

# MODELO COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL CULTIVO DEL PEZ BLANCO

***Midory Esmeralda Viguera Velázquez***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación  
*midory.viguera@gmail.com*

***José Juan Carbajal Hernández***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación  
*jcarbajalh@cic.ipn.mx*

***Luis Pastor Sánchez Fernández***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación  
*lsanchez@cic.ipn.mx*

***Margarita Hernández Martínez***

Centro Regional de Investigación Pesquera, Instituto Nacional de Pesca  
*margarita.hmartinez@inapesca.gob.mx*

## **Resumen**

Actualmente el cultivo de especies acuícolas para consumo humano es una práctica que se realiza en todo el mundo. La evaluación de la calidad del agua es un procedimiento indispensable, debido a que un adecuado control de la misma permite mayores tasas de crecimiento y producción. En el presente trabajo se hace un estudio sobre el pez blanco (*Chirostoma estor*), el cual es una especie cuyas poblaciones naturales se encuentran en deterioro debido a la sobrepesca y alteración de su hábitat. Se localiza, en el lago de Pátzcuaro, ubicado en Michoacán, México. Asimismo, se propone un nuevo modelo basado en prioridades para la evaluación de la calidad del agua en sistemas de cultivos de pez blanco, estableciendo una alternativa para preservar esta importante especie a través del mejoramiento de las condiciones para su cultivo. Los parámetros

ambientales se clasifican por su impacto ecológico negativo en el hábitat basado en las concentraciones de los contaminantes registrados.

**Palabra(s) Clave(s):** Acuicultura, calidad del agua, *Chirostoma estor*, procesamiento de señales.

## 1. Introducción

El pez blanco es una importante especie endémica que habita en el Lago de Pátzcuaro, ubicado en Michoacán, México [1]. Esta especie tiene un alto valor cultural, ecológico y económico ya que es un pez muy importante en la gastronomía de esta zona que es altamente turística. Actualmente, esta especie se encuentra en peligro de extinción y los esfuerzos para su conservación se han centrado en su cultivo en sistemas de acuicultura intensiva para fines comerciales, y evitar así la sobreexplotación de este recurso en su ambiente natural.

El ecosistema del Lago de Pátzcuaro en donde habita el pez blanco, se ha deteriorado por diversos problemas como la tala excesiva, la pesca desmedida y la contaminación del suministro de agua por diferentes efluentes [2], [3]. La mala calidad del agua causa mortalidad, enfermedad, crecimiento lento y baja reproducción de pez blanco [4]. En este sentido, el monitoreo de la calidad del agua es una actividad importante para la toma de decisiones ya que el disponer de esta información en forma rápida y oportuna nos permitirá evitar posibles problemas de mortalidad y estrés en el organismo [5].

En la actualidad, métodos eficientes para la evaluación de la calidad del agua son necesarios para el establecimiento de mecanismos capaces de gestionar la concentración de contaminantes, evitando el estrés y muerte en los organismos sensibles, como es el caso de esta especie sumamente nerviosa y frágil que es muy susceptible a cambios en el ambiente.

La necesidad de técnicas apropiadas en este campo es claramente notable, como aquellos estudios de los parámetros ambientales en la gestión del agua, proporcionando una interpretación completa de cada parámetro. Algunas metodologías para la evaluación y seguimiento de los contaminantes del agua han sido aplicadas por organizaciones internacionales como la Fundación Nacional de

Saneamiento en EE.UU. [6], el Ministerio del Consejo Canadiense del Medio Ambiente [7], y la SEMARNAT en México [8]. Estas instituciones se han encargado del desarrollo de algunas metodologías para la evaluación de la calidad del agua en diferentes escenarios. La mayoría de ellos han sido realizados por la normalización de los parámetros de acuerdo con alguna interpretación de buenas o malas concentraciones contaminantes.

