

Diagnóstico de la Calidad del Agua en Estanques de Cultivo de Camarón Mediante el uso de Redes Neuronales

José Juan Carbajal Hernández y Luis Pastor Sánchez Fernández.

*Centro de Investigación en Computación – Instituto Politécnico Nacional. Av. Juan de Dios Bátiz s/n, Nueva. Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero, México D.F., C.P. 07738, México.
E-mail: {jcarbajalh, lsanchez}@cic.ipn.mx*

Resumen: la camaronicultura es una actividad que se practica en todo el mundo, en donde la imitación del ecosistema es esencial para un buen cultivo del camarón. El desequilibrio de los parámetros involucrados en la calidad del agua representa un problema en la reproducción y crecimiento de los organismos. Este trabajo presenta un nuevo modelo computacional para el diagnóstico de la calidad del agua, empleando un sistema neurodifuso. Este permite establecer una relación directa y no lineal entre la dinámica del ecosistema y los diferentes estados de la calidad del agua (excelente, bueno, regular y deficiente). Los resultados finales muestran un buen desempeño del modelo propuesto, convirtiéndose en una alternativa para el correcto manejo del agua en granjas camaronícolas.

Palabras clave: calidad del agua, redes neuronales, acuicultura, inteligencia artificial, camarón.

1. INTRODUCCIÓN

México es uno de principales productores de camarón a nivel mundial. La mayor parte de las granjas de cultivo destinada a especies de camarón se ubican en zonas costeras de país, representado una actividad comercial de gran importancia en la economía nacional. Los sistemas de cultivo acuícola se caracterizan por ser de diferentes intensidades y tamaños, tales como intensivos, semi-intensivos y extensivos; siendo estos últimos en los que se enfoca este trabajo de investigación.

La capacidad de reproducción y crecimiento del camarón está influenciada directamente por los valores y niveles de concentración de parámetros medioambientales que se encuentran involucrados en el ecosistema del organismo. De esta manera, idealmente un sistema en perfecto equilibrio será aquel que permita las tasas de producción más elevadas en una granja camaronícola (Casillas et al., 2007; Páez, 2001; Clifford, 1994). Es por esto, que el correcto diagnóstico de la calidad del es de vital importancia en el manejo de cultivos de cualquier tipo.

La supervisión constante de los parámetros involucrados en el ecosistema del camarón, permite detectar situaciones no deseadas que afecten el correcto desarrollo del organismo. Estándares nacionales e internacionales han sumado esfuerzos para dictar los requerimientos mínimos necesarios para un buen cultivo acuícola, definiendo criterios y límites permitidos para la práctica de la acuicultura; entre ellos se pueden mencionar a la U.S. National Sanitation Foundation (NFS, 2012), Canadian Council of Environmental Ministers (CCME, 2012), la Agencia Catalana del Agua, España (ACA, 2012), la Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales, México (SEMARNAT, 2012) y el Instituto Nacional de Ecología, México (INE, 2012).

En la actualidad, diferentes trabajos se han desarrollado para la correcta evaluación de la calidad del agua en la acuicultura, enriqueciendo el estado del arte y desarrollando nuevos modelos en los que se involucran diferentes parámetros medioambientales como los propuestos por Beltrame et al (2010), Carbajal et al. (2012), Carbajal et al. (2013), Simoes et al. (2012), Islam et al. (2004), y Riss et al. (2002). Adicionalmente, diversas investigaciones han servido como fuente complementaria para este trabajo, mediante los cuales se maneja información relevante sobre el comportamiento y criterios a seguir en el manejo de la calidad del agua, basándose en diferentes sistemas de acuicultura. Dichos trabajos han sido propuestos por Gharibi et al. (2012), Ramesh et al. (2010), Lermontov et al. (2009) y Gutiérrez et al. (2006).

