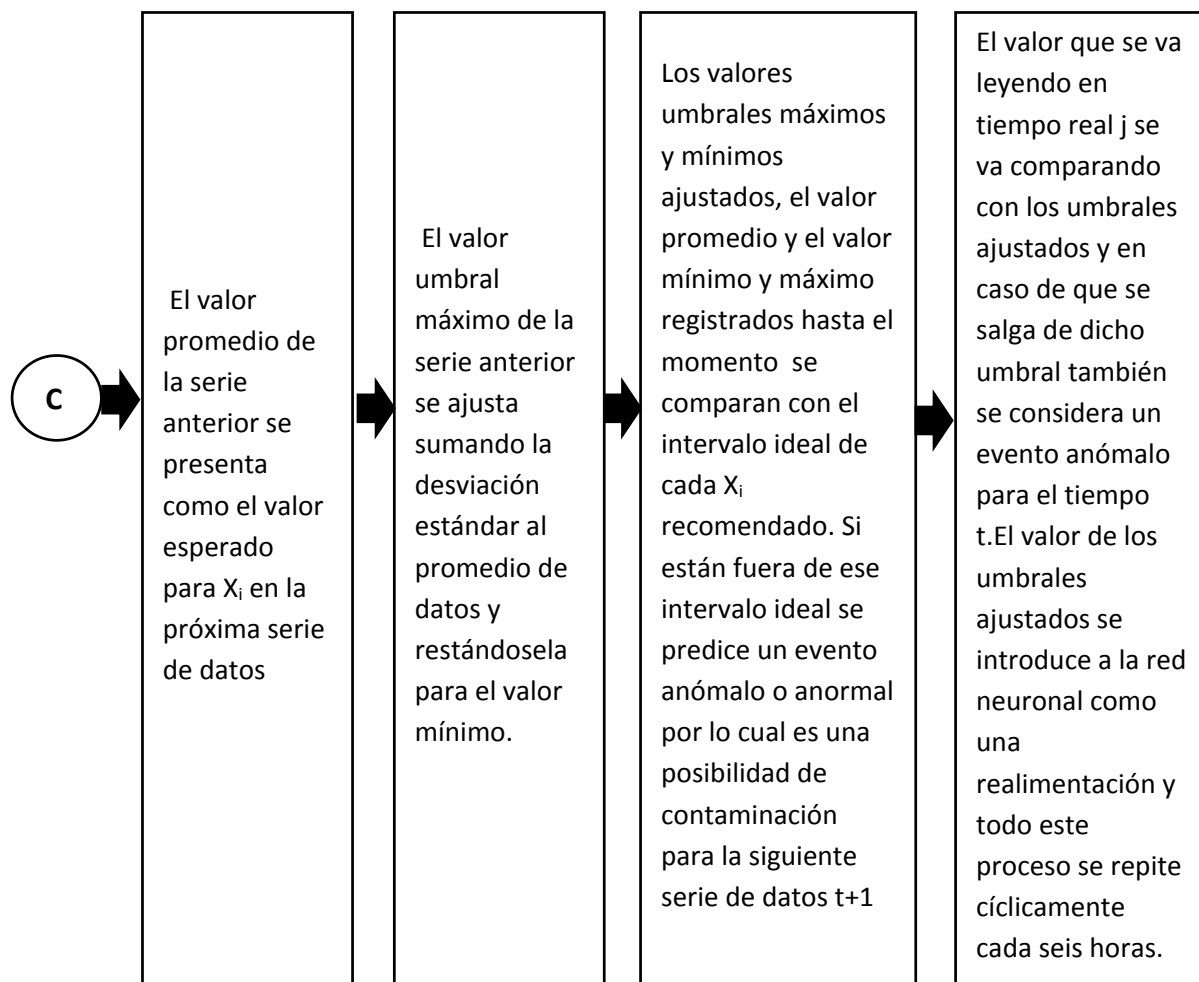


Figura. 9 Parte 4 del diagrama de bloques de funcionamiento del modelo de umbrales dinámicos (Autor).

Para comprender aún mejor las figuras. 6, 7, 8 y 9, a continuación se detallan los elementos principales del modelo umbral.



---

Serie de datos: El modelo está diseñado para funcionar con base en una serie de 72 datos para cada variable de intervalos cincominutales que se irán actualizando en horarios definidos para 4 series de datos por día de acuerdo a lo estipulado en la tabla 9.

Valor promedio de predicción: En cada serie de datos de cada variable, el modelo debe calcular el promedio con la ecuación:

$$X_i prom_{(t)} = \frac{\sum_{j=1}^{72} X_{ij(t-1)}}{72} \dots (6)$$

Este promedio es el valor posible para la siguiente serie de datos t y se considera el valor de predicción para las siguientes seis horas.

Máximo y mínimo valor inicial: Inicialmente el modelo toma como límites máximos y mínimos los valores del intervalo de entrada de cada variable y después de la primera serie de tiempo, dicho valor se va actualizando continuamente. Así, el valor máximo y mínimo posible para una serie de datos (t) toma los mínimos y máximos de la serie de datos que le anteceden y se pueden describir como sigue:

$$Valor\ máximo\ esperado_{(t)} = Máximo_{(t-1)} \dots (7)$$

$$Valor\ mínimo\ esperado_{(t)} = Mínimo_{(t-1)} \dots (8)$$

Estos valores simplemente sirven para reducir el universo de discurso de la variable y tener la referencia de cuáles son los valores mínimos y máximos que ha tomado la variable a lo largo de la serie de datos.

Máximo y mínimo valor ideal: Este valor representa el intervalo ideal definido en el modelo de lógica difusa y son los valores dentro de los cuales las variables tienen un valor recomendable. Este intervalo se ha utilizado como valor de comparación con los umbrales dinámicos para conocer si las variables se encuentran fuera o dentro del intervalo deseado y sus valores se mantienen constantes. El motivo por el cual está considerado es debido a que los umbrales dinámicos superior e inferior son comparados con dichos intervalos y cuando se encuentran fuera de ellos es un indicador inmediato de que existe un evento de contaminación de agua para la siguiente serie de datos (t+1).

$$Máximo\ ideal_{(t+1)} = Valor\ máximo\ del\ intervalo\ ideal\ para\ cada\ X_i = Constante \dots (9)$$

$$Mínimo\ ideal_{(t+1)} = Valor\ mínimo\ del\ intervalo\ ideal\ para\ cada\ X_i = Constante \dots (10)$$

Valor umbral superior e inferior: Hasta este momento la ANN construida no tiene un sistema de autoaprendizaje para lograr una predicción de variables más exacta, por lo que se ha elegido desarrollar este modelo para poder predecir los posibles valores

---

que puede tomar cada variable y al mismo tiempo predecir y detectar eventos anómalos o atípicos que representen una alteración a la calidad del agua.

Con la ecuación (6) se calcula el promedio de la serie anterior t-1 y posteriormente se calcula la desviación o diferencia de cada valor en relación con el promedio de la serie; es decir se tiene una serie de valores:

$$(X_{ij(t)} - X_{iprom(t)}) \dots (11)$$

Cada elemento de la serie obtenida se eleva al cuadrado:

$$(X_{ij(t)} - X_{iprom(t)})^2 \dots (12)$$

En seguida, se efectúa la sumatoria de desviaciones cuadráticas obtenida; es decir se obtiene el valor:

$$\sum_{j=1}^{72} (X_{ij(t)} - X_{iprom(t)})^2 \dots (13)$$

Después de obtener la ecuación (13), se divide la suma anterior entre el número de valores menos uno; que equivale a obtener el promedio de desviaciones cuadráticas o varianza.

$$s^2 = \frac{\sum_{j=1}^{72} (X_{ij(t)} - X_{iprom(t)})^2}{71} \dots (14)$$

Y finalmente se obtiene la desviación estándar calculando la raíz cuadrada de  $s^2$ :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{72} (X_{ij(t)} - X_{iprom(t)})^2}{71}} \dots (15)$$

Para definir los umbrales se ha tomado en cuenta que la desviación estándar es una medida de dispersión de los datos, cuanto mayor sea la dispersión mayor es la desviación estándar, si no hubiera ninguna variación en los datos, es decir, si fueran todos iguales, la desviación estándar sería cero.

$$\text{Valor umbral superior}_{(t+1)} = X_{iprom(t)} + s \dots (16)$$

$$\text{Valor umbral inferior}_{(t+1)} = X_{iprom(t)} - s \dots (17)$$

Entonces para la siguiente serie de datos  $t+1$  que le sucede a la serie  $t$ , las variables que determinan la calidad del agua sin eventos anómalos o de contaminación deberán presentar un valor promedio igual al obtenido con la ecuación (6) y dentro del intervalo ideal para todas las  $X_i$ . Este valor de predicción sin embargo puede ser más grande o más pequeño, por lo cual además de los valores mínimos y máximos (ecuaciones 7 y 8) se han definido la predicción de un umbral superior y un umbral inferior posibles y se comparan con los intervalos ideales. Mientras:

*El valor umbral superior sea  $< \acute{o} = \text{Máximo ideal}_{(t+1)}$ ; y*

*El umbral mínimo sea  $> \acute{o} = \text{Mínimo ideal}_{(t+1)}$*

Para todas y cada una de las variables  $X_i$ , se tiene una predicción de agua sin contaminación para las siguientes seis horas. De lo contrario, según los valores obtenidos se tiene un ICA diferente a 1 para las siguientes seis horas.

Es importante mencionar que el modelo propone que estos umbrales se han de ir actualizando cada seis horas y una vez llegado el tiempo de la siguiente predicción se van comparando con los datos que se van obteniendo en tiempo real cada cinco minutos. Si algún valor de la medición de tiempo real se sale de dichos umbrales a pesar de que pueda estar dentro del intervalo ideal, entonces se considera una condición anómala de intrusión de alguna sustancia o forma contaminante y es necesario poner atención a identificar la posible causa.

En la figura 10, se observa como es la función de umbrales generados cuando se espera un comportamiento sin anomalías en calidad de agua para cada variable en cada serie de datos de acuerdo a lo explicado.

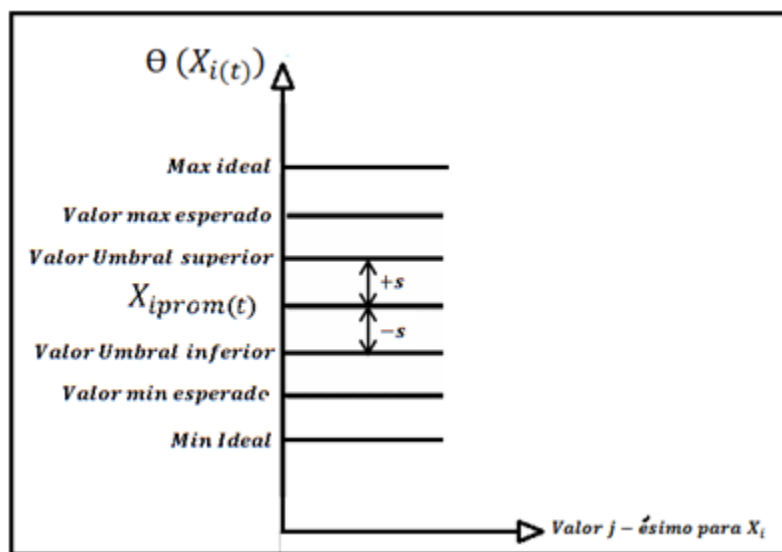


Figura 10. Representación gráfica del modelo de umbrales dinámicos desarrollado (Autor).

Así entonces al introducirle el modelo de umbrales descrito, la red neuronal queda reestructurada como se muestra en la figura 11:

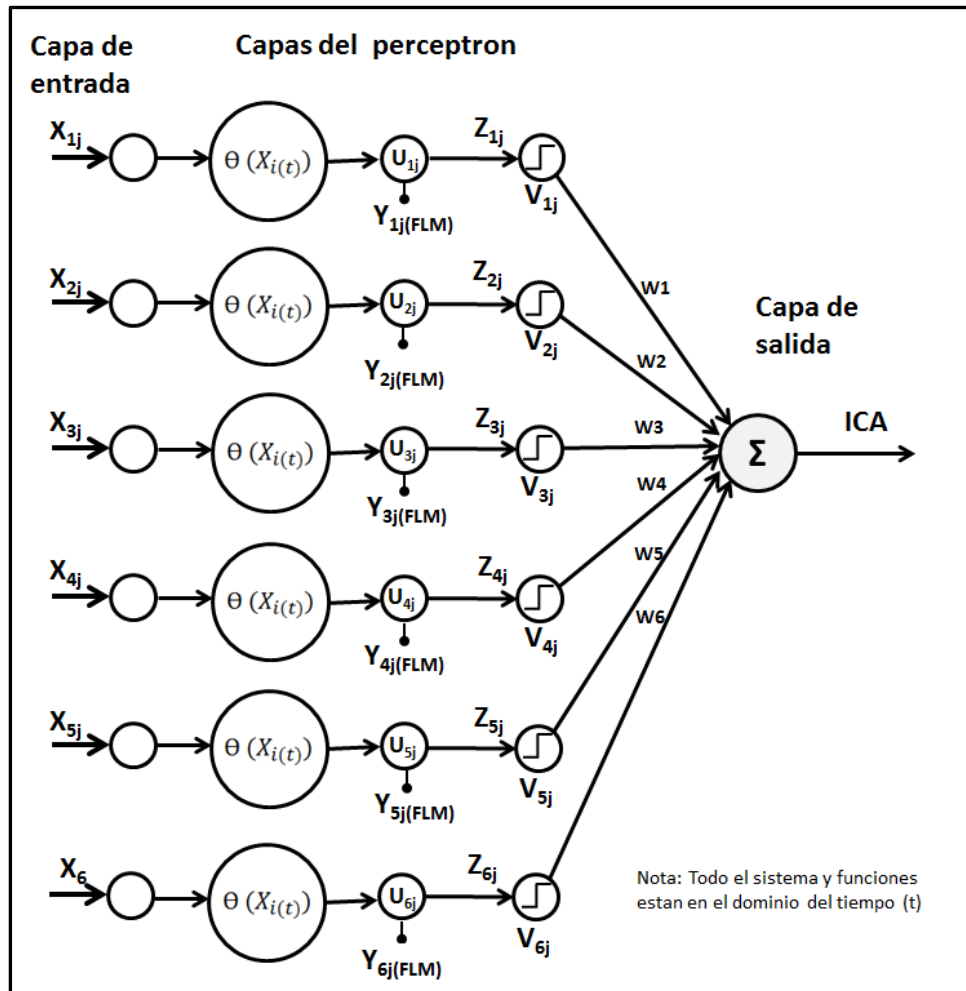


Figura 11. Modelo de red neuronal multicapa desarrollado incluyendo una función de umbrales dinámicos (Autor).