En 1970, Brown, McClelland, Deininger y Tozer, apoyados por la National Sanitation Foundation de los Estados Unidos de Norteamérica, proponen un índice conocido como Índice de Calidad de Agua de la NSF (NSWKI) [6] [9]. Este índice es el más empleado en la valoración de la calidad de las aguas superficiales para consumo humano a nivel mundial. Otro modelo orientado para el consumo humano es propuesto por Dinius (1972). Este trabajo también se le utiliza para diferentes fines como son la agricultura, pesca e industria [10]

Por otro lado, en [11] la Autoridad Ambiental del Estado de Sao Paulo, Brasil (CETESB) realizó una adaptación para ríos tropicales utilizando el índice propuesto por la Nacional Sanitation Foundation (NSF), el cual se desarrolló mediante consulta de expertos en el tema y teniendo como determinante la utilización para abastecimiento público. En [12] se ha desarrollado un índice de la calidad del agua para la evaluación de agua potable (Scatterscore index), que se utiliza en los Estados Unidos de América. Un Índice de Calidad del Agua de Ríos [13], se utiliza para evaluar la contaminación multiplicando una función de agregación de valores estandarizados y mediante el uso de un conjunto de parámetros del agua. En [14], un Índice de Calidad del Agua para la Vida de agua dulce, ha propuesto la clasificación de parámetros de calidad del agua en los cuerpos de agua en Canadá. Como se puede observar, el índice NFS puede ser adaptado y modificado parcialmente acuerde a los parámetros involucrados en la medición de cada sistema acuático en particular. No obstante, aunque estos modelos han sido desarrollados para la evaluación de agua dulce, resultan incompatibles para la evaluación del cultivo del pez blanco, ya que se desconoce gran parte de los parámetros ambientales para el óptimo crecimiento y reproducción en sistemas controlados.

Como se mencionó anteriormente, los modelos para la evaluación de la calidad del agua están orientados al agua dulce, salada y potable. Sin embargo, la necesidad de desarrollar nuevos modelos para la evaluación de los sistemas de cultivos de pez blanco es una tarea importante con el fin de preservar esta importante especie que cada día es más escasa en su ambiente natural.

Por esta razón, este trabajo propone el desarrollo de un modelo computacional para la evaluación de la calidad del agua de cultivos del pez blanco, empleando un análisis de pesos los cuales están directamente relacionados con la importancia que tienen los parámetros medioambientales en el desarrollo del pez. Como resultado, se espera un descenso en las tasas de mortalidad y la reducción de niveles de estrés en el organismo, para así obtener sistemas de cultivo más sanos y productivos.

El resto del presente trabajo se organiza de la siguiente manera: el capítulo 2 hace referencia a los conceptos fundamentales para el entendimiento de la calidad del agua en sistemas acuícolas. El capítulo 3 explica el modelo computacional desarrollado para la medición y análisis de los parámetros ambientales para la evaluación de la calidad del agua. El capítulo 4 muestra los resultados experimentales obtenidos de mediciones reales empleando el modelo propuesto. Finalmente, el capítulo 5, expone las conclusiones de este trabajo.

## **2. Requerimientos de la calidad del agua**

### **Ecosistema del *Chirostoma estor***

Lago de Pátzcuaro se encuentra en la parte oeste de la meseta volcánica central de México, a unos 50 km al este-sureste de Morelia (figura 1) [15]. Es uno de los más grandes e importantes lagos naturales por sus actividades económicas, pesqueras, ecológicas, históricas, sociales y culturales.

En este hábitat existen diversas especies endémicas como el pez blanco (*Chirostoma estor*), charal prieto (*C. attenuatum*), *C. grandocule* (*C. patzcuaro*) el acúmara (*Algansea lacustris*), la chegua (*Allophorus robustus*), el tiro (*Goodea atripinnis*) y una especie de ajolote (*Ambystoma dumerilii*), entre otros.

El pez blanco (*Chirostoma estor*) representa la principal fuente de ingresos y de

empleo debido a que la gente de esta región depende casi exclusivamente de la pesca, por esta razón se encuentra en peligro de extinción, aunado al deterioro del ambiente y a la alta demanda en el mercado local y regional [1]. Se debe sumar a esto, la contaminación del lago debido a la descarga de agroquímicos, aguas residuales de origen doméstico, eutrofización, asolvamiento, la deforestación y la erosión de los bosques que lo rodean [16].



Figura 1 Ubicación del sitio de muestreo de datos en Pátzcuaro, Michoacán.

Teniendo en cuenta la importancia del pez blanco, organizaciones gubernamentales como la estación de Limnología de Pátzcuaro INAPESCA [8] y el IMTA [17], han llevado a cabo varios estudios sobre este problema, recalcando la necesidad de resolver los problemas ambientales que persisten en este lago. Vale la pena mencionar que el INAPESCA es el único instituto mexicano de investigación pesquera y acuícola con cobertura nacional, que entre sus atribuciones tiene el desarrollo de tecnologías para el cultivo de especies nativas.