La aplicación de herramientas para el modelado del medioambiente como la inteligencia artificial, ha sido cada vez más empleada para la solución de este tipo de problemas, debido a que permite modelar con mayor precisión la dinámica del ecosistema. Alternativas como el uso lógica difusa (Gutiérrez et al., 2006), procesos analíticos jerárquicos (Carbajal et al, 2012), modelos auto-regresivos (Carbajal et al., 2011), redes neuronales (Shen et al., 2009; Lek et al., 1999) y máquinas de soporte vectorial (Liu et al., 2014) entre otros, han sido ampliamente utilizados en análisis medioambientales, por lo que su empleo en el ecosistema del camarón permitirá desarrollar nuevas herramientas de evaluación y de mayor precisión.

Este trabajo propone el desarrollo de un nuevo modelo computacional basado en un sistema neurodifuso para la evaluación de la calidad del agua en estanques de cultivo de camarón, específicamente para la especie "Litopenaeus vanammei", debido a que es una de la más comercializada en el mercado nacional. Nuestra hipótesis se basa en que las redes neuronales permitirán clasificar diferentes situaciones no deseadas en el ecosistema mediante

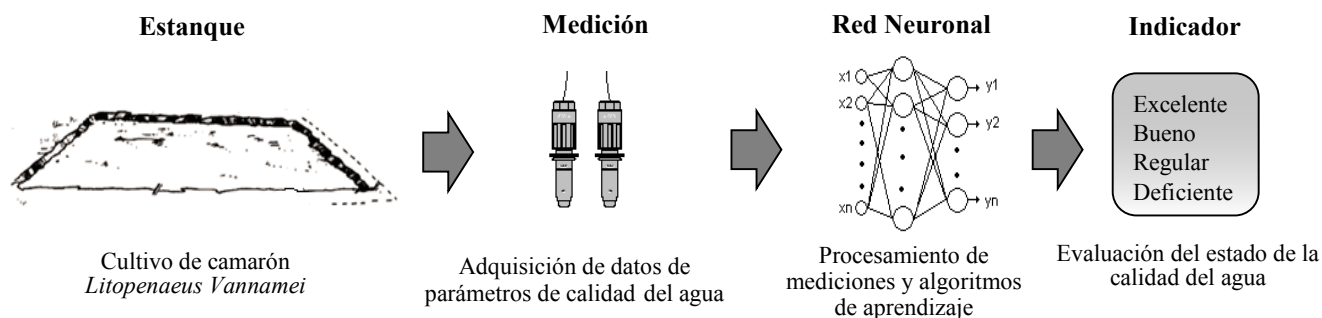


Fig. 1. Diagrama sobre el funcionamiento del sistema de monitoreo y evaluación de la calidad del agua.

la relación no lineal de los parámetros que se involucran en el diagnóstico de la calidad del agua. De esta manera, el modelo propuesto ayudará en la clasificación de los diferentes estados de la calidad del agua (*excelente, bueno, regular y deficiente*), mediante el empleo de los parámetros de la calidad del agua de mayor impacto en el ecosistema acuícola de la especie a estudiar.

El resto de este trabajo se ha organizado de la siguiente forma: en la sección 2, se presenta una introducción sobre los parámetros de la calidad del agua, en donde las características y selección de aquellos con mayor impacto se explica detalladamente. En la sección 3 se menciona la construcción del modelo neuronal para la clasificación de la calidad del agua. En la sección 4 se describen las pruebas experimentales, mostrando una comparación del índice propuesto contra aquellos empleados comúnmente en el área de la camaricultura. Finalmente en la sección 5, se explican las discusiones y conclusiones del presente trabajo.

2. REQUERIMIENTOS DE LA CALIDAD DEL AGUA

La dinámica del ecosistema del camarón es muy cambiante debido a que durante un día, los cambios de temperatura y reacciones químicas del estanque producen cambios considerables en la dinámica del sistema. Por lo general, existen condiciones desfavorables en el hábitat del organismo que de no supervisarse adecuadamente pueden agravarse y desestabilizar todo el sistema de cultivo. Debido a esto, es indispensable conocer qué parámetros de la calidad del agua monitorear y con qué frecuencia, esperando establecer criterios en el manejo de la calidad del agua a fin de evitar posibles situaciones dañinas para el organismo. Adicionalmente, es necesario establecer mecanismos de valoración del ecosistema en general, permitiendo cuantificar la calidad del agua en dependencia de aquellos parámetros más críticos o cambiantes (Casillas et al., 2007; Páez, 2001). En la Fig. 1 se muestra el diagrama del proceso en que se miden los parámetros de la calidad del agua y se procesan mediante el sistema neuronal.