Con éste modelo es posible la predicción de variables y eventos de contaminación de agua calculando el índice de calidad de agua y tomando en cuenta el almacenamiento de datos históricos que se van tomando en tiempo real.

De acuerdo a lo explicado y la figura 11, se observa que la segunda capa es la que permite entrenar a la red neuronal para su autoaprendizaje mediante la función de umbrales dinámicos generados y todo lo demás funciona exactamente igual que la red descrita en la figura 5 descrita con anterioridad.

#### 4.1.4. Pruebas del modelo

---

Comprendiendo el modelo de inteligencia artificial, lo podemos resumir a tres bloques importantes:

El primero, mediante lógica difusa, permite detectar en tiempo real cuando una de las variables que definen al ICA se encuentra fuera de los rangos ideales que ha sido capaz de proporcionar una posible causa o alarmas de estatus actual para cada variable con las etiquetas lingüísticas asociadas y al mismo tiempo le asigna una “calificación” a cada variable que oscila entre 0 y 1 (valor difuso numérico) dependiendo de qué tan lejos o cerca se encuentre del rango ideal gracias a la base de conocimiento generada mediante las reglas difusas que se han resumido en las tablas 1- 7.

El segundo bloque consiste en una red neuronal artificial multicapa que básicamente lo que hace es tomar el valor de cada variable en tiempo real, la somete a una evaluación mediante 5 funciones de umbral fijo y entrega en esa capa un valor de salida para cada  $X_i$  que oscila entre 0 y 1 dependiendo de la misma base de conocimiento generada en el FLM y que posteriormente este valor es multiplicado por un peso sináptico asignado.

Siendo el pH, la variable con el mayor peso sináptico ya que es un indicador que fácilmente brinda información de intrusión de otras sustancias al agua, y finalmente mediante una expresión matemática es calculado el ICA que como resultado es un valor entre 0 y 1, (entre más cerca del cero se encuentre significa que el agua está más contaminada), capaz de asignar una etiqueta lingüística que lo interpreta como lo haría un ser humano indicando si el sistema de distribución de agua a evaluar se encuentra en los términos de sin contaminación, baja contaminación, media contaminación, con contaminación o alta contaminación. Este proceso se repite cada que el sistema tiene un nuevo valor de entrada para las  $X_i$  (ha propuesto hacerlo cada cinco minutos).

El tercer bloque consiste en dotar de la capacidad de autoaprendizaje a la ANN multicapa mediante una función diseñada con umbrales dinámicos y de esta forma es posible predecir cada seis horas los valores mínimos, máximos, promedio y sobre todo los umbrales dinámicos inferior y superior que puede tomar cada variable en la siguiente serie de 72 valores cincominutales.

Una vez que calcula la predicción de dichos valores, también lo va comparando con el valor medido en tiempo real. Para el caso de la predicción, cada que cualquiera de los umbrales dinámicos inferior y superior o el valor promedio se sale de los rangos ideales se considera un evento anormal detectado y a su vez cuando se compara con el valor medido en tiempo real y este se sale de los umbrales dinámicos inferior y superior previamente calculado también es considerado como

un evento atípico y entonces se tiene un evento de contaminación detectado. Con el mismo bloque de la lógica difusa desarrollado se tienen cada seis horas las etiquetas lingüísticas para cada variable y finalmente la predicción de un cálculo posible para el ICA prediciendo la expectativa de que tan contaminada puede estar el agua y cuyo valor de predicción se actualiza cada seis horas.

En términos generales, así es como se ha logrado el modelo de monitoreo en intervalos cincominutales y predicción de variables en periodos de seis horas que determinan el ICA en tiempo real y el propio valor del ICA construido, con lo cual es posible detectar eventos de contaminación de agua con las posibles causas que corresponden a las etiquetas lingüísticas introducidas en la base de conocimiento del bloque de modelado con lógica difusa.

El modelo antes descrito se ha programado en un software en la plataforma de LabView por su facilidad de programación en lenguaje tipo G y debido a que es un software especializado en sistemas de adquisición de datos, y al momento es posible simular generando valores aleatorios para todas las variables  $X_i$ , lo cual resulta viable para verificar que la parte de lógica difusa y el cálculo del ICA con la red neuronal funciona adecuadamente.

A continuación, se describen los resultados obtenidos:

Tabla 10. Resultados para las variables generadas aleatoriamente en el software de simulación (Autor).

$X_i$	Valor simulado	Estatus general	Valor lingüístico difuso	Valor difuso numérico $X_i$	Peso sináptico	$X_i W_i$
<b>pH</b>	11	Fuera de rango ideal	Base	0.5	0.5	0.25
<b>Temperatura</b>	17.12	Fuera de rango ideal	Temperatura aceptable	0.75	0.1	0.075
<b>Turbidez</b>	3.3	Dentro de rango ideal	Turbidez ideal	1	0.1	0.1
<b>Oxígeno disuelto</b>	3.6	Fuera de rango ideal	Baja posibilidad de contaminación orgánica	0.75	0.1	0.075
<b>Conductividad eléctrica</b>	1.4	Fuera de rango ideal	Alta posibilidad de presencia de sales, descargas tóxicas u otra fuente de contaminación	0.25	0.1	0.025

<b>Cloro residual libre</b>	2.2	Fuera de rango ideal	Bajo nivel de exceso de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso	0.75	0.1	0.075
ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA			<b>Medio contaminada</b>	<b>ICA</b>		0.60

Se han ejecutado diversas simulaciones con éxito, y se describe en la Tabla 10 un ejemplo de los resultados obtenidos en una de las 144 simulaciones realizadas. Para el caso de la variable pH se ha obtenido de forma aleatoria un valor igual a 11 que se encuentra fuera del intervalo ideal y el modelo nos indica que el agua tiene presencia de una base, lo cual implica que tenga un valor numérico difuso de 0.25.

La temperatura simulada de 17.12 corresponde a una temperatura aceptable pero fuera del intervalo ideal por lo cual su valor numérico difuso es de 0.75. En el caso de una turbidez de 3.3 se encuentra dentro del rango de turbidez ideal y entonces su valor difuso numérico es de 1. El oxígeno disuelto fuera del intervalo ideal ha sido de 3.6 lo cual indica una baja posibilidad de contaminación orgánica y un valor difuso de 0.75.

En lo que respecta a la conductividad eléctrica, se tuvo una alta posibilidad de presencia de sales, descargas tóxicas u otra fuente de contaminación y con un valor de 1.4 se encuentra fuera del rango ideal. De igual forma el cloro residual libre presenta un valor de 2.2 fuera del rango ideal y un valor difuso de 0.75 que muestra un bajo nivel de exceso de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso. Con este mismo ejemplo se muestra cómo funciona la ANN hasta antes de agregarle el autoaprendizaje en la figura 12.

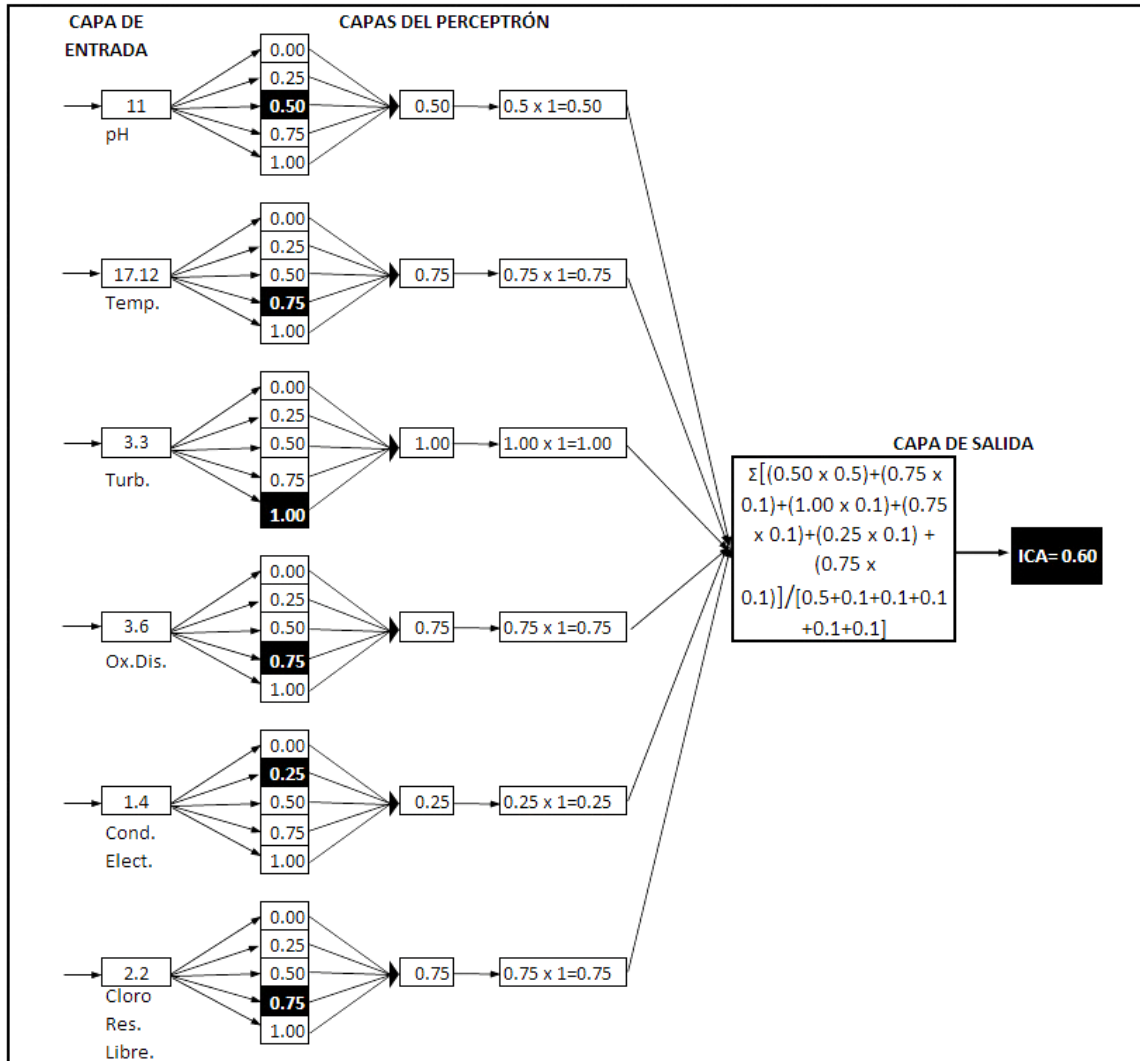


Figura 12. Prueba de funcionamiento de la ANN multicapa (Autor).

Se ha verificado que la neurona funciona adecuadamente con 144 pruebas realizadas mediante la simulación en el software desarrollado en plataforma LabView. De acuerdo al ejemplo, se ha observado que en la capa de entrada se tienen los valores generados de forma aleatoria para cada variable y una vez que ha sido evaluado en 5 funciones umbrales por cada variable, activa la que corresponda según los intervalos introducidos en esa capa.

Así la conductividad eléctrica ha activado un valor de salida de 0.25, el pH una salida de 0.5, mientras que el cloro residual libre, el oxígeno disuelto y la temperatura de 0.75 y la turbidez tuvo un valor dentro del intervalo ideal de 1. En la siguiente capa se tiene un escalón unitario que se activa cada cinco minutos y su salida es multiplicada por los pesos sinápticos definidos para cada variable. Finalmente se conectan las seis señales a una neurona encargada de calcular el índice de calidad



---

de agua que para este escenario es de 0.6 e indica una mediana contaminación en términos lingüísticos.

Cada resultado obtenido en simulaciones realizadas se ha comparado directamente con la base de conocimiento introducida al modelo logrando con éxito 144 resultados acertados de las 144 simulaciones realizadas.

La siguiente parte que se ha probado es el bloque de umbrales dinámicos propuesto. Como se mencionó anteriormente se hizo con ayuda de Microsoft Excel con seis series de 72 datos obtenidas para dos variables.

Aunque también se incluyó en el software programado, para probar la parte del modelo de umbrales dinámicos con valores aleatorios resultaría poco útil, por lo cual se han utilizado series de datos para dos variables que son el pH y temperatura de mediciones hechas con estaciones instaladas en diversos puntos de ríos que son la fuente de suministro de agua en el sistema de distribución del Estado de Selangor, Malasia, dichos datos han sido proporcionados por el “Department of Irrigation and Drainage Malaysia of the Ministry of Natural Resources and Environment”. Para cada variable se tomaron seis series de 72 datos.

Desafortunadamente no se tienen datos para todas las variables seleccionadas, sin embargo, dado que el pH ha sido considerado como valor centinela y que la temperatura es una variable con una dinámica que no solo depende de la posible intrusión de otras sustancias o descargas térmicas al agua, sino también de la temperatura ambiente, ambas variables se consideran suficientes para probar el modelo en la parte del autoaprendizaje de la red neuronal propuesta con ayuda de Excel.

De hecho, si el modelo funciona con estas dos variables, implica que el modelo funciona con las demás dado que su algoritmo es exactamente el mismo y no solo para estas variables sino para cualquier otra señal física que provenga del mundo real.

Tal como se muestra en la figura13, en el primer periodo para el pH se tiene un universo de discurso muy amplio; a pesar de ello, los valores que se tuvieron para esa primera serie, oscilaron dentro del intervalo ideal.