### Requisitos medioambientales

La calidad del agua se basa en los resultados de las pruebas de toxicidad. Estas pruebas miden las respuestas de los organismos acuáticos a cantidades definidas de compuestos específicos [3], [18]. Cada especie acuática tiene

diferentes niveles de tolerancia de parámetros tóxicos; en el presente trabajo se analizan las características del *Chirostoma estor* (pez blanco).

En los sistemas de acuicultura extensiva e intensiva en México, los parámetros físico-químicos son monitoreados en diferentes frecuencias de acuerdo a las necesidades del sistema de cultivo [19]. Para el *Chirostoma estor*, el oxígeno disuelto, temperatura y pH son monitoreados diariamente debido a que representan los parámetros más críticos para esta especie y se utilizan como base para este trabajo. Los análisis semanales se realizan para los nitratos, turbidez y el amoníaco no ionizado, entre otros.

La mayoría de los organismos acuáticos se han adaptado a vivir en un estrecho intervalo de temperatura y mueren cuando la temperatura es demasiado baja o alta. La temperatura afecta su metabolismo, reproducción y crecimiento. Los contaminantes se vuelven más tóxicos a temperaturas más altas [20]. El pH es la medida de los iones de hidrógeno en el agua: hidrógeno e iones hidroxilo. Cuando hay un número igual de ambos, el pH es neutro. Cuando los iones de hidrógeno aumentan, el agua se vuelve más ácida; Por el contrario, cuando los iones hidroxilo incrementan, el agua se convierte en básica. La mayoría de los organismos acuáticos tienen un estrecho margen de tolerancia de pH, en este caso es de 6.5 a 8.5 unidades [21].

Por último, el oxígeno disuelto (DO) es uno de los parámetros más importantes, porque la mayoría de los organismos acuáticos lo necesitan para sobrevivir. El oxígeno disuelto entra en el agua a través de la lluvia, la turbulencia, el viento y por las plantas acuáticas fotosíntesis. Las aguas con concentraciones de oxígeno disuelto alto generan los ecosistemas con mayor estabilidad [22].

Los parámetros físico-químicos suelen tener comportamientos muy inestables o de constante cambio. La combinación entre parámetros fuera de sus niveles óptimos puede desestabilizar el ecosistema. Es importante definir los niveles mínimos y máximos permitidos para cada uno de ellos. Asimismo, los valores óptimos para un parámetro ambiental pueden definirse dentro de un rango de medición; valores fuera de éste puede representar problemas en la calidad del agua (tabla 1).

Tabla 1 Rangos definidos para buen manejo de calidad del agua en estanques de cultivo.

Parámetros	RANGOS		
	Bajo	Normal	Alto
Temperatura (°C)	0 – 15	15 - 24	24 - ∞
Oxígeno disuelto (ppm.)	0 – 4.5	4.5 - ∞	-----
pH	0 – 7	7 – 8.5	8.5 - 11

### Niveles de la calidad del agua

En este trabajo, el estado de la calidad del agua se ha categorizado en 4 diferentes niveles de evaluación, mismos que se describen a continuación:

- *Excelente*: Los parámetros físico-químicos se encuentran en los intervalos óptimos.
- *Buena*: Un parámetro arroja concentraciones fuera del rango óptimo; sin embargo, esta situación no es perjudicial para la especie por lo que la amenaza es mínima.
- *Regular*: Algunos parámetros reportan concentraciones fuera del rango óptimo, y la combinación entre ellos representa ciertos niveles de estrés en el pez blanco.
- *Mala*: La calidad del agua es peligrosa para el pez blanco. Las concentraciones de los parámetros están fuera de los intervalos óptimos o un parámetro crítico presenta concentraciones que podrían generar una situación de peligro potencial en la salud del pez incluso la muerte (Ej. concentraciones extremadamente bajas de oxígeno, concentraciones altas de pH, etc.).

### 3. Modelo basado en prioridades para la evaluación de la calidad del agua

En este trabajo, un modelo basado en pesos derivados de prioridades se utiliza con el fin de analizar la condición de la calidad del agua en los cuerpos de agua dulce, donde habita el pez blanco (*Chirostoma estor*). En este caso, nuestra hipótesis supone que los parámetros de calidad del agua pueden ser evaluados utilizando como referencia la contaminación o sus niveles óptimos, y así, calcular

una puntuación global mediante la agregación en un Índice de Calidad del Agua (ICA).