Dentro del ecosistema del camarón, existen parámetros de mayor impacto. Estos deben monitorearse con mayor frecuencia debido a que desestabilizan el ecosistema más fácilmente que otros, generando el conjunto de parámetros más importante dentro de la evaluación de la calidad del agua (Tabla 1). Adicionalmente, existen parámetros que desestabilizan en menor medida al ecosistema o que pueden ser controlados mediante algún otro parámetro de mayor

importancia (p. ej. el amonio no ionizado se monitorea mediante el pH), tales parámetros no requieren una frecuencia elevada de medición o bien, se miden cuando se requiere un análisis más detallado sobre la calidad del agua (Casillas et al, 2007; Boyd, 2000; Martínez, 1994; Chien, 1992). Por lo tanto, el monitoreo constante de los parámetros de mayor impacto permitirá tener un mejor y más rápido control sobre la calidad del agua en el ecosistema. Los efectos que generan los parámetros de calidad del agua monitoreados diariamente son estudiados y supervisados, su importancia en el cultivo de camarón se enuncia en la Tabla 2.

La dinámica del ecosistema del camarón es afectada principalmente por los cambios constantes en las concentraciones y valores de los parámetros de la calidad del agua. Debido a esto, es necesario identificar aquellos parámetros que afectan principalmente a la calidad del agua (oxígeno disuelto, pH, temperatura y salinidad), y que a su vez puedan desestabilizar al ecosistema generando situaciones peligrosas para el organismo. Por lo tanto, es necesario definir los límites que son aceptables para el adecuado manejo de la calidad del agua; así como también los diferentes niveles de niveles en que se clasifican dichos parámetros y que se relacionan directamente con algún estado de la calidad del agua (Tabla 1).

Estado de la calidad del agua

La calidad del agua puede definirse en cuatro estados, mismos que describen el comportamiento general de los parámetros involucrados en el ecosistema del camarón como:

- 1. Excelente:** calidad óptima para el cultivo de la especie. Los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de los límites establecidos.

Tabla 1. Niveles de clasificación de las variables medioambientales.

Parámetros	Niveles				
	Hipoxia ¹ Acido ²	Bajo	Normal	Alto	Alcalino ²
Temp (°C)	N/A	0 – 23	23 – 30	> 30	N/A
Sal (mg/L)	N/A	0 – 15	15 – 25	> 25	N/A
Oxígeno D. ¹ (mg/L)	0 – 2	2 – 6	> 10	N/A	N/A
pH ²	0 – 4	4 – 7	6.5 – 9	9 - 10	10 - 14

Tabla 2. Parámetros de calidad del agua monitoreados diariamente y su importancia en el cultivo de camarón.

Parámetros	Importancia en Camaronicultura
Temperatura (Temp)	La temperatura tiene un efecto en los procesos químicos y biológicos en un estanque de cultivo. La temperatura controla la solubilidad de los gases en el agua, la velocidad de reacción química y la toxicidad del amonio. El rango ideal para la temperatura se considera de entre 25 a 32 °C (Chien, 1992; Boyd, 1989).
Oxígeno disuelto (DO)	La concentración mínima de oxígeno para mantener una tasa aceptable de sobrevivencia varía con el tiempo de exposición (Páez, 2001; Boyd, 1992). En concentraciones bajas de oxígeno disuelto, los camarones son más susceptibles a enfermedades. Cuando el porcentaje de saturación permanece por debajo de 5 ppm los camarones presentan bajas tasas de alimentación y crecimiento. Los valores mínimos recomendados por expertos oscilan de entre 4 y 5 ppm (Martínez, 1994; Chien, 1992; Boyd, 1992).
Salinidad (Sal)	Los organismos que viven en el agua, deben mantener sus líquidos vitales a cierta concentración iónica (salinidad) a la cual funcionen adecuadamente. Altas concentraciones de salinidad reducen los niveles de oxígeno disuelto en el agua del estanque. Las concentraciones óptimas de salinidad se presentan en los rangos de 15 a 23 ppt (Páez, 2001; Boyd, 1992).
pH	Cuando el pH tiene valores bajos o elevados, causa estrés en los organismos bajo cultivo. Las aguas que presentan un intervalo de pH entre 6.5 y 9.0 son las más apropiadas para la producción acuícola. La reproducción disminuye en valores inferiores a 6.5 o mayores a 9.0. Por debajo de 4.0 se presenta la muerte ácida y por encima de 11.0 la muerte alcalina. Concentraciones extremadamente bajas y altas de pH pueden generar un caparazón duro y baja sobrevivencia (Chien, 1992; Boyd, 2001).