En el segundo periodo T2, aún no es posible reducir el universo de discurso y los umbrales dinámicos inferior y superior no se han ajustado, sin embargo el valor mínimo y máximo junto con el valor promedio brindaron una tendencia exitosa de datos esperados dentro del intervalo ideal, lo cual en la mayoría de puntos se cumplió detectando solo tres puntos de comportamiento anómalo, ya que se encuentran fuera de dicho intervalo, pero los datos sí se mantuvieron oscilando

---

también dentro de los valores mínimos, máximos y promedio. Cuando se tuvieron datos fuera de intervalo ideal, en ese periodo T2, en seguida se estabilizaron dentro del rango ideal.

Para el periodo T3 de predicción se han reajustado los umbrales dinámicos inferior y superior, los valores mínimos, máximos y promedio y una vez que se introducen los valores del tiempo presente para T3, se observa una predicción exitosa al mantener los valores dentro de los umbrales inferior y superior calculados, se tienen algunos puntos fuera de este umbral pero que caen dentro de mínimo y máximo en su mayoría y del mismo intervalo ideal y se detectan algunos puntos anómalos que son la causa del reajuste de umbrales para la siguiente serie donde observamos que se esperan valores cercanos al valor mínimo del intervalo ideal.

Se cumplen los valores máximos y mínimos esperados con éxito y se observan cinco datos fuera de los umbrales inferior y superior de predicción y de los cuales tres están fuera del intervalo ideal pero dentro de los máximos y mínimos esperados por lo cual se ha considerado exitosa la predicción.

Para los siguientes dos periodos se reajustan los umbrales dinámicos mínimos, máximos, promedio, inferior y superior con éxito y se ha observado que se reduce la diferencia entre dichos umbrales lo cual indica que la dinámica de esa variable se ha estabilizado, sin embargo, en el periodo T6 se tiene un valor máximo totalmente fuera de los umbrales de predicción, por lo cual para la siguiente predicción de valor T7 se tiene un incremento en dicha diferencia que solo se ha quedado en predicción ya que no se tienen más datos.

Se ha verificado con éxito que el modelo propuesto funciona correctamente, sin dejar de mencionar que la variación de pH es un fenómeno totalmente dinámico y su dinámica dependerá del tipo de sustancia intrusa que pueda contener el agua, por lo cual la predicción nos brinda la posibilidad de conocer la tendencia de intrusión.

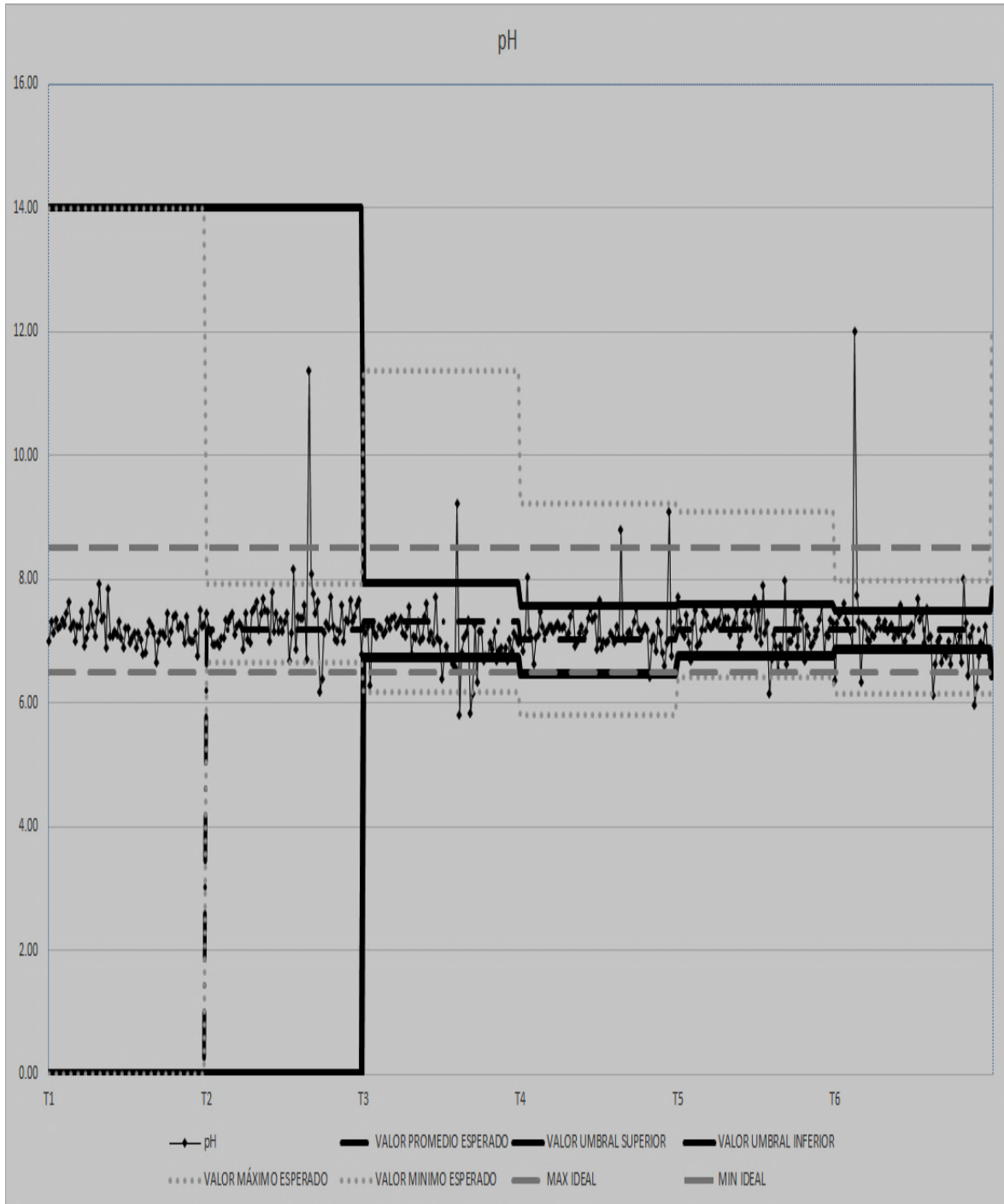
En este caso se observa que después del periodo T2 en cada serie se tienen valores máximos y mínimos repentinos y dado que en todos los periodos se tienen comportamientos similares, este resultado puede ser asociado a descargas de sustancias de forma intermitente y el modelo puede ayudar a detectarlo si se tuvieran sensores instalados capaces de generar más datos y de ser sometidos al modelo desarrollado en el presente trabajo de investigación.

Las series de valores de pH utilizadas, contienen datos que se mantienen dentro de un comportamiento similar entre una serie y otra, a diferencia de que se tuvieran datos de un agua que es sometida constantemente a descargas o intrusión de sustancias contaminantes ya que se tendrían reajustes de umbrales dinámicos que

---

arrojarían rangos totalmente distintos entre una predicción y otra, pero en general, si el agua no tiene eventos de contaminación su pH debe mantenerse constante dentro del intervalo ideal esperado, por lo que se demuestra con esta variable que el modelo propuesto funciona correctamente.

Se muestra a continuación la gráfica del resultado obtenido de autoaprendizaje y predicción de pH con el modelo de umbrales dinámicos desarrollado.



**Figura 13. Gráfica de autoaprendizaje y predicción de pH con umbrales dinámicos (Autor).**

En la figura 14 mostrada más adelante, en el primer periodo T1 para la temperatura se tiene un universo de discurso muy amplio que va de 0 a 100 (aunque se ha

---

recortado la gráfica para una mejor visualización de los siguientes periodos), a pesar de ello los valores que se tuvieron para esa primera serie, oscilaron dentro de un intervalo de 24 y 33 que implica que han coincidido en valores fuera del intervalo ideal.

En T1 no se presentaron valores de temperatura en donde se tiene la posibilidad de riesgos altos de formación de coliformes, aunque los resultados fuera del intervalo ideal se pueden asociar a una descarga térmica o bien un efecto debido a la temperatura ambiente.

En el segundo periodo T2 aún no es posible reducir el universo de discurso y los umbrales dinámicos inferior y superior no se han ajustado, siendo el valor mínimo y máximo junto con el valor promedio los que han brindado una tendencia exitosa de datos esperados dentro de ese intervalo de operación detectando dos puntos anómalos en la operación, ya que se encuentran fuera del valor mínimo y máximo esperado, pero los datos sí se mantuvieron oscilando también dentro de los valores mínimos, máximos y promedio a pesar de que se encuentran fuera de intervalo ideal y con eso nos indica que esta variable no tendrá como resultado un valor ideal por lo cual se espera un ICA diferente de 1.

Cuando se tuvieron dos datos fuera del intervalo esperado, en ese periodo T2, en seguida se estabilizaron dentro del rango de operación de la predicción. Para el periodo T3 de predicción se han reajustado los umbrales dinámicos inferior y superior, los valores mínimos, máximos y promedio.

Una vez que se introducen los valores del tiempo presente para T3, se observa una predicción exitosa al mantener los valores dentro de los umbrales calculados aunque la variable ha operado muchas veces fuera de los umbrales inferior y superior de predicción, y estos puntos fuera de dichos umbrales finamente operan dentro del mínimo y máximo en su mayoría y se detecta un punto anómalo que es la causa principal del reajuste de umbrales

Para la siguiente serie observamos que el universo de discurso se ha modificado con respecto a T3 teniendo valores más alejados al valor mínimo del intervalo ideal y a pesar de ello, en general en T4 se esperan datos dentro de un rango de operación similar a los pasados.

En T4, se cumplen los valores máximos y mínimos esperados con éxito y se observan varios datos fuera de los umbrales inferior y superior de predicción y de los cuales tan solo uno se encuentra fuera del mínimo esperados por lo cual se ha considerado exitosa la predicción.

---

Para el periodo T5 nuevamente se reajustan los umbrales hacia arriba y se tienen variaciones muy significativas de los valores reales teniendo varios valores fuera del valor umbral inferior esperado pero aún dentro del valor umbral superior y todos dentro del valor máximos pero con dos puntos fuera del valor mínimo esperado.

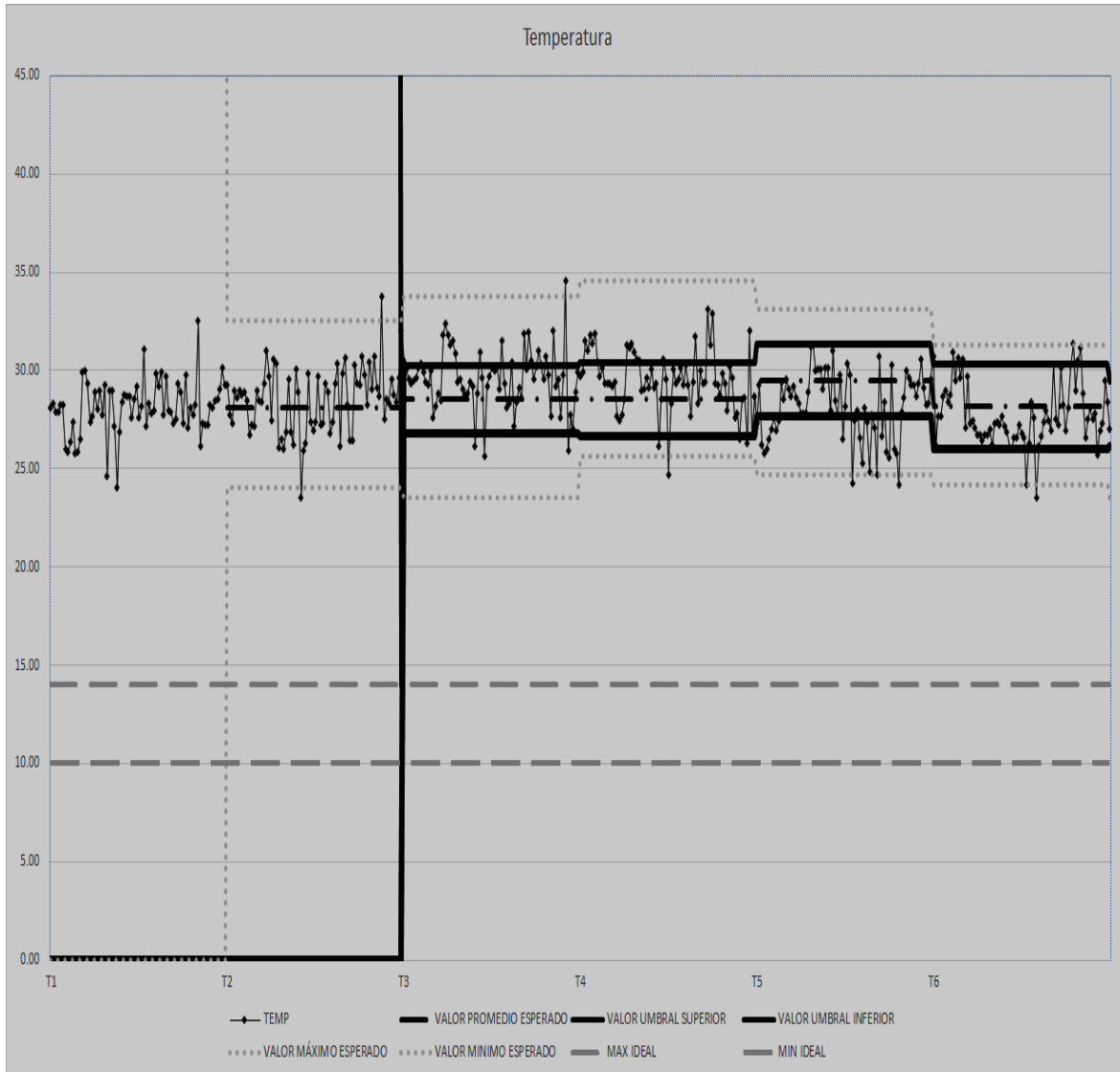
En el periodo T6 se tiene una dinámica más estable con respecto a las anteriores series ya que los datos reales caen en su mayoría dentro de los umbrales inferior y superior y dentro de los valores mínimos y máximos esperados, con tan solo un valor menor al valor mínimo esperado ya que no se tienen más datos por lo que se verifica que el modelo funciona correctamente a pesar de las importantes y notables variaciones en la temperatura.