En la literatura, diferentes modelos para la calidad del agua se han desarrollado, sin embargo, solamente contemplan el uso de un límite en donde los contaminantes no excedan un nivel de concentración [23-27]. Por lo que en este trabajo se propone la modificación de dichos indicadores para la evaluación de niveles óptimos de medición, en donde los parámetros de la calidad de agua pueden tener definidos límites permitidos en altas o bajas concentraciones según sea el caso. Por lo tanto, el modelo propuesto se expresa de manera general mediante ecuación 1.

$$WQI = 1 - \gamma \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (1)$$

Donde  $WQI$  es el índice de la calidad del agua,  $n$  es el número de parámetros evaluados,  $\gamma$  es el factor de normalización,  $W_i$  es la ponderación (peso asignado) a cada variable incorporada, la cual corresponde a su repercusión en la capacidad del agua para sostener la vida acuática en los estanques de cultivo. Estos factores de ponderación se ajustaron con base en los pesos del ICA-NSF [6]: oxígeno disuelto (0.17), temperatura (0.1) y pH (0.11).  $I_i$  Es el índice de parámetro particular que se puede obtener para la temperatura y el pH con ecuación 2.

$$I_i = \left| \frac{C_i - m_i}{C_s - m_i} \right| \quad (2)$$

Donde  $C_i$  es la concentración del parámetro,  $C_s$  es el límite mínimo o máximo permitido del parámetro correspondiente (cualquiera de estos dos) y  $m_i$  es el punto medio del nivel permisible. Por citar un ejemplo, para el parámetro de temperatura ( $Temp$ ), el rango óptimo se encuentra entre 15 y 24 °C (tabla 1).  $C_i$  Será el valor arrojado por el medidor,  $C_s=24$  ó 15 y  $m_i= 19.5$ .

Como se mencionó anteriormente, el cálculo de  $I_i$  para el pH y la temperatura se obtiene mediante la ecuación 2, para el  $I_i$  del oxígeno disuelto se calcula con ecuación 3.



$$I_i = 1 - \frac{C_i}{C_s} \quad (3)$$

Se emplea una fórmula diferente, ya que en el oxígeno disuelto no se manejan rangos de *bajo*, *normal* y *alto*, éste solo se rige por *bajo* y *normal*, teniéndose un solo límite permitido y cuando la concentración es baja, el indicador tiende a evaluar negativamente. Por último, normalizamos los valores con ecuación 4.

$$Y = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

El índice desarrollado tiene un rango que varía entre valores de [0 – 1], en donde 0 significa una mala calidad del agua y 1 una excelente evaluación. Los rangos intermedios de la calidad del agua *bueno* (0.334) y *regular* (0.634) se establecen dentro del mismo rango.

## 4. Resultados Experimentales

### Fuentes de datos

Con el fin de estimar el índice WQI este se llevó a cabo con datos reales, los conjuntos de datos de las mediciones ambientales se efectuaron a partir de las bases de datos de estanques intensivos controlados desde CRIP-INAPESCA en Pátzcuaro. El conjunto de datos del medio ambiente se compone de 2318 registros (temperatura, oxígeno disuelto y pH) con un periodo de 1 hora entre las mediciones; lo que hace un total de 24 mediciones diarias de monitoreo registrado, figuras 2, 3 y 4.

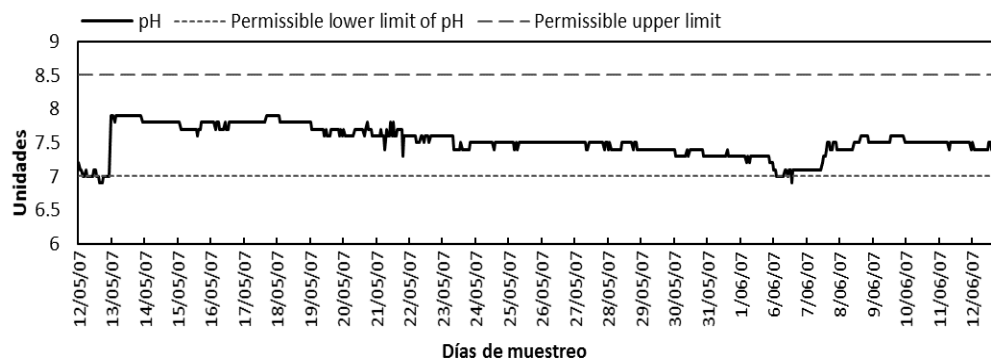


Figura 2 Medición unidades PH.