- Bueno:** adecuado para el cultivo de la especie. Algunos parámetros fisicoquímicos presentan valores fuera de los límites permitidos; sin embargo, no representan problema alguno.
- Regular:** calidad no adecuada para el cultivo. Algunos parámetros presentan valores perjudiciales para el correcto crecimiento o reproducción del organismo.
- Deficiente:** calidad el agua no aceptable para el cultivo de la especie. Los parámetros medioambientales presentan valores peligrosos para el organismo.

Área de estudio y adquisición de datos

Con la finalidad de analizar y verificar los modelos propuestos para la calidad del agua, se realizaron una serie de mediciones empleando el conjunto de parámetros fisicoquímicos propuestos en este trabajo. Dicho proceso de adquisición de datos se realizó en las instalaciones de la granja camaronera “Rancho Chapo”, en Huatabampo, Sonora, México. Debido a que un pronto análisis puede realizarse con este conjunto, el monitoreo de éste se realizó mediante un grupo de sensores de pH (GF Signet 2717), oxígeno disuelto (GF Signet 2610), temperatura (LM35) y salinidad (GF Signet 2823). La automatización de las mediciones permitió evitar algunos errores de monitoreo como mediciones fuera de tiempo, mal posicionamiento de sensores o falta de mediciones. Se tomaron una serie de 4 muestras por hora, teniéndose por lo tanto una frecuencia de muestreo de 15 minutos. Asimismo, se empleó un periodo de cultivo de 4 meses (mayo – agosto, 2013) para generar una base de datos de alta resolución.

3. MODELO NEURONAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Las redes neuronales han sido ampliamente utilizadas para clasificar y establecer relaciones entre patrones (Sharma et al., 2003). En la actualidad, existen modelos de calidad del agua que son elaborados mediante ecuaciones lineales que describen la interacción entre parámetros (Beltrame et al. 2004; Carbajal et al. 2013; CCME, 2012). En este trabajo, se propone utilizar una red neuronal que permita capturar las

relaciones lineales y a su vez las no lineales del ecosistema, permitiendo así una evaluación más precisa de la calidad del agua.

Preprocesamiento

Las redes neuronales son clasificadores muy eficientes que son ampliamente utilizados en el área de reconocimiento de patrones. Sin embargo, tal eficiencia puede verse afectada por una mala selección de patrones en su etapa de entrenamiento. Debido a esto, resulta de gran importancia realizar un preprocesamiento para obtener una mejor clasificación (Principe et al., 2000).

El primer paso consiste en realizar un proceso de estandarización a los datos de entrenamiento, mismo que permitirá tener una media cero y unificar la desviación estándar mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$x_s = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

donde x es el parámetro físico-químico, \bar{x} es la media, σ es la desviación estándar y x_s es el parámetro estandarizado.

Asimismo, es necesario normalizar todo el conjunto de mediciones ya que aquellos parámetros con valores mayores que otros generan una mayor tendencia de decisión dentro de una red neuronal. Este proceso se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$x_n = \frac{x_s - \min(\overline{x_s})}{\max(x_s) - \min(x_s)} \quad (2)$$

donde x_n es la nueva variable normalizada.