Para estas series de datos se observa que todos sus valores cayeron fuera del intervalo ideal con oscilaciones muy notables entre un dato y otro.

Se ha verificado con éxito que el modelo propuesto funciona correctamente, sin dejar de mencionar que la variación en temperatura también es un fenómeno totalmente dinámico y su dinámica dependerá de qué sustancia intrusa pueda contener el agua, descarga térmica o bien la propia temperatura ambiente, por lo cual el modelo nos brinda la posibilidad de conocer la predicción de valores esperados con éxito.

Para estas series de datos de la variable temperatura se observa que todos sus valores cayeron fuera del intervalo ideal con oscilaciones muy notables entre un dato y otro, este resultado puede ser asociado a descargas térmicas de forma intermitente y el modelo puede ayudar a detectarlo si se tuvieran sensores instalados capaz de generar más datos y de ser sometidos al modelo desarrollado en el presente trabajo de investigación.

También dados los valores de temperatura que se tienen resulta relevante mencionar que el modelo no considera la temperatura ambiente de la región sino solamente los valores de intervalo ideal para asignar su valor numérico que aporta al valor total del ICA.



**Figura 14. Gráfica de autoaprendizaje y predicción de temperatura con umbrales dinámicos (Autor).**

Es importante subrayar que los umbrales de intervalo ideal se mantienen fijos, mientras que los umbrales de valor superior, inferior, máximo, mínimo y promedio esperados, son valores que se irán reajustando cada seis horas y dichos reajustes estarán altamente influenciados por los eventos atípicos que sucedan y por la diferencia de valores que exista entre datos.

Los umbrales fijos dependerán directamente de los valores recomendados por normativas o lineamientos para cada país por lo cual el modelo puede ser ajustado a la normativa de cada país y al rango de operación de sensores.

#### 4.2. Propuesta del sistema SCADA

---

Tras desarrollar el modelo neurodifuso, se procedió al diseño de un sistema SCADA que toma como base de funcionamiento dicho modelado y se describe a continuación la manera en que fue abordado.

Se ha diseñado un sistema de control y adquisición de datos automático, que consiste en un conjunto de seis sensores conectados mediante un acondicionamiento de señales enlazado a una tarjeta de adquisición que se comunica a través de un puerto USB a una computadora con pantalla táctil para facilitar la visualización, el funcionamiento y la interacción de la interface hombre-máquina que es un software desarrollado en plataforma LABVIEW.

El sistema es capaz de respaldar los datos adquiridos directamente en el disco duro de la PC y cuenta con la opción de subirla a la nube de internet mediante un router con tecnología Ethernet y 3G siempre y cuando se cuente con un proveedor de servicios de internet.

#### 4.2.1. Filosofía de operación

Se ha desarrollado un software y se diseñó un sistema de monitoreo automatizado que permite la detección y predicción de eventos de contaminación de agua a partir de la medición con sensores de las variables seleccionadas en tiempo real de parámetros físico químicos utilizando inteligencia artificial.

La señal física medida mediante elementos sensores se convierte en una señal de tensión eléctrica que es adaptada mediante un acondicionamiento de señales a valores estandarizados de voltaje para que pueda ser conectada a una tarjeta de adquisición de datos y que la transfiera en forma de datos mediante un cable USB al procesador de una computadora mediante software desarrollado.

Finalmente, la computadora es conectada a internet mediante un router y dado que que se programó en Labview, con gran facilidad se puede visualizar la interface desde una página web, siempre y cuando el software desarrollado junto con el Labview, estén instalados en el dispositivo de visualización remota desde cualquier dispositivo móvil con acceso al software y conexión a internet. El software se probó mediante un alojamiento en una web que ha permitido una visualización remota. Los datos se van guardando continuamente en el disco duro de la lap top de campo para en caso de falla del sistema.

En las recomendaciones se hace hincapié en que se requiere el diseño de un sistema de alojamiento y procesamiento de datos más robusto, como trabajos adicionales



---

## 4.2.2. Diseño del sistema

Se llevó a cabo el diseño del sistema, partiendo de la filosofía de operación se hizo un bosquejo del dispositivo deseado y generando un concepto de diseño basado en especificaciones y el planteamiento de las funciones necesarias para su funcionamiento. Considerando una evaluación de tres conceptos de diseño y las etapas anteriores, se generó una carta morfológica en la que posteriormente se evaluaron los tres conceptos de diseño mediante variables asignadas para cada dispositivo que es capaz de cumplir una función para tener el mejor concepto de diseño. Posteriormente se seleccionaron los dispositivos más idóneos de acuerdo a dicha evaluación y finalmente se determinaron los costos asociados.

### 4.2.2.1. Ingeniería Básica

Para el funcionamiento del sistema deseado se requieren conectar seis sensores a una tarjeta de adquisición de datos para seis variables que son: pH, temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y cloro residual libre. La tarjeta se conecta a una computadora que se conecta a internet y permite monitorear las variables y alarmas en tiempo real desde una página web en algún dispositivo que cuente con el software desarrollado.

#### 4.2.2.1.1. Bosquejo

Se presenta a continuación el bosquejo realizado en 3D para comenzar a hacer el diseño del sistema.

Partiendo de que en ocasiones los acuíferos tipo libre y en medio granular (pozos de agua potable) están instalados en zonas aisladas donde es difícil hallar suministro de energía eléctrica o que pueden existir fallas eléctricas por parte de la red de Comisión Federal de Electricidad, se recomienda agregarle un sistema de energía fotovoltaica el cual podrá ser dimensionado a futuro ya que no se ha definido como un alcance de la presente tesis además de que el sistema pueda trabajar con energía convencional (figura 15).

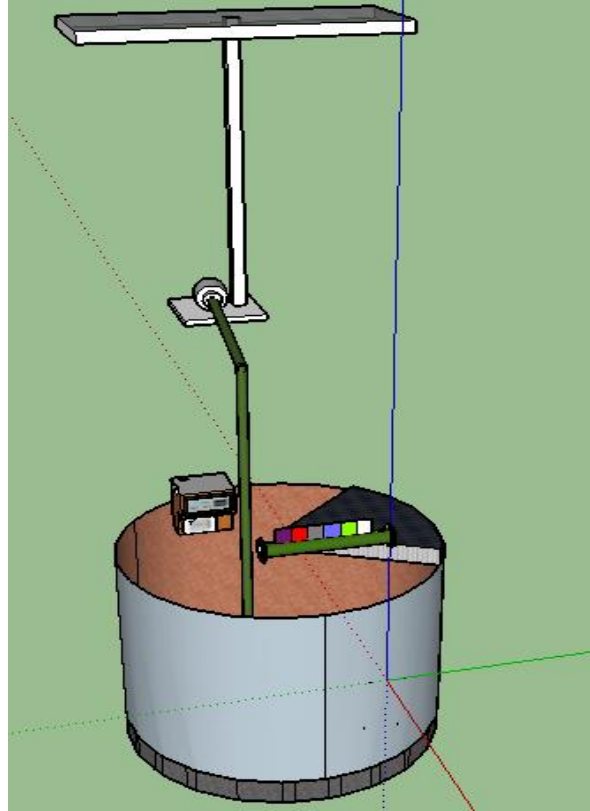


Figura 15. Bosquejo general en 3D del sistema deseado (VISTA 1) (Autor).

A su vez, se ha propuesto contar con un gabinete de tamaño pequeño que pueda empotrarse o fijarse en campo, transportarse y conectarse fácilmente mecánica y eléctricamente a cualquier acuífero tipo libre y en medio granular (figuras16 y 17).

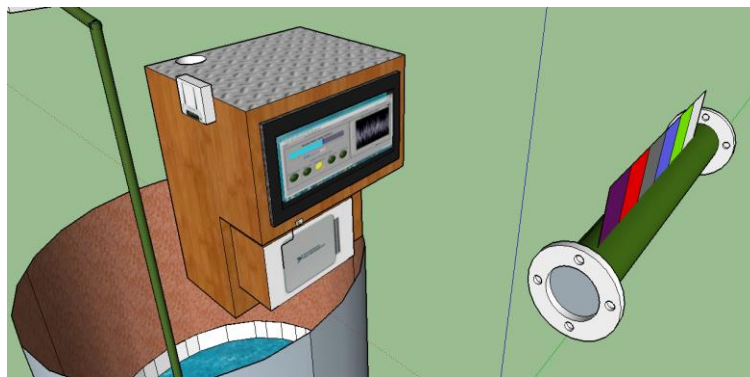


Figura 16. Bosquejo general en 3D del sistema deseado (VISTA 2) (Autor).

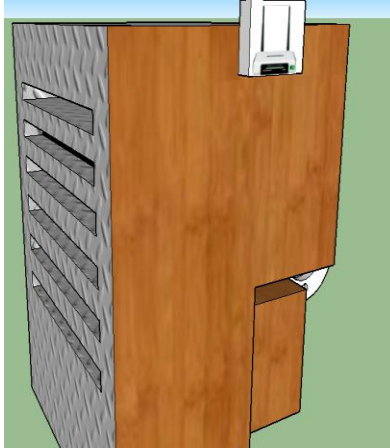


Figura 17. Bosquejo general en 3D del sistema deseado (VISTA 3) (Autor).

La idea principal consiste en tener un gabinete compacto con ventilación adecuada dentro del cual se aloje el sistema de visualización y adquisición de datos, que permita la conexión de los seis sensores y en casos viables, se lleve a cabo la conexión a internet para poder monitorear los datos desde cualquier punto con acceso al software desarrollado desde una nube de internet.

El sistema fotovoltaico no está contemplado en el presente trabajo y el gabinete no debe alojar diferentes dispositivos al sistema de adquisición de datos.

#### 4.2.2.2. Ingeniería Conceptual

Se generaron tres conceptos de diseño hasta determinar el mejor concepto de acuerdo con las funciones, especificaciones y variables de evaluación requeridas para el buen funcionamiento del sistema.

##### 4.2.2.2.1. Especificaciones de desempeño

Las especificaciones de desempeño deseadas se enuncian en la siguiente Tabla 11:

Tabla 11. Especificaciones de desempeño deseadas para el sistema (Autor).

No.	ESPECIFICACIONES
1	Alimentación eléctrica con energía solar y de red convencional
2	Escalable
3	Flexible
4	Compacto (Tamaño máximo deseado 75x50x75 cm)
5	Mínimo costo posible
6	Compatible con protocolo Ethernet
7	Garantía de calidad de elementos que lo integren

No.	ESPECIFICACIONES
8	Contar con memoria de respaldo de al menos 2 MB para guardar en campo lo equivalente a cinco días para casos de falla
9	Capacidad de 99.75 MB para almacenamiento anual de datos.
10	Las salidas de sensores deberán tener salida estándar de corriente o voltaje o en su defecto deberán poder acoplarse con arreglos de resistencias.
11	Interfaz con ambiente totalmente gráfico para el usuario
12	El intervalo de mediciones será cincominutal
13	La adquisición de datos se hará en tiempo real
14	El periodo de predicción deberá ser de seis horas
15	Capacidad de enlace de datos a la nube de internet
16	Los sensores deben contar con la máxima precisión posible
17	Cumplimiento de rango adecuado para cada variable

#### 4.2.2.2.2. Diagrama de funciones por tiempos, generación y evaluación de conceptos

Primeramente, se realizó una tabla con todas las acciones principales requeridas para el funcionamiento del sistema (Tabla 12) y se identificó en qué orden cronológico deben suceder.

**Tabla 12. Acciones principales requeridas para el funcionamiento del sistema (Autor).**

No.	FUNCIONES
0	Suministrar energía
1	Conectar a internet
2	Ejecutar programa y visualización de interface hombre-máquina
3	Almacenar datos cincominutales en tiempo real
4	Respaldo de datos en campo para caso en que se caiga la conexión a internet
5	Ejecutar adquisición de datos
6	Acondicionar señales
7	Sensar pH
8	Sensar Temperatura
9	Sensar Turbidez
10	Sensar Oxígeno Disuelto
11	Sensar Conductividad Eléctrica

No.	FUNCIONES
12	Sensar Cloro Residual Libre
13	Sensar Nivel piezométrico (FUTURO)
14	Sensar Flujo (FUTURO)
15	Sensar Temperatura ambiente (FUTURO)
17	Enviar señal de activado/desactivado en caso de falla del sistema(FUTURO)
19	Sensar señal de GPS (FUTURO)
21	Enviar señal de acción de control [Cierre de válvula, apagado de bomba, alarmas luminosas o sonoras, etc.] (FUTURO)
22	Enviar status de alarma en software de aplicación en caso de que alguna variable altere sus valores críticos
24	Enviar alarma en texto a responsable(s) del sistema (FUTURO)
25	Procesar datos
26	Calcular variables (Modelo con inteligencia artificial desarrollado)
27	Graficar señales
28	Generar reporte en software de aplicación
29	Visualizar en dispositivo móvil (limitada)

En seguida, se desarrolló un diagrama de tiempos, funciones y sub funciones requeridas para posteriormente generar el mejor concepto. Para tal fin, aunque se tienen descritas algunas funciones a futuro, no se han considerado para determinar el mejor concepto de diseño. No obstante, se consideró un sistema flexible y escalable para que en el futuro el sistema pueda funcionar integrando las funciones faltantes.

Se tienen cinco funciones principales con sus respectivas sub funciones, las cuales suceden cronológicamente en once tiempos (Ver Tabla 13 y 14).

Tabla 13. Diagrama de tiempos, funciones y sub funciones requeridas (Parte 1) (Autor).