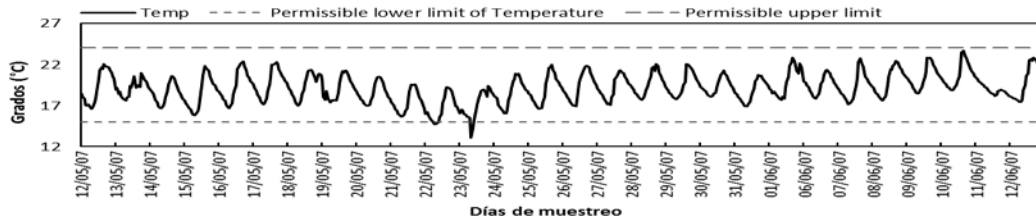


Figura 3 Medición temperatura.

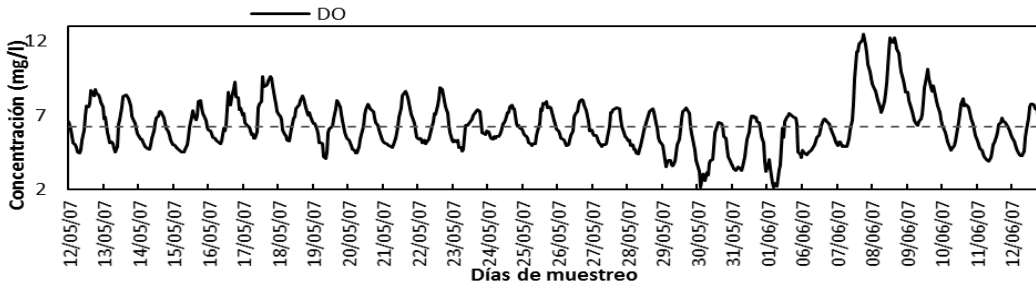


Figura 2 Medición concentración de oxígeno disuelto.

En las figuras 2, 3 y 4 se pueden observar las variaciones diarias. El oxígeno disuelto y temperatura muestran valores fuera de los niveles óptimos, mismos que afectarán directamente la evaluación del WQI.

### Evaluación de Parámetros

Para realizar un análisis eficiente de acuerdo con [28], el tamaño mínimo de la muestra que se usará se calcula mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (N - 1)) + k^2 * p * q} \quad (5)$$

Donde N determina el tamaño de la población (9312), k es una constante que regula el nivel de confianza, donde un 99% se calcula con una  $k = 2,58$ ; e define el margen de error (5%) y para la designación de la diversidad del universo, la heterogeneidad ( $p = q = 0,5$ ). En este caso, se requieren 621 muestras; sin embargo, un mes contiene 720 muestras, por lo que el análisis del mismo es suficiente para cumplir este requisito.

En la figura 2, se observan bajas variaciones diarias en el pH, donde el parámetro presenta mayormente concentraciones dentro del nivel óptimo. En las figuras 3 y

4, se muestran las variaciones diarias de temperatura y oxígeno disuelto. En este caso, los valores de ambos parámetros caen dentro y fuera de los niveles óptimos, lo cual afectará la evaluación del estado de la calidad del agua.

En este caso, el pH no representa problemas para la calidad del agua en contraste con el oxígeno disuelto. Las temperaturas diarias tenían grandes variaciones que dependen de la cobertura de nubes, el viento y la radiación solar.

El oxígeno disuelto mostró un comportamiento similar al de la temperatura debido al efecto de la radiación solar, cuando ésta aumenta, la actividad de las algas genera altas concentraciones de oxígeno disuelto. Cuando la radiación solar disminuye, una reducción de temperatura está presente en los estanques y un efecto de demanda de oxígeno es generado por las algas y el consumo organismo. Así, el oxígeno disuelto podría caer por debajo 3 o 4 mg / l, lo que representa una situación perjudicial para los organismos.

### Evaluaciones de la calidad del agua

Una serie de pruebas experimentales se proponen empleando el conjunto datos previamente adquirido. Se puede observar (figura 5) los índices obtenidos según la NFS y el modelo propuesto, se puede percibir que ambos siguen un comportamiento similar, debido a que los factores de ponderación empleados en el modelo propuesto (WQI) se ajustaron con base en los pesos del ICA-NSF.