Construcción del modelo de diagnóstico de la calidad del agua

El modelo para el diagnóstico de la calidad del agua se construye mediante una red neuronal por retropropagación (*backpropagation*). Debido a que se tienen 4 parámetros, éstos se emplean para alimentar a la red neuronal, obteniéndose como salida los diferentes estados de la calidad el agua, estableciendo así una relación no lineal entre dichos

parámetros y las diferentes condiciones del ecosistema. Dentro del conjunto de mediciones se categorizaron por estados de la calidad del agua, teniéndose cuatro clases (excelente, bueno, regular y deficiente). La salida o target se adecuó de acuerdo a la situación de la medición, ordenándose todo el conjunto de mediciones en superclases para un mejor entrenamiento. Asimismo, se simularon situaciones potencialmente dañinas ya que no se registraron durante el ciclo de cultivo. Posteriormente se procedió a entrenar la red neuronal. La cantidad de neuronas en las capas intermedias realizan la parte del procesamiento de la información, debido a que garantizan el correcto funcionamiento de la RNA. En realidad no existe regla alguna que permita identificar la cantidad de capas y neuronas en cada una de ellas; sin embargo, en éste trabajo una RNA con topología de [4, 20, 4] capas obtuvo excelentes resultados (Fig. 2).

La topología de la red neuronal fue determinada probando diferentes arquitecturas de redes, sin embargo ésta fue la que resultó con el mejor tiempo de procesamiento y respuesta de clasificación. Dentro de las diferentes arquitecturas se determinó que no existían diferencias significantes con redes de número mayor de neuronas en las capas ocultas, ni con mayor número de capas. La capa de entrada recibe el conjunto de mediciones previamente normalizadas y estandarizadas (concentraciones de los parámetros físico-químicos). La capa de salida clasifica el estado de deterioro del estanque (excelente, bueno, regular o deficiente). Asimismo, las arquitecturas con un número menor de capas o de neuronas no clasificaron adecuadamente. Durante el proceso de entrenamiento se requirieron alrededor de 500 iteraciones con un error MSE obtenido de 0.005%.

La salida de la red neuronal tiene cuatro variantes del estado la calidad del agua, por consiguiente las neuronas de salida son conectadas a una etapa de agregación, misma que emplea a un sistema difuso para la correcta integración de los resultados de cada neurona de salida. Esta etapa emplea un grupo de funciones difusas, las cuales han sido diseñadas dentro de un rango de [0, 1] como se muestra en la Fig. 3. No existe una regla definida para elegir un tipo de función difusa; sin embargo, las funciones lineales (trapezoidales en este trabajo) facilitan el proceso de agregación. Dichas funciones difusas pueden expresarse mediante la siguiente función:

$$\mu(x) = \max \left\{ \min \left\{ \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right\}, 0 \right\} \quad (6)$$

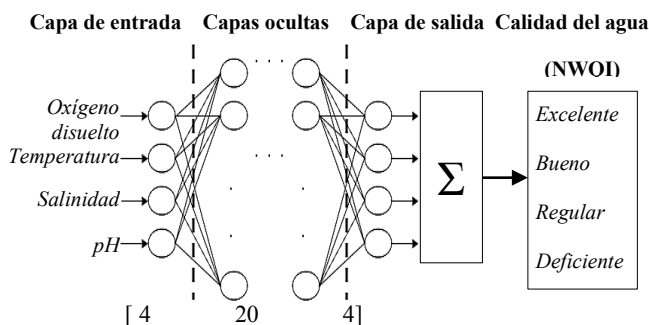


Fig. 2. Arquitectura de la red neuronal para clasificar la calidad del agua.

donde a, b, c y d son los parámetros que definen a la función triangular (ver Fig. 3).

El siguiente paso es la integración de las funciones de salida para el cálculo final del índice. Esto se realiza mediante el cálculo del centro de gravedad (centroide) de la función de agregación. La función centroide (CF) ha demostrado físicamente ser la más eficiente para transformar una función de salida difusa, debido a que regresa el centro del área bajo la curva formada por la agregación de dichas funciones (Chow, 1997). La función centroide (CF) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CF = \frac{\int x\mu(x)dx}{\int \mu(x)dx} \quad (7)$$