TIEMPO	TIEMPO 0	TIEMPO 1	TIEMPO 2	TIEMPO 3
<b>FUNCIÓN</b>	<b>Energizar</b>	<b>Arranque de sistema</b>		<b>Medición de señales con sensores</b>
<b>SUBFUNCIÓN(ES)</b>		Conexión a internet	Ejecución de programa y visualización de interface hombre-máquina tanto en la lap top de campo como en el dispositivo de visualización remota desde un sitio web.	Sensor pH Sensor Temperatura Sensor Turbidez Sensor Oxígeno Disuelto Sensor Conductividad Eléctrica Sensor Cloro Residual Libre Sensor Nivel piezométrico (FUTURO) Sensor Flujo (FUTURO) Sensor Temperatura ambiente (FUTURO) Sensor señal de GPS (FUTURO) Identificar posición de señal de activado/desactivado del sistema de desconexión (FUTURO)

Tabla 14. Diagrama de tiempos, funciones y sub funciones requeridas (Parte 2) (Autor).

TIEMPO	TIEMPO 4	TIEMPO 5	TIEMPO 6	TIEMPO 7	TIEMPO 9	TIEMPO 10	TIEMPO 11
<b>FUNCIÓN</b>	<b>Adquisición y Acondicionamiento de señales y procesamiento de cálculos</b>				<b>Procesar datos de salida</b>		
<b>SUBFUNCIÓN(ES)</b>	Ejecutar Adquisición de datos	Acondicionamiento de señales	Almacenamiento de datos en tiempo real	Calcular variables (Modelo con inteligencia artificial desarrollado)	Envío y visualización de alarmas	Graficar señales	Visualización en dispositivo móvil desde un sitio web
			Respaldo de datos en campo para caso en que se caiga la conexión a internet		Enviar status de alarma en software de aplicación en caso de que alguna variable altere sus valores críticos	Generar reporte en software de aplicación	
			Procesamiento de datos		Enviar alarma en texto o e-mail a responsable(s) del sistema (FUTURO)		
					Enviar señal de activado/desactivado en caso de falla del sistema(FUTURO)		
					Enviar señal de acción de control [Cierre de válvula,apagado de bomba,alarmas luminosas o sonoras ,etc] (FUTURO)		

Para seleccionar el mejor concepto de diseño, se tienen tres alternativas a las cuales se le asignaron diversos parámetros de evaluación junto con un valor que pondera la importancia de cada parámetro. Seguidamente, se asigna una evaluación que puede ser 3,2 ó 1 y que se multiplica por el valor de ponderación. Cada elemento obtiene un puntaje y al final se suma el total de evaluación para obtener un total de concepto de diseño para cada alternativa y así el puntaje más elevado correspondiente a la alternativa 1 propuesta representa al mejor concepto de diseño.

Tabla 15. Evaluación del mejor concepto de diseño (Autor).

No.	FUNCIONES	Ponderación	ALTERNATIVA 1	EVAL.	ALTERNATIVA 2	EVAL.	ALTERNATIVA 3	EVAL.
<b>0</b>	<b>Suministrar energía</b>	<b>Valor Ponderado</b>	Combinar Energía eléctrica convencional y energía solar		Energía solar		Energía Eléctrica convencional (Desde punto de suministro de red CFE)	
<b>1</b>	Accesibilidad	0.4	3	1.2	2	0.8	1	0.4
<b>2</b>	Continuidad	0.4	3	1.2	1	0.4	2	0.8
<b>3</b>	Costo	0.2	1	0.2	2	0.4	3	0.6
<b>T</b>	Total evaluación	1	2.6		1.6		1.8	
<b>I.</b>	<b>Conectar a internet</b>	<b>Valor Ponderado</b>	Router TP-LINK		Router Cisco RV130W		Router TELTONIKA RUT104	
<b>1</b>	Velocidad de al menos 50 Mbps	0.3	2	0.6	3	0.9	1	0.3
<b>2</b>	Un puerto ethernet mínimo	0.3	3	0.9	2	0.6	1	0.3
<b>3</b>	Costo	0.3	2	0.6	3	0.9	1	0.3
<b>4</b>	Prestigio de la marca	0.05	3	0.15	2	0.1	1	0.05
<b>5</b>	Facilidad de configuración	0.05	2	0.1	3	0.15	1	0.05
<b>T</b>	Total evaluación	1	2.35		2.65		1	



No.	FUNCIONES	Ponderación	ALTERNATIVA 1	EVAL.	ALTERNATIVA 2	EVAL.	ALTERNATIVA 3	EVAL.
			LabView		Java		C++	
II.	Ejecutar programa y visualización,enviar señal de activado/desactivado en caso de falla del sistema(FUTURO),Enviar señal de activado/desactivado del sistema de desconexión (FUTURO),Enviar alarma en texto a responsable(s) del sistema (FUTURO), Enviar status de alarma en software de aplicación en caso de que alguna variable altere sus valores críticos,procesar datos,Calcular variables (Modelo con inteligencia artificial desarrollado),Graficar señales,generar reporte en software de aplicación y visualizar en dispositivo móvil (limitada).	Valor Ponderado						
1	Diseño de plataforma para adquisición de datos	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
2	Facilidad de programación	0.1	3	0.3	1	0.1	2	0.2
3	Tiempo de programación	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
4	Nivel de lenguaje	0.2	3	0.6	2	0.4	1	0.2
5	Costo	0.1	1	0.1	2	0.2	3	0.3
6	Sistema Operativo requerido	0.1	3	0.3	3	0.3	3	0.3
7	Facilidad de crear interfaces visuales agradables	0.1	3	0.3	2	0.2	1	0.1
T	Total evaluación	1	2.8		1.6		1.9	

No.	FUNCIONES	Ponderación	ALTERNATIVA 1	EVAL.	ALTERNATIVA 2	EVAL.	ALTERNATIVA 3	EVAL.
III.	Almacenar datos y respaldar datos en campo para caso en que se caiga la conexión a internet	Valor Ponderado	Lap Top HP STREAM 2 EN 1 X360 11P007LA		PC con pantalla touch dedicada a sistema ELO 15E2 Touchcomputer: All-in-One Desktop Touchcomputer		Servidor	
1	Capacidad de almacenamiento	0.2	2	0.4	1	0.2	3	0.6
2	Seguridad de almacenamiento si se cae la conexión	0.3	3	0.9	2	0.6	1	0.3
3	Capacidad de procesamiento	0.2	2	0.4	3	0.6	1	0.2
4	Robustez	0.05	2	0.1	1	0.05	3	0.15
5	Portabilidad	0.1	3	0.3	2	0.2	1	0.1
6	Costo	0.15	3	0.45	2	0.3	1	0.15
T	Total evaluación	1	2.55		1.95		1.5	
V.	Ejecutar adquisición de datos	Valor Ponderado	Tarjeta de Adquisición National Instruments USB-6000		Tarjeta de microcontrolador Arduino		Tarjeta Logic Bus USB-1408FS	
1	Prestigio de la marca	0.05	3	0.15	2	0.1	2	0.1
2	Calidad	0.05	3	0.15	1	0.05	2	0.1
3	Flexibilidad	0.1	1	0.1	3	0.3	2	0.2
4	Escalabilidad	0.1	1	0.1	2	0.2	3	0.3
5	No. de entradas y salidas analógicas	0.1	3	0.3	3	0.3	3	0.3
6	Inicio de captura por software	0.1	3	0.3	3	0.3	2	0.2
7	Velocidad de adquisición	0.1	3	0.3	2	0.2	2	0.2
8	Resolución	0.1	3	0.3	2	0.2	2	0.2
9	Exactitud	0.1	3	0.3	2	0.2	2	0.2

No.	FUNCIONES	Ponderación	ALTERNATIVA 1	EVAL.	ALTERNATIVA 2	EVAL.	ALTERNATIVA 3	EVAL.
10	Margen de entrada	0.1	3	0.3	3	0.3	3	0.3
11	Costo	0.1	1	0.1	3	0.3	2	0.2
T	Total evaluación	1	2.4		2.45		2.3	
VI.	Acondicionar señales	Valor Ponderado	Depende de tipo de sensores y tarjetas DAQ seleccionadas, por tanto, no se tomará en cuenta para calificar el mejor concepto de diseño					
VII.	Sensar pH	Valor Ponderado	Sensor pH 389, 389VP series (EMERSON-ROSEMOUNT)		Sensor de pH para aplicaciones con agua OPTISENS PH 8100 (KHRONE)		Sensor pH S80 pH Sensors ELECTRO-CHEMICAL DEVICES	
1	Rango de medición	0.3	3	0.9	3	0.9	3	0.9
2	Exactitud	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
3	Resolución	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
4	Precisión	0.1	3	0.3	1	0.1	2	0.2
5	Costo	0.1	1	0.1	3	0.3	2	0.2
6	Prestigio de la marca	0.1	3	0.3	1	0.1	1	0.1
T	Total evaluación	1	2.8		1.8		2.2	
VIII.	Sensar Temperatura	Valor Ponderado	Sensor de temperatura de resistencia / para el agua / con respuesta rápida max. 200 °C   W12 (SIKA)		Sensor de temperatura de resistencia / para el agua / con respuesta rápida T 5204 SAMSON		Sensor de temperatura de resistencia / para el agua / con respuesta rápida -50 - 120 °C, 10 kΩ / 25 °C   TENA NTC 10 PRODUAL	
1	Rango de medición	0.3	3	0.9	3	0.9	3	0.9
2	Exactitud	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4

No.	FUNCIONES	Ponderación	ALTERNATIVA 1	EVAL.	ALTERNATIVA 2	EVAL.	ALTERNATIVA 3	EVAL.
3	Resolución	0.2	3	0.6	2	0.4	1	0.2
4	Precisión	0.1	3	0.3	1	0.1	2	0.2
5	Costo	0.1	1	0.1	3	0.3	2	0.2
6	Prestigio de la marca	0.1	3	0.3	2	0.2	1	0.1
T	Total evaluación	1	2.8		2.1		2	
<b>IX.</b>	<b>Sensar Turbidez</b>	<b>Valor Ponderado</b>	Sensor de turbidez max. 3 000 ppm   Turbimax CUS31 (ENDRESS+HAUSSER)		Sensor de turbidez OPTISENS TUR 2000 (KROHNE)		Sensor de turbidez InPro8600 series (METTER TOLEDO)	
1	Rango de medición	0.3	3	0.9	3	0.9	3	0.9
2	Exactitud	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
3	Resolución	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
4	Precisión	0.1	3	0.3	1	0.1	2	0.2
5	Costo	0.1	1	0.1	3	0.3	2	0.2
6	Prestigio de la marca	0.1	3	0.3	1	0.1	1	0.1
T	Total evaluación	1	2.8		1.8		2.2	
<b>X.</b>	<b>Sensar Oxígeno Disuelto</b>	<b>Valor Ponderado</b>	Sensor de trazas de oxígeno disuelto OD 0.001 - 20 mg/l, max. 12 bar   Oxymax COS22D (ENDRESS+HAUSSER)		Sensor de oxígeno disuelto DO para aguas usadas max. 20 mg/l   OPTISENS ADO 2000 (KROHNE)		Sensor de oxígeno disuelto DO InPro6800 (METTER TOLEDO)	
1	Rango de medición	0.3	3	0.9	2	0.6	1	0.3
2	Exactitud	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
3	Resolución	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
4	Precisión	0.1	3	0.3	1	0.1	2	0.2
5	Costo	0.1	1	0.1	2	0.2	3	0.3
6	Prestigio de la marca	0.1	3	0.3	1	0.1	1	0.1

No.	FUNCIONES	Ponderación	ALTERNATIVA 1	EVAL.	ALTERNATIVA 2	EVAL.	ALTERNATIVA 3	EVAL.
T	Total evaluación	1	2.8		1.4		1.7	
XI.	<b>Sensar Conductividad Eléctrica</b>	<b>Valor Ponderado</b>	Sensor de conductividad de agua pura 0.04 - 500 $\mu$ S/cm, max. 12 bar   Condumax CLS16D (ENDRESS+HAUSSER)		Sensor de conductividad de agua pura 0.04 - 200 $\mu$ S/cm, max. 12 bar   Condumax CLS15 (ENDRESS+HAUSSER)		Sensor de conductividad de agua pura 2 electrodos   UniCond® METTER TOLEDO	
1	Rango de medición	0.3	3	0.9	3	0.9	3	0.9
2	Exactitud	0.2	3	0.6	3	0.6	3	0.6
3	Resolución	0.2	3	0.6	3	0.6	3	0.6
4	Precisión	0.1	3	0.3	2	0.2	1	0.1
5	Costo	0.1	1	0.1	2	0.2	3	0.3
6	Prestigio de la marca	0.1	3	0.3	2	0.2	1	0.1
T	Total evaluación	1	2.8		2.7		2.6	
XII.	<b>Sensar Cloro Libre</b>	<b>Valor Ponderado</b>	Sensor de cloro/ozono para la desinfección del agua 0.1 - 10 ppm, pH 6.5 - 9.5   CCS120 (ENDRESS+HAUSSER)		Sensor de cloro/ozono para la desinfección del agua 0 - 20 ppm   498CL EMERSON		Sensor de cloro/ozono para la desinfección del agua OPTISENS CL 1100 KHRONE	
1	Rango de medición	0.3	3	0.9	3	0.9	3	0.9
2	Exactitud	0.2	3	0.6	1	0.2	2	0.4
3	Resolución	0.2	3	0.6	2	0.4	1	0.2
4	Precisión	0.1	3	0.3	1	0.1	2	0.2
5	Costo	0.1	1	0.1	3	0.3	2	0.2
6	Prestigio de la marca	0.1	3	0.3	2	0.2	1	0.1
T	Total evaluación	1	2.8		2.1		2	
<b>TOTAL CONCEPTO DE DISEÑO</b>			29.5		22.15		21.2	

---

#### 4.2.2.2.3. Breve descripción de dispositivos seleccionados

Derivado del mejor concepto de diseño, se describen los dispositivos que integran el mejor concepto de diseño.

##### 4.2.2.2.3.1. Interface

El sistema físico se enlaza con una interface de programación capaz de comunicar las señales físicas con el software desarrollado hasta lograr la visualización de cada valor en tiempo real y a su vez es posible monitorearlo de forma remota desde cualquier otro lugar siempre y cuando se tenga acceso al sistema desarrollado y conexión a internet.