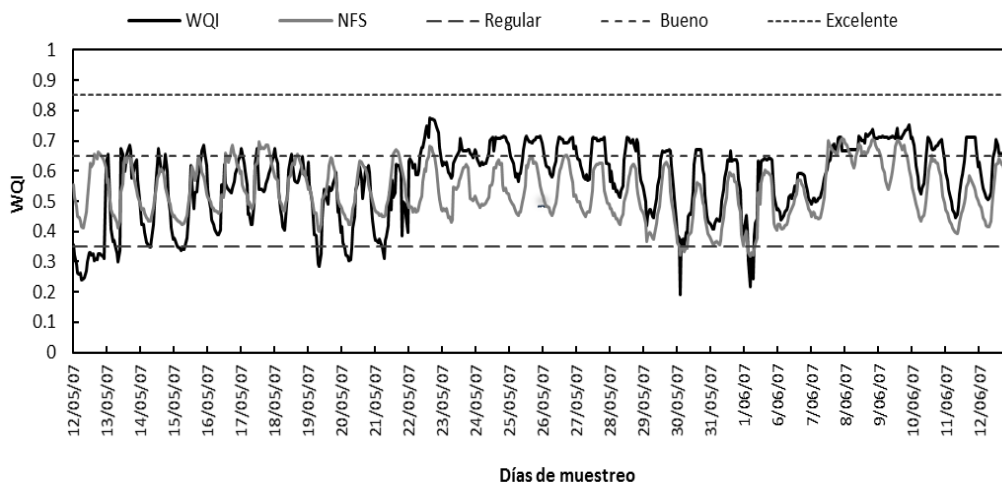


Figura 5 Comparación índices de calidad del agua en estanques de cultivo del pez blanco.

Enfocándonos en WQI podemos notar que los resultados presentes, muestran mediciones que fluctúan entre los estados *regular* y *bueno*. Estas variaciones son principalmente generadas por el oxígeno disuelto que en este caso, resultó ser la variable con el mayor peso asignado según la NSF [6]. En segundo lugar, se encuentra la temperatura que, al variar durante el día, afecta de la misma forma el índice de la calidad del agua. El pH se mantiene más estable por lo general, sin desestabilizar el ecosistema considerablemente. Debido a este comportamiento, se le asignó un peso menor. Se puede observar que en general la calidad del agua se sostuvo en un nivel aceptable, sin embargo, si los parámetros medioambientales pudieran controlarse de mejor forma, generaría estados más propicios para un buen crecimiento del pez blanco. La figura 6 muestra la interfaz de usuario desarrollada para realizar las evaluaciones de la calidad del agua. Finalmente, el indicador propuesto muestra mediciones más ajustadas al cultivo de pez blanco, toda vez que el NSF fue diseñado para analizar cuerpos de agua dulce en general (ríos, lagos, agua potable, etc.) y el WQI propuesto fue diseñado y ajustado a los requerimientos de cultivo del pez blanco, así como para la detección de posibles anomalías generadas por estados no deseados de la calidad del agua en el sistema de cultivo.