Debido a que el método de centro de gravedad calcula el centro del área de una función, el resultado final para CF está restringido desde centro de la función deficiente (0.078) hasta el centro de la función excelente (0.87), por lo que es necesario normalizar el valor final de CF para reajustarlo en un rango de [0, 1]; para hacer esta conversión se emplea la siguiente expresión:

$$NWQI = \frac{CF - \min(CF)}{\max(CF) - \min(CF)} \quad (8)$$

donde $NWQI$ (Neural Water Quality Index) es el índice normalizado.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con la finalidad de probar el sistema neurodifuso, el conjunto de mediciones monitoreado en el periodo de cultivo (ver sección 2) fue empleado para mostrar el funcionamiento del modelo propuesto. El conjunto en su totalidad comprende de 4900 muestras. En la Fig. 4, se puede apreciar el comportamiento de los parámetros medioambientales y los cambios que sufren en el ecosistema diariamente. Sin embargo, para fines ilustrativos, 1 semana es analizada empleando el índice propuesto (NWQI), comparada contra el índice propuesto por la CCME (2012) y el propuesto por Beltrame et al. (2004), que son empleados actualmente para realizar análisis similares de la calidad del agua (Fig. 5a).

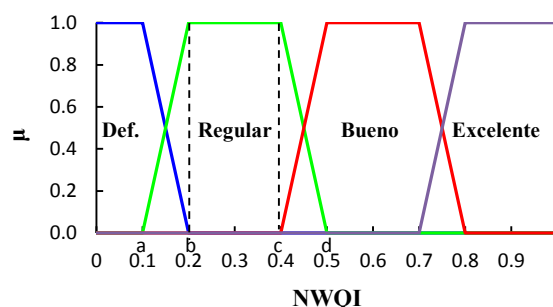


Fig. 3. Funciones difusas empleadas para integrar los resultados de las neuronas de salida de la RNA.

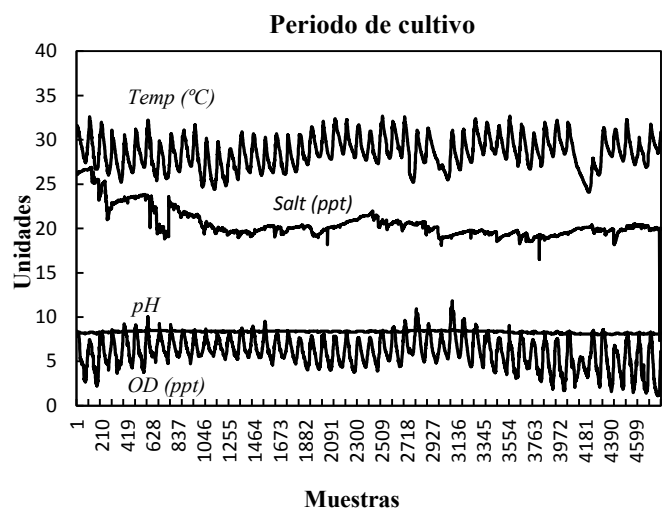


Fig. 4. Mediciones realizadas en estanques de Rancho Chapo, Huatabampo durante el mes de junio, julio y agosto (2013).

En la Fig. 5 el índice NWQI presenta una mayor penalización del resultado. Esto se puede explicar debido a que en la selección de muestras del conjunto de entrenamiento, se identificaron aquellas situaciones potencialmente dañinas para el organismo, pudiéndolas categorizar como un estado deficiente de la calidad del agua (ver la Tabla 1). Los resultados de la calidad del agua mostrados en la Fig. 5b pueden compararse contra el conjunto de mediciones mostradas en la Fig. 5a, donde las concentraciones de oxígeno disuelto por lo general presentan bajas concentraciones y los valores de temperatura son elevados, afectando el buen estado

de la calidad del agua. Asimismo, se puede observar que en donde los parámetros de la calidad del agua se acercan a los valores óptimos, el indicador muestra una tendencia a un mejor estado de la calidad del agua en el ecosistema.