Es decir:

- A) Primeramente se conecta el sistema de sensores a la tarjeta de adquisición de datos,
- B) En seguida, la tarjeta manda los datos a la Laptop de campo y los procesa de acuerdo al modelo programado.
- C) La interface de visualización de campo comienza a funcionar y guarda los datos en disco duro.
- D) La interface puede ser visualizada desde otro punto en algún sistema que tenga el software de desarrollo y el de aplicación instalados, siempre y cuando haya conexión a internet desde la laptop del gabinete de campo y que el equipo de visualización remota tenga acceso a la página web donde se encuentra alojado la interface de visualización remota.

##### 4.2.2.2.3.2. Selección y especificaciones de equipos

A continuación se describen los dispositivos y equipos seleccionados que básicamente se seccionaron en: Sistema de adquisición de datos, sensores y otros equipos asociados.

##### 4.2.2.2.3.3. Sistema de Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se ha determinado utilizar la tarjeta de la marca National Instruments modelo USB 6000.

##### 4.2.2.2.3.4. Sensores

En lo que respecta a la medición de pH, se eligió el sensor de pH de la marca Rosemount modelo 389,389VP series. Otro dispositivo que resultó como mejor

---

---

concepto fue el sensor de temperatura de resistencia para el agua con respuesta rápida modelo W12 de la marca SIKA. Un elemento más del sistema será el sensor de turbidez marca ENDRESS+HAUSSER modelo Turbimax CUS31. El sensor modelo Oxymax COS22D de la marca ENDRESS+HAUSSER fue definido como la mejor opción para monitorear el Oxígeno disuelto. Para el sensor de conductividad eléctrica es más viable emplear el modelo Condumax CLS16D la marca ENDRESS+HAUSSER y finalmente para el sensado de cloro libre se eligió el modelo CCS120 de la marca ENDRESS+HAUSSER.

#### 4.2.2.2.3.5. Otros equipos asociados

Para cumplir con la función de suministrar energía se determinó que la mejor opción es que el sistema sea capaz de conectarse a la red de energía eléctrica convencional y a su vez poder operar con energía solar dependiendo de la accesibilidad del punto donde será instalado, por lo cual se recomienda dimensionar el sistema fotovoltaico requerido (no fue alcance de éste trabajo su dimensionamiento).

En lo que respecta a la función de conectar a internet se determinó utilizar un Router modelo TL-MR3020-V1-01, marca TP LINK.

Para almacenar datos se decidió utilizar una lap top marca HP modelo X 360 11P007LA debido a la evaluación y a que ya se cuenta con ella.

#### 4.2.2.2.4. Diagrama general de funcionamiento del sistema

Como se muestra en la Fig. 18, mediante los seis sensores seleccionados para seis señales analógicas, se miden en campo las variables necesarias para el modelo propuesto y se conectan a una etapa de acondicionamiento de señales cuya salida se conecta directamente a la tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta de adquisición de datos enlaza los valores medidos a la lap top elegida por medio de un cable USB y por una interface de programación. Mediante un router portátil es posible brindar conexión a internet y así permitir acceso remoto desde una página web por medio de algún dispositivo móvil.

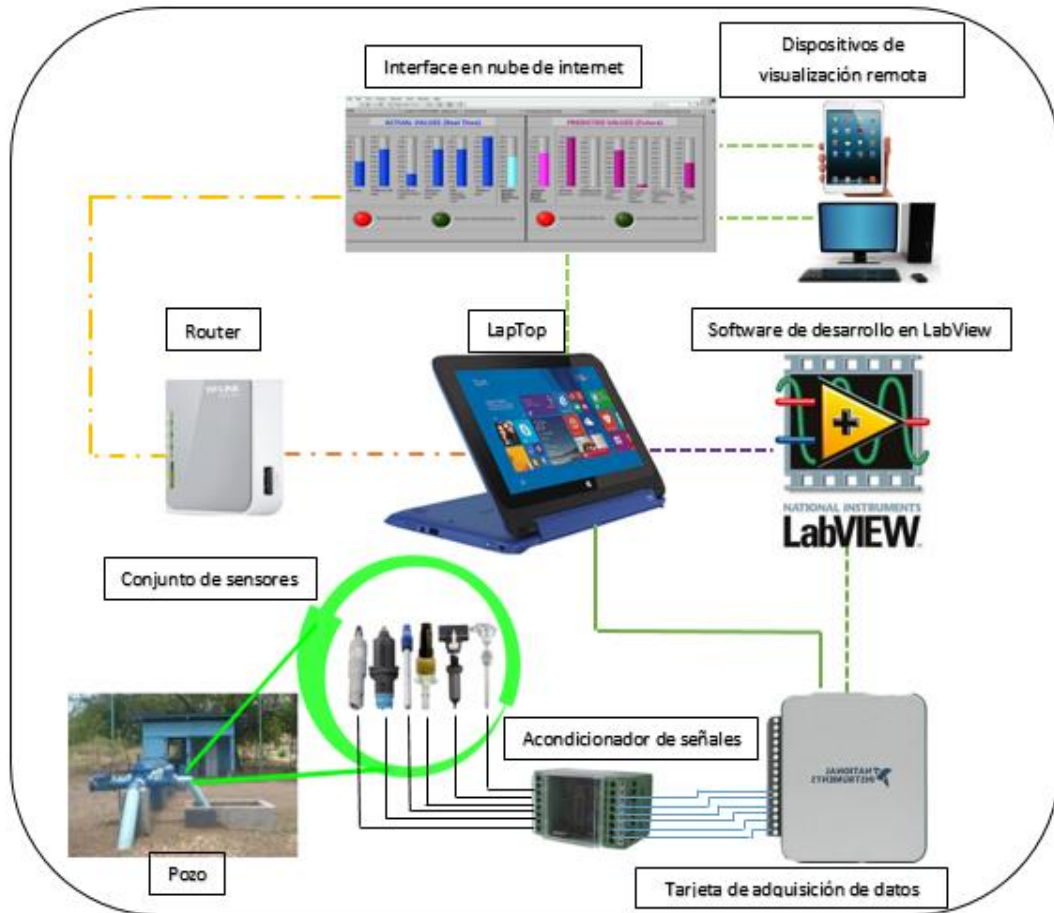


Figura. 18 Diagrama general de funcionamiento del sistema (Autor).

#### 4.3. Desarrollo de software

En los puntos subsecuentes, se resumen los aspectos más relevantes al diseño del software.

##### 4.3.1. Selección de la plataforma de programación utilizada

De acuerdo a la evaluación realizada, el LabView resultó ser la mejor plataforma de programación capaz de ejecutar instrucciones de software desarrollado y visualización, enviar alarmas en caso de que alguna de las variables altere valores críticos, procesar datos tomados en tiempo real y realizar algunos cálculos, así como graficar señales, generar reporte en software de aplicación y poder visualizar en algún dispositivo con gran rapidez y facilidad.



---

#### 4.3.2. Diseño de software

##### 4.3.2.1. Definición de variables de entrada

En la Tabla 16 que se realizó, se observa que para el funcionamiento del sistema, se requieren al menos seis señales físicas del tipo analógicas. Por el tipo de dispositivo seleccionado, es importante mencionar, que se pueden agregar más variables físicas e inclusive se pueden ir agregando más tarjetas de adquisición de datos por la consideración en especificaciones de diseño flexible y escalable.

Tabla 16. Entradas físicas que considera el sistema (Autor).

Variable	Tipo	Tipo de señal	Cantidad
pH	Entrada	Analógica	1
Temperatura	Entrada	Analógica	1
Turbidez	Entrada	Analógica	1
Oxígeno disuelto	Entrada	Analógica	1
Conductividad eléctrica	Entrada	Analógica	1
Cloro residual libre	Entrada	Analógica	1
Señales futuras	Entrada	Analógica	1

##### 4.3.2.2. Definición de variables de salida

Por ahora, el sistema no contempla variables de salidas físicas; no obstante, es posible agregar al sistema señales de salida tales como, relevadores de arranque y paro de bombas o señales para válvulas automáticas.

El sistema contempla salidas del tipo dato en el equipo, las cuales se muestran en la siguiente Tabla 17.

Tabla 17. Cuantificación de salidas de dato y visualización del sistema (Autor).

Variable de referencia	Cantidad de variables de salida a visualización	Tipo de datos	Espacio en disco requerido por cada dato (Bytes)	Sub total (Bytes)
------------------------	---	---------------	--	-------------------

---

Índices y alarmas de valores difusos actuales y de predicción	18	Flotante	4	72
pH	12	Flotante	4	48
Temperatura	35	Flotante	4	140
Turbidez	33	Flotante	4	132
Oxígeno disuelto	29	Flotante	4	116
Conductividad eléctrica	29	Flotante	4	116
Cloro residual libre	31	Flotante	4	124
índice de Calidad de Agua	12	Flotante	4	48
<b>Espacio requerido en cada intervalo cincominutal (Bytes)</b>				<b>796.00</b>
<b>Espacio requerido por cada hora (Bytes)</b>				<b>9,552.00</b>
<b>Espacio requerido por cada día (Bytes)</b>				<b>229,248.00</b>
<b>Espacio requerido por cada año (Bytes)</b>				<b>83,675,520.00</b>

#### 4.3.2.3. Interfaces de operación

A continuación se muestran las interfaces gráficas que han sido desarrolladas.

Finalmente, el modelo antes descrito se ha programado en un software en la plataforma de LabView por su facilidad de programación en lenguaje tipo G y debido a que es un software especializado en sistemas de adquisición de datos, y se ha construido un simulador de tiempo real que sustituye posibles mediciones puntuales por la generación valores aleatorios para todas las variables  $X_i$ , lo cual resulta viable para verificar que la parte de lógica difusa y el cálculo del ICA funciona adecuadamente.

Se pretende instalar un sistema como el descrito en cada uno de los pozos usados para abastecimiento municipal y posteriormente gestionar todos los datos desde un servidor de dedicación exclusiva. El software se ha desarrollado y se muestran algunas de las pantallas del mismo en las siguientes figuras.



Figura 19. Pantalla de resumen de variables en tiempo real y futuro (Autor).

En la figura 19, se muestra una pantalla de la forma en que funciona el simulador. Se puede visualizar del lado izquierdo el índice calculado en tiempo real de los valores actuales de las variables; y del lado derecho se pueden observar los valores de predicción para las siguientes seis horas. En ambos casos se detectaron eventos de contaminación de agua.

Como se describió en capítulos anteriores, se han ejecutado diversas simulaciones con éxito, y se describe un ejemplo de los resultados obtenidos en una de las 144 simulaciones realizadas. En la Tabla 10, se escribió un ejemplo del funcionamiento del modelo planteado, en el cual se observa lo siguiente:

Para el caso de la variable pH se ha obtenido de forma aleatoria un valor igual a 11 que se encuentra fuera del intervalo ideal y el modelo nos indica que el agua tiene presencia de una base, lo cual implica que tenga un valor numérico difuso (figura 20).

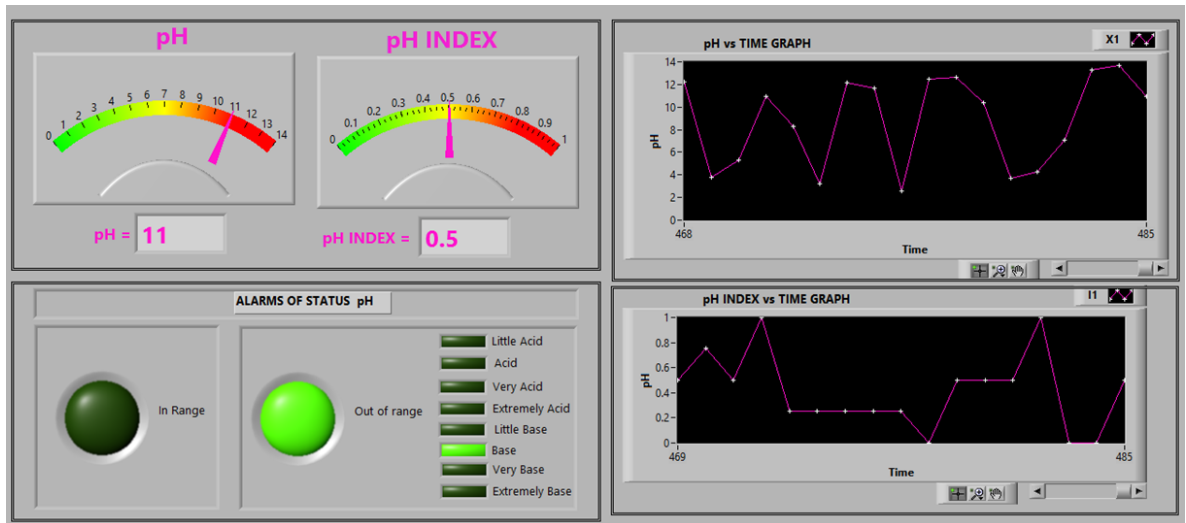


Figura 20. Pantalla del simulador programado para la variable pH (Autor).

- A) La temperatura simulada de 17.12 corresponde a una temperatura aceptable pero fuera del intervalo ideal por lo cual su valor numérico difuso es de 0.75 (figura 21).

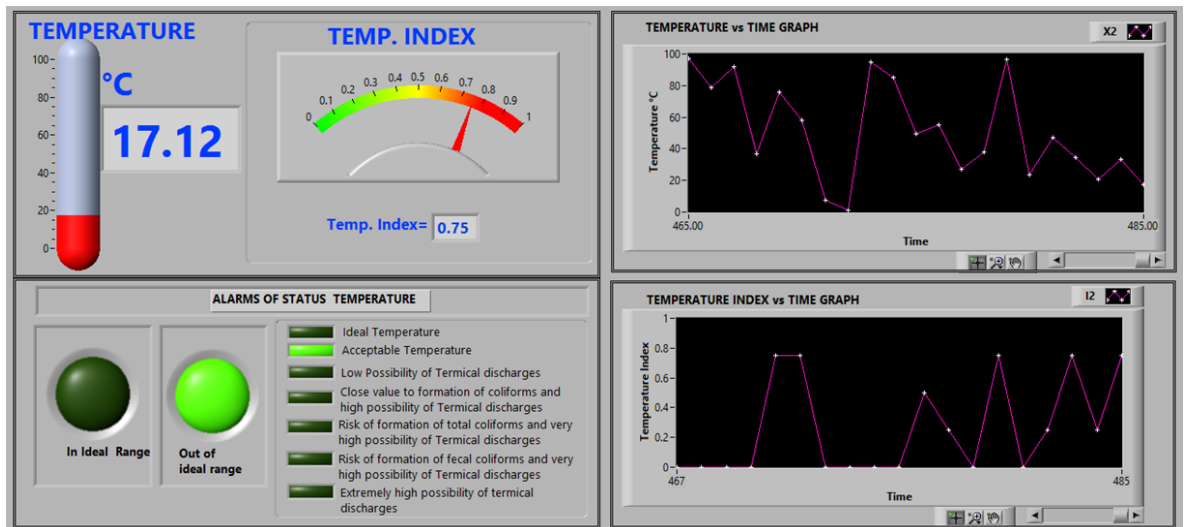


Figura 21. Pantalla del simulador programado para la variable temperatura (Autor).