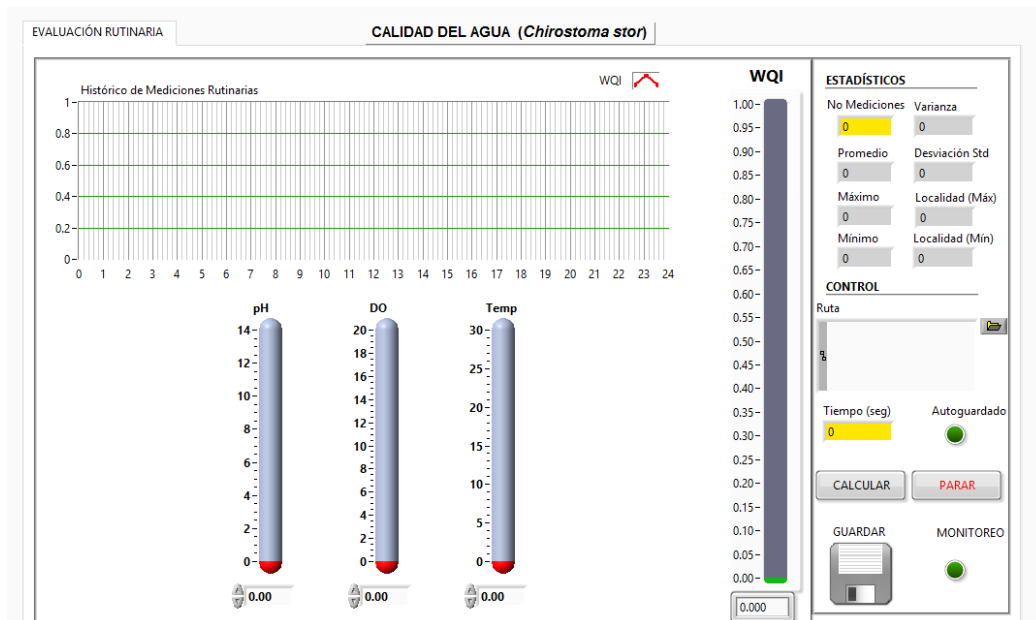


Figura 6 Interfaz gráfica para el cálculo de la calidad del agua en estanques del CRIP.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo, un nuevo modelo computacional basado en prioridades para el cálculo del índice de calidad del agua se ha propuesto como una forma de evaluar los parámetros más importantes de calidad de agua, oxígeno disuelto, pH y temperatura. Dichas prioridades representan la interacción de los parámetros medioambientales con el hábitat de producción del pez blanco. Asimismo, este modelo fue creado de acuerdo a los requerimientos de calidad el agua del pez blanco implementadas en CRIP, Pátzcuaro. El modelo desarrollado proporcionó una completa integración de todas las evaluaciones particulares en el ecosistema proporcionando un indicador global del buen o mal estado de la calidad del agua en la acuicultura de la especie. Los resultados experimentales obtenidos mostraron un buen desempeño en las evaluaciones de la calidad del agua, proporcionando una herramienta confiable en la toma de decisiones para el manejo del agua. Este sistema se propone como una herramienta de gran ayuda a la comunidad acuícola que estudia el ecosistema del pez blanco como una manera de preservar esta importante especie. El WQI propuesto puede aplicarse a organismos similares mediante el ajuste de los parámetros de límite óptimos, siempre y cuando las condiciones del ecosistema sean muy similares. Es importante remarcar, que aunque el sistema representa una plataforma tecnológica de alta especialidad para el área destinada, existen mejoras que se pueden ser planeadas como un trabajo futuro, tales como analizara e integrar al sistema otros parámetros medioambientales que pudieran ser fundamentales en el estudio del pez blanco.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] C. Rojas, "El pez blanco". Revista Digital Universitaria, INAPESCA. Vol. 6. Num. 8. 2005.
- [2] C. Boyd, Whitefish pond effluents: observations of the nature of the problem on commercial farms, Proceedings of the Special Session on Whitefish Farming, World Aquaculture Society, USA. 1992.

- [3] Y. Chien, Water quality requirements and management for marine Whitefish culture. Proceedings of the Special Session on Whitefish Farming. World Aquaculture Society, USA. 1992. Pp. 144 – 156,
- [4] J. Cohen, T. Samocha, J. Fox, “Characterization of water quality factors during intensive raceway production of juvenile *Litopenaeus vannamei* using limited discharge and biosecure management tools”. *Aquacultural Engineering*, Elsevier. Vol. 32. 2005. Pp. 425–442.
- [5] H. Kenneth, *Water Quality Prediction and Probability Network Models*. 1999. North Carolina State University. Pp.87-105,
- [6] [NSF] National Sanitation Foundation International. <http://www.nsf.org>. August 2007.
- [7] CCME] Canadian Council of Ministers of the Environment (Canada). <http://www.ec.gc.ca/soer-ree/N>. August 2007].
- [8] [SEMARNAP], Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2006. NOM-001-ECOL-1996.
- [9] M. Castro, J. Almada, J. Ferrer, D. Díaz, “Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global”. *Ingeniería Solidaria*. Vol. 10. N.º 17. Dic. 2014. Pp. 111-124.
- [10] N. Samboni, E. Y. Carvajal, J. Escobar, “Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua (A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators)”. *Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia*. Vol. 27. No.3. Pp. 172-181.
- [11] Portal Regional para la Transferencia de Tecnología y la acción frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. <http://www.cambioclimatico-regatta.org/index.php/es/>.
- [12] *Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report Prepared and published by the United Nations Environment Programme Global Environment Monitoring System (GEMS)/Water Programme*. 2007.