- B) En el caso de una turbidez de 3.3 se encuentra dentro del rango de turbidez ideal y entonces su valor difuso numérico es de 1 (figura 22).

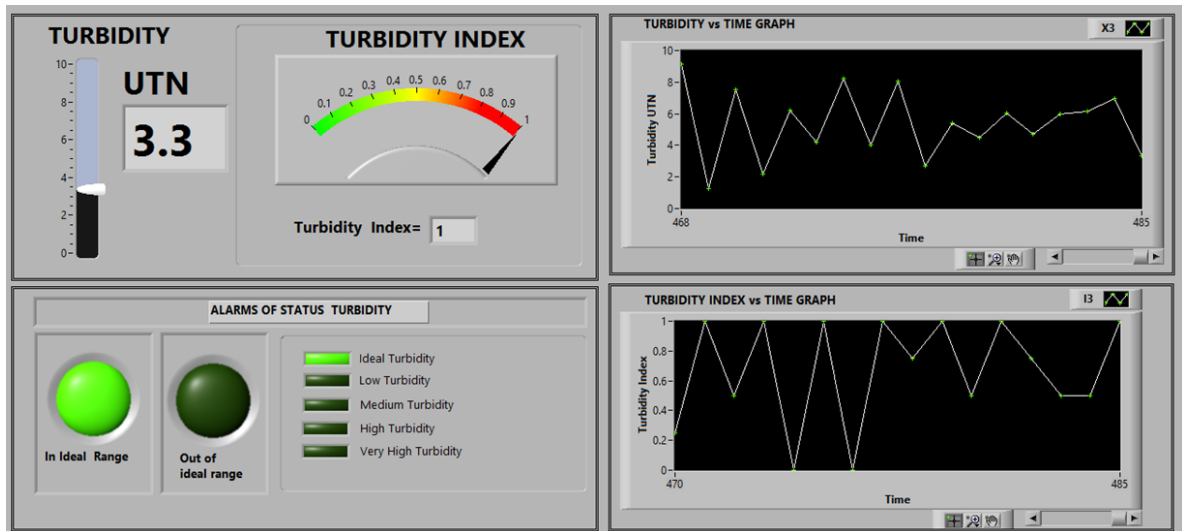


Figura 22. Pantalla del simulador programado para la variable turbidez (Autor).

- C) El oxígeno disuelto fuera del intervalo ideal ha sido de 3.6 lo cual indica una baja posibilidad de contaminación orgánica y un valor difuso de 0.75 (figura 23).

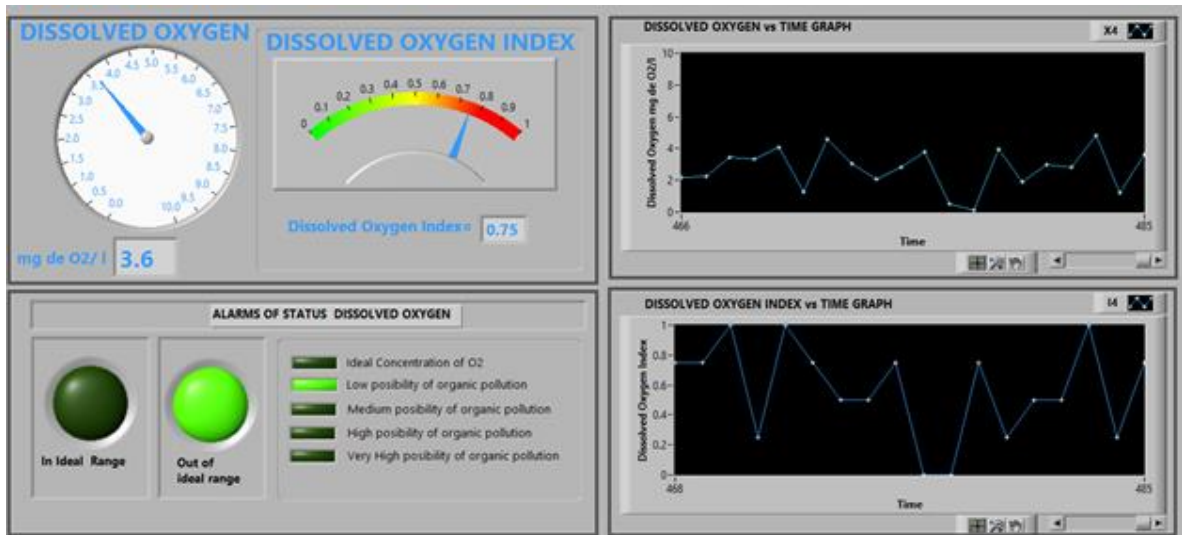


Figura 23. Pantalla del simulador programado para la variable oxígeno disuelto (Autor).

- D) En lo que respecta a la conductividad eléctrica, se tuvo una alta posibilidad de presencia de sales, descargas tóxicas u otra fuente de contaminación y con un valor de 1.4 se encuentra fuera del rango ideal (figura 24).

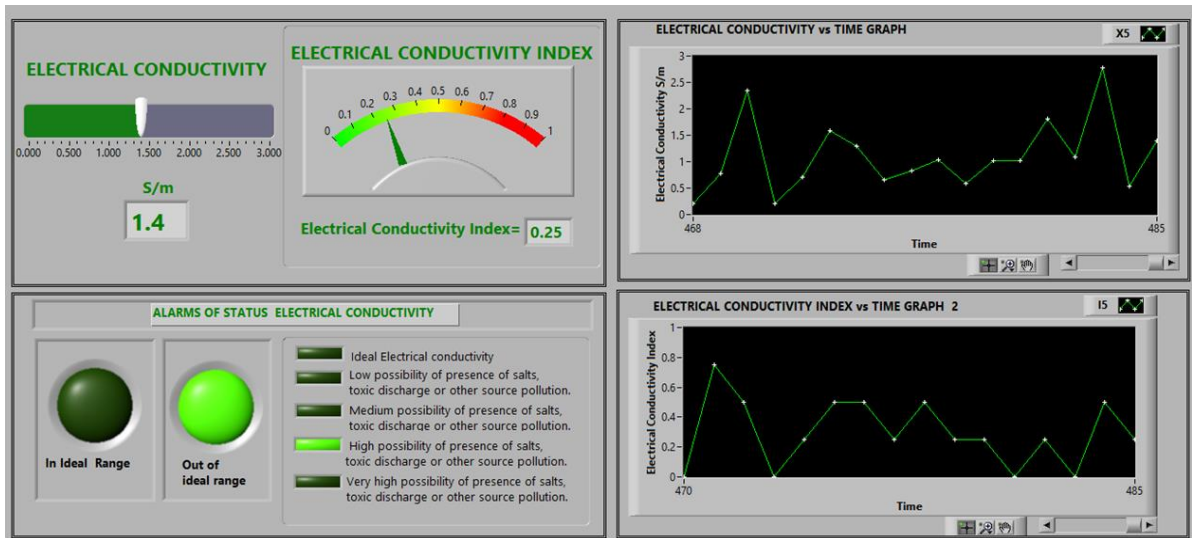


Figura 24. Pantalla del simulador programado para la variable conductividad eléctrica (Autor).

E) De igual forma, el cloro residual libre presenta un valor de 2.2 fuera del rango ideal y un valor difuso de 0.75 que muestra un bajo nivel de exceso de combinación de hipoclorito y ácido hipocloroso (figura 25).

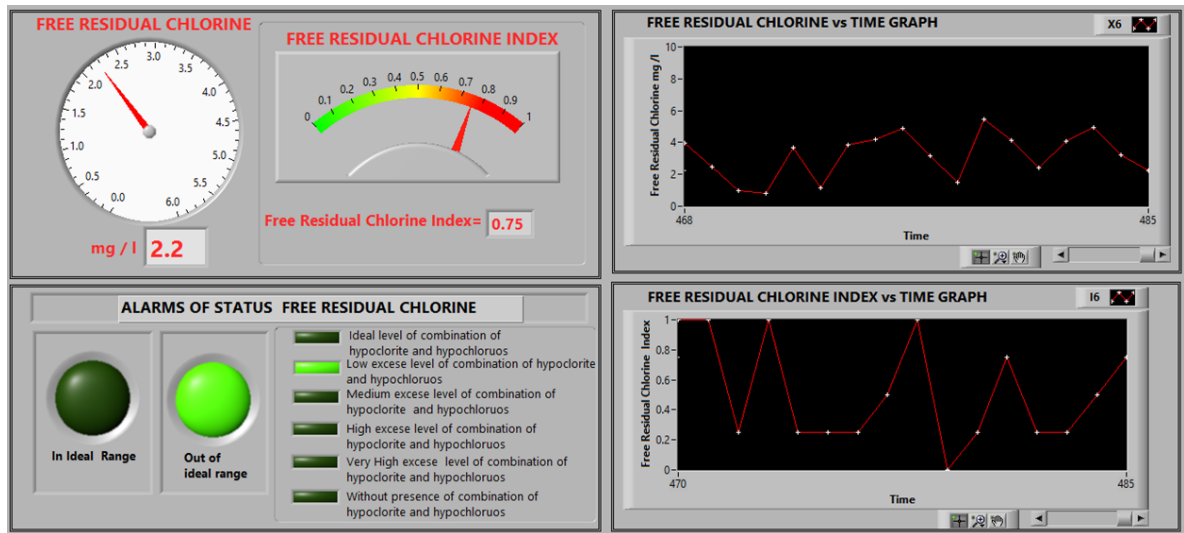


Figura 25. Pantalla del simulador programado para la variable cloro residual libre (Autor).

F) En la Tabla 10, se mostró que al evaluar valores de las variables seleccionadas en el modelo neurodifuso, se calculó un ICA= 0.60 (figura 26).

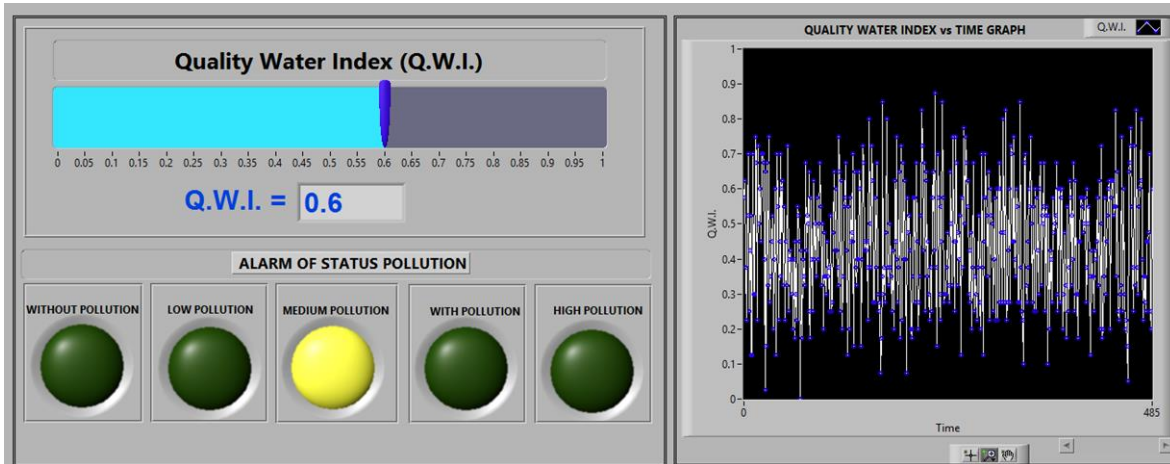


Figura 26. Imagen de la pantalla programada para el índice de calidad de agua

Con lo anterior se verifica que con el modelo de lógica difusa programado y mediante la construcción de un sistema de adquisición de datos como el planteado e incluyendo el modelo de inteligencia artificial desarrollado, es posible detectar eventos de contaminación de agua en tiempo real y además resulta factible conocer alarmas de la condición del agua que se está monitoreando. A su vez, cabe señalar que los valores asignados como ideales pueden diferir de unas regiones a otras dependiendo de la normatividad vigente o lineamientos de cada país. La cantidad de variables a considerar dependerá directamente de la disponibilidad de elementos sensores para medir en tiempo real.

Por motivos de confidencialidad y derivado de que el software apenas se ha comenzado a registrar en el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR), no se especifican a detalle los diagramas de bloques y algoritmos de programación utilizados.

#### 4.3.2.4. Resumen del funcionamiento del software de programación desarrollado

El funcionamiento del sistema planteado se reduce a lo siguiente:

- Seis elementos sensores (pH, temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y cloro residual libre) miden cada cinco minutos las variables físicas que se convierten en señales eléctricas de tipo analógicas,

- Dichas señales son introducidas a una interface electrónica de acondicionamiento de señales para estandarizar la señal en un rango de voltaje de 0 a 10 V.
- La salida del acondicionamiento de señales es introducida a la tarjeta de adquisición de datos seleccionada.
- La tarjeta de adquisición de datos envía la información por vía USB al equipo de cómputo seleccionado
- El equipo de cómputo seleccionado procesa y almacena los datos adquiridos con ayuda del software desarrollado (el cual tiene como principio de funcionamiento el modelo neurodifuso desarrollado), y posteriormente enlaza la información procesada a la nube de internet mediante el router o alguna conexión por cable Ethernet.
- Desde cualquier otro dispositivo que tenga instalado el software desarrollado y conectividad a internet, es posible monitorear los valores y alarmas en la interface desarrollada.

#### 4.3.2.5. Catálogo de conceptos para determinar los costos del sistema

Se elaboró un catálogo de conceptos para que en caso de que se requiera, se pueda solicitar una cotización y se muestra en la siguiente Tabla 18.

**Tabla 18 Catálogo de conceptos para cotización (Autor).**

Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Sub total
EA-01	Suministro e instalación de Router TP-LINK modelo TL-MR3020-V1-01. Incluye: Configuración, materiales complementarios, cableados, herramienta y mano de obra.	PZA	1	\$ -	\$ -
SO-01	Instalación de software desarrollado en LabView. Incluye: Mano de obra especializada	LOTE	1	\$ -	\$ -
EA-02	Suministro e instalación de Lap Top HP STREAM 2 EN 1 X360 11P007LA	PZA	1	\$ -	\$ -



Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Sub total
EA-03	Suministro e instalación de Tarjeta de Adquisición National Instruments USB-6000. Incluye: Configuración, materiales complementarios, cableados, herramienta y mano de obra.	PZA	1	\$ -	\$ -
SS-01	Suministro e instalación de Sensor pH 389, 389VP series (EMERSON-ROSEMOUNT). Incluye: Instalación mecánica, cableados, calibración, materiales complementarios, herramienta, pruebas punto a punto y mano de obra.	PZA	1	\$ -	
SS-02	Suministro e instalación de sensor de temperatura de resistencia / para el agua / con respuesta rápida max. 200 °C   W12 (SIKA). Incluye: Instalación mecánica, cableados, calibración, materiales complementarios, herramienta, pruebas punto a punto y mano de obra.	PZA	1	\$ -	
SS-03	Suministro e instalación de Sensor de turbidez max. 3 000 ppm   Turbimax CUS31 (ENDRESS+HAUSSER). Incluye: Instalación mecánica, cableados, calibración, materiales complementarios, herramienta, pruebas punto a punto y mano de obra.	PZA	1	\$ -	\$ -

Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Sub total
SS-04	Suministro e instalación de Sensor de trazas de oxígeno disuelto OD 0.001 - 20 mg/l, max. 12 bar   Oxymax COS22D (ENDRESS+HAUSSER). Incluye: Instalación mecánica, cableados, calibración, materiales complementarios, herramienta, pruebas punto a punto y mano de obra.	PZA	1	\$ -	\$ -
SS-05	Suministro e instalación de Sensor de conductividad de agua pura 0.04 - 500 µS/cm, max. 12 bar   Condumax CLS16D (ENDRESS+HAUSSER). Incluye: Instalación mecánica, cableados, calibración, materiales complementarios, herramienta, pruebas punto a punto y mano de obra.	PZA	1	\$ -	\$ -
SS-06	Suministro e instalación de Sensor de cloro/ozono para la desinfección del agua 0.1 - 10 ppm, pH 6.5 - 9.5   CCS120 (ENDRESS+HAUSSER). Incluye: Instalación mecánica, cableados, calibración, materiales complementarios, herramienta, pruebas punto a punto y mano de obra.	PZA	1	\$ -	\$ -

Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Sub total
FG-01	Fabricación e instalación de Gabinete para alojar sistema de adquisición y monitoreo. Incluye: Sistema de ventilación, materiales, equipo, herramienta, mano de obra y empotrado del mismo	PZA	1	\$ -	\$ -
EA-04	Diseño, suministro y conexión de Acondicionamiento de señales entre tarjeta DAQ y sensores. Incluye pruebas punto a punto, conexiones eléctricas, materiales, equipo, herramienta y mano de obra especializada.	LOTE	1	\$ -	\$ -
EF-01	Diseño, desarrollo de ingeniería conceptual y de detalle de un sistema de energía fotovoltaica para el equipo. Incluye: Desarrollo de proyecto ejecutivo, suministro e instalación de: baterías de ciclado profundo, conductores, inversor de corriente, controlador de corriente eléctrica, interruptores, perfiles y estructura metálica de acero inoxidable y panel fotovoltaico	LOTE	1	\$ -	\$ -
<b>TOTAL</b>					\$ -

Lo más viable es tener una cotización con un periodo de vigencia de 30 días naturales, ya que los precios de equipos electrónicos cambian continuamente.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

La presente investigación describe un modelo para detectar y predecir eventos de contaminación en el agua para uso humano que utiliza técnicas de inteligencia artificial y la construcción de un índice de calidad de agua que puede ser monitoreado en tiempo real, definido a partir de seis variables que son: pH,

---

temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y cloro residual libre.

Con el modelo se demuestra que la técnica de lógica difusa permite detectar eventos de contaminación de agua dependiendo del valor que tenga cada variable y permite la descripción de las condiciones del agua dependiendo de intervalos de valores asociados a etiquetas lingüísticas tal y como lo interpretaría un ser humano y se han tomado como referencia las definiciones de cada variable y los valores establecidos por la Comisión Nacional del Agua en la NOM-127-SSA1-1994 y por la OMS.

También, mediante la construcción de una red neuronal artificial, es posible el cálculo de un índice de calidad de agua a partir de las variables asociadas y rangos de valores generados en forma automática. Al integrarle a la red neuronal artificial un modelo de umbrales dinámicos también se verifica la posibilidad de predecir anticipadamente eventos anómalos de contaminación en el agua para cada variable.

El modelo de predicción se entrena continuamente a partir de series de datos temporales que para el presente estudio son series de 72 datos cincominutales equivalentes a un periodo de seis horas por cada variable y el cual puede ser modificado dependiendo de la frecuencia de muestreo o con que se cuente. Los valores de referencia utilizados dependen de la legislación de referencia vigente y pueden diferir en cada país.

Los resultados muestran que al integrar el modelo la combinación de las técnicas utilizadas en un sistema de control y adquisición de datos, es posible la detección y predicción de eventos de contaminación y situaciones anómalas en el agua de consumo humano incluyendo las posibles causas de los valores de las variables asociadas.

El modelo desarrollado en la presente investigación permite ser una herramienta para ser aplicada a cualquier variable física que pueda ser medida con un elemento sensor y requiera de cierto monitoreo.

---

## *RECOMENDACIONES*

Se recomienda construir un sistema piloto para optimizar el diseño, y a la par, es preciso hacer registro de patente del sistema SCADA y registro de derechos de autor del software desarrollado.

Puede resultar de mayor impacto, probar el modelo neurodifuso aplicándolo a otros procesos.

Para futuras investigaciones, se recomienda adicionar algún algoritmo que verifique el cambio de la temperatura ambiente con respecto a la temperatura del agua monitoreada para evitar falsas alarmas. Otra de las consideraciones que se deben tomar, es el evento de arranque y paro de la bomba del sistema de distribución de agua que se va a monitorear, así como la selección de una válvula automática de apertura y cierre para evitar el suministro de agua contaminada sin necesidad de la intervención de un operador.

Finalmente, resulta de gran interés, diseñar un sistema de alojamiento y procesamiento de datos con una configuración centralizada, empezando por un diseño a nivel estado y que pueda ir escalándose a nivel nacional e internacional, para lo cual también se requiere checar leyes y normativas relacionadas al manejo de datos e información sobre sistemas de agua.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- Arad, J., Housh, M., Perelman, L., & Ostfeld, A. (2013). A dynamic thresholds scheme for contaminant event detection in water distribution systems. *WATER RESEARCH*, 47, 1899-1908.
- Artell, J., Ahtiainen, H., & Pouta, E. (2013). Subjective vs. objective measures in the valuation of water quality. *Janne Artell, Heini Ahtiainen, Eija Pouta, 2013, Subjective vs. objective measures in the vJournal of Environmental Management*, 130(30), 288-296.
- Basogain Olabe, X. (2007). *Redes Neuronales Artificiales y sus aplicaciones*. Bilbao: Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao.
- Bogdanchikov, A., Druzhinin, V., Korol, A., Koshuba, S., Tekutiev, A., & Usova, Y. (2014). SND data acquisition system upgrade. *IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab srl*, 1-6.
- Buscador de patentes de Google. (26 de 09 de 2013). *Buscador de patentes de Google*. Obtenido de Buscador de patentes de Google
- Chen, D., Wang, J., Zou, F., Yuan, W., & Hou Weibo. (2014). Time series prediction with improved neuro-endocrine model. *Neural Comput & Applic*, 24, 1465–1475 . doi:10.1007/s00521-013-1373-3
- Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual of drinking water, sewage system and sanitation. Design of treatment plants of simplified technology. (SEMARNAT, Ed.) 1-329.
- Comisión Nacional del Agua. (09 de Mayo de 2013). *Página Web de CONAGUA*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/>
- Correal, M. E., & Peña, D. (2008). Modelo factorial dinámico threshold. *Revista Colombiana de Estadística*, 31(2), 183-192.
- Daneels, A., & Salter, W. (1999). WHAT IS SCADA? *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, 339-343.
- Echarri, L. (2008). *Población, ecología y medio ambiente*. España: Universidad de Navarra.
- Elshafie, A., Najah, A., & Karim, O. (2013). Application of artificial neural networks for water quality prediction. *Neural Comput & Applic*, 22(Suppl 1), S187-S201. doi: 10.1007/s00521-012-0940-3

- 
- González Mora, I. D. (2011). *Transparencia y rendición de cuentas en el sector de agua y saneamiento en el Estado de Oaxaca*. Oaxaca: Programa Agua WWF.
- Gümrah, F., Öz, B., Güler, B., & Evin, S. (2000). THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR THE PREDICTION OF WATER QUALITY OF POLLUTED AQUIFER. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119, 275-294.
- Gyawali, S., Techato, K., Yuangyai, C., & Musikavong, C. (2013). Assessment of Relationship between Land uses of Riparian Zone and Water Quality of River for Sustainable Development of River Basin, A Case Study of U-Tapao River Basin, Thailand. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 291-297.
- Hernández, H. (2013). *Evaluación de la Calidad del Agua en la Subcuenca del Río Ahuehuepan, Taxco, Guerrero, México*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Li, F. (2014). Application of Varying Coefficient Discrepancy Degree in Water quality Evaluation of Water Supply Networks. *Procedia Environmental Sciences*, 18, 243-248.
- Masters, G., & Wendell, E. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. España: Pearson Prentice Hall.
- Mouhrir, A., Rachidi, T., & Karim, M. (2014). River quality index for Morocco using a fuzzy inference system. *Environmental Systems Research*, 3(21), 1-12.
- National Instruments. (27 de Agosto de 2013). *Página Web de NI*. Obtenido de <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- Ong, B. T., Sugiura, K., & Zettsu, K. (2014). Dynamically pre-trained deep recurrent neural networks using environmental monitoring data for predicting PM2.5. *Neural Comput & Applic*, CrossMark. doi:10.1007/s00521-015-1955-3
- Ostfeld, A., ASCE, M., Salomons, E., & Lahav, O. (2011). Chemical Water Stability in Optimal Operation of Water Distribution Systems with Blended Desalinated Water. *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT © ASCE*, 531-541. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000166
- Park, Y., Cho, K., Kang, J.-H., Lee, S., & Kim, J. (2014). Developing a flow control strategy to reduce nutrient load in a reclaimed multi-reservoir system using a 2D hydrodynamic and water quality model. *Science of The Total Environment*, 466-467, 871-880.
- PECyT. (2012). *Documento básico de líneas prioritarias de investigación, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos en materia de agua en México 2012*. Obtenido de
-

---

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/PECyTLineasInvestAgua23may2012.pdf>

Perelman, L., Arad, J., Housh, M., & Ostfeld, A. (2012). Event Detection in Water Distribution Systems from Multivariate Water Quality Time Series. *ENVIRONMENTAL, Science & Technology*, 46, 8212-8219. doi:10.1021/es3014024

Piñeiro, J., Martínez Torres, J., García Nieto, P., Alonso Fernández, J., Díaz Muñiz, C., & Taboada, J. (2013). Analysis and detection of outliers in water quality parameters from different automated monitoring stations in the Miño river basin (NW Spain). *Ecological Engineering*, 60, 60-66.

Registro de patentes europeas. (01 de Octubre de 2013). *Página Web del registro de patentes europeas*. Obtenido de <https://register.epo.org/application?number=EP11157053>

Sánchez, E., Vicente, M., Rubio, J., García, A., Travieso, M., & Borja, R. (2007). Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecological Indicators*, 7, 315-328.

Secretaría de Salud. (2001). MODIFICACIÓN a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*, 1-12.

SEMARNAT. (11 de Mayo de 2013). *Página Web de la SEMARNAT*. Obtenido de <http://www.semarnat.gob.mx/educacionambiental/Paginas/accionespa>

SIEMENS. (28 de Agosto de 2013). *Página Web de la Compañía SIEMENS*. Obtenido de <http://www.automation.siemens.com/mcms/human-machineinterface/en/visualizationsoftware/scada/Pages/Default.aspx?stc=wwiia302005#SIMATIC-WinCC>

Sprockel, J. J., Diaztagle, J. J., Alzate, W., & González, E. (2014). Neural networks in the diagnosis of acute myocardial infarction. *Revista Colombiana de Cardiología*, 21(4), 215-223. doi:10.1016/j.rccar.2013.10.001

TaKaDu Ltd. (03 de Octubre de 2013). *Página Web de la compañía TaKaDu Ltd*. Obtenido de <http://www.takadu.com/default.asp?catid=%7BCD0ACCD0-0E8F-482F-9F01-DE5CD89554E9%7D>



---

UNESCO. (21 de 11 de 2013). *Página Web de la UNESCO*. Obtenido de  
[[http://www.unesco.org/new/es/media-services/single-view/news/water\\_quality\\_highlighted\\_on\\_world\\_water\\_day\\_2010/#.Uoznx\\_GFDMw](http://www.unesco.org/new/es/media-services/single-view/news/water_quality_highlighted_on_world_water_day_2010/#.Uoznx_GFDMw)].

World Health Organization. (2006). *Guidelines for Drinking Water Quality*. 27-362.