- [13] Department of Ecology State of Washington, River and Stream Water Quality Index, Quality Management Plan. 2010.
- [14] Environment and climate change Canada, Freshwater Quality in Canadian Rivers, 2015.
- [15] P. Bradbury, "Limnologic history of Lago de Patzcuaro, Michoacan". Mexico for the past 48,000 years: impacts of climate and man, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Volume 163. Issues 1. 2000. Pp. 69–95.
- [16] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://www.imta.gob.mx/quienessomos>.
- [17] O. Páez, Camaronicultura y Medio Ambiente. Instituto de Ciencias del mar y Limnología. 2001. UNAM. México. Pp. 271-298.
- [18] W. Ocampo, N. Ferré, J. Domingo, M. Schuhmacher, "Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study". Environment International. Vol 32. Elsevier. 2006. Pp. 733-742.
- [19] M. M. Carro, J. I. Dávila, A. G. Balandra, R. H. López, R. H. Delgadillo, J. S. Chávez, L. B. Inclán. "Importance of diffuse pollution control in the Patzcuaro Lake Basin in Mexico". Water Science and Technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research. 2008.
- [20] M. Banna, H. Najjaran, R. Sadiq, S. Imrah, M. Rodriguez, M. Hoorfar, "Miniaturized water quality monitoring pH and conductivity sensors, Sensors and Actuators" B: chemical. Vol 193. 2014. Pp. 434-441
- [21] R. Bailey, M. Ahmadi, "Spatial and temporal variability of in-stream water quality parametre influence on dissolved oxygen and nitrate within a regional stream network". Ecological Modelling. Vol.277. 2014. Pp. 87-89.
- [22] L. Gomes, D. Antunes, M. Rui, D. Oliveira, "Hydrodynamics and water quality modelling in a regulated river segment: application on the instream flow definition". Ecological Modelling. Volume 173. Issues 2–3. 2004. Pp. 197–218.
- [23] G. Sallam, E. Elsayed, Estimating relations between temperature, relative humidity as inepended variables and selected water quality parametres in Lake Manzala, Egypt, Ain Shams Engineering Journal. 2015.

- [24] N. Giljanovic, "Water quality evaluation by index in Dalmatia". *Water Research*. Vol. 33. No. 16. 1999. Pp. 3423–3440.
- [25] B. Prasad, J. Bose, "Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a lime stone mining area of the lower Himalayas". *Environmental Geology*. Vol. 41. 2001. Pp. 183–188.
- [26] A. Bardalo, W. Nilsumranchit, & K. Chalermwat, "Water quality and uses of the Bangpakong river". Eastern Thailand. *Water Research*. Vol. 35. Issue 15. 2001. 3635–3642.
- [27] A. Martínez, J. Muñoz, A. Pascual, *Tamaño de muestra y precisión estadística*, Ciencia y Tecnología. 2004. Universidad de Almería.

## **7. Autores**

Ing. Midory Esmeralda Viguera Velázquez es alumna egresada de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Actualmente es estudiante de la maestría Ciencias de la Computación del Centro de Investigación en Computación – IPN, México. Sus líneas de interés son: Programación, Lógica Difusa y Redes Neuronales.

Dr. José Juan Carbajal Hernández es egresado del Doctorado en Ciencias de la Computación del Centro de Investigación en Computación – IPN, México en 2011. Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadores del CONACyT, México. Sus actuales líneas de interés incluyen Electrónica, Instrumentación Analógica y virtual, Reconocimiento de Patrones, Lógica Difusa y Redes Neuronales.

M.C. Margarita Hernández Martínez, es egresada de la licenciatura y la maestría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente es investigadora Titular C, y responsable del Laboratorio de Acuicultura en el Centro Regional de Investigación Pesquera del Instituto Nacional de Pesca. Actualmente se desempeña en el desarrollo tecnológico de especies nativas del Lago de Pátzcuaro, así como en el área de sanidad acuícola en cultivos de peces marinos.

Dr. Luis Pastor Sánchez-Fernández realizó su doctorado en Ciencias Técnicas por



el Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" de la Habana, Cuba (1998). Profesor-Investigador del Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional, México, DF. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México. Sus intereses de investigación incluyen: Instrumentación virtual, Medición y Procesamiento Inteligente de Variables Físicas, Reconocimiento de Patrones, Medición y Sistemas de Control.

Los autores del presente trabajo agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional bajo el apoyo del Estímulo Institucional de Formación de Investigadores derivado del proyecto no. 20150690 y 20160880.