5. CONCLUSIONES

El estudio de la calidad del agua ha sido ampliamente estudiada. Diversos trabajos ofrecen indicadores capaces de cuantificar el nivel de deterioro de la misma en diferentes cuerpos de agua; de entre ellos se pueden mencionar lagos, ríos y sistemas de agua potable. La mayoría de ellos proporcionan una solución viable a los problemas de la calidad del agua; sin embargo, no son aplicables en el campo de la camaronicultura. El índice propuesto por la Canadian Council Ministers of Environment (CCME, 2012) y la metodología propuesta por Beltrame et al. (2004), mismo que fue empleado por Ferreira et al. (2011) han sido empleados para cuestiones de camaronicultura; no obstante, no consideran de forma particular aquellas situaciones de riesgo en el cultivo. Esto se puede observar claramente en la Fig. 5, en donde los resultados de las evaluaciones elaboradas por el modelo neurodifuso muestran claramente un nivel de calidad del agua inferior al calculado por los indicadores anteriormente mencionados. Es importante mencionar que este trabajo presenta resultados preliminares, en donde se plantea como trabajo a futuro capturar la evolución de la dinámica del sistema mediante reentrenamiento de red neuronal desarrollada. Asimismo, es necesario modelar el conjunto restante de parámetros fisicoquímicos para obtener evaluaciones de mayor precisión.

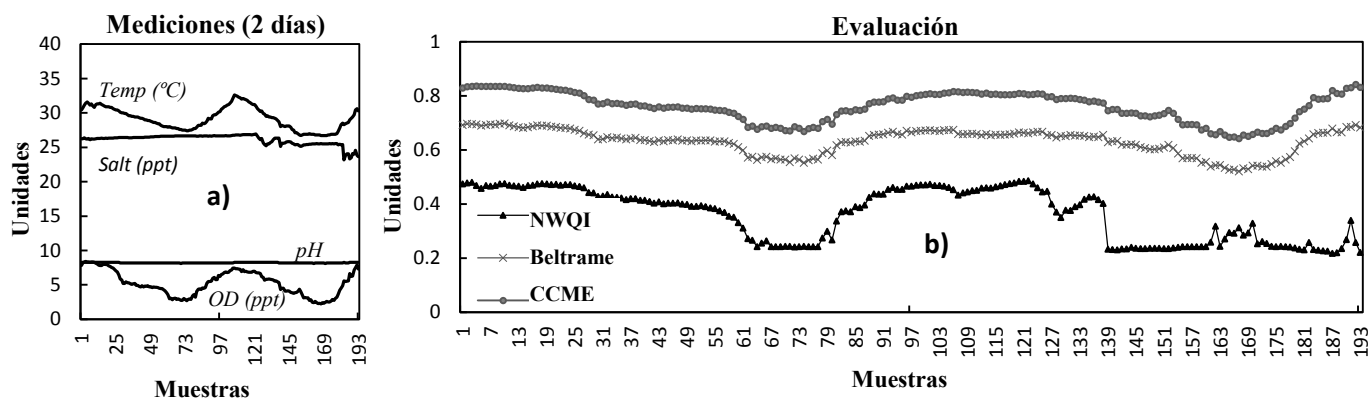


Fig. 5. Evaluación y comparación de evaluaciones de la calidad el agua entre índices empleados actualmente: a) mediciones de los parámetros de calidad del agua; b) resultados de las evaluaciones.

REFERENCIAS

[ACA] Agencia Catalana del Agua (Catalonia, Spain). Available at: <http://www.mediambient.gencat.net/aca/ca/inici.jsp> [Accessed August 2012].
 Beltrame, E. Bonetti, C. and Bonetti, J. 2004. Pre-selection of Areas for Shrimp Culture in a Subtropical Brazilian

Lagoon Based on Multicriteria Hydrological Evaluation. Journal of Coastal Research, Vol. 39: 1838 - 1842
 Boyd, C. 1989. Water Quality Management and Aeration in Shrimp Farming. Fisheries and allied aquaculture departmental. Series N° 2. Alabama Agricultural Experiments Stations, Auburn University, Alabama. 70p.
 Boyd, C. 1992. Shrimp pond effluents: observations of the nature of the problem on commercial farms. Proceedings

- Boyd, C. 2000. Water composition and shrimp pond management. *Global Aquaculture Advocate* 3(5):40-41
- Casillas, R., Nolasco, H., García, T., Carrillo, O. and Páez, F. 2007. Water quality, chemical fluxes and production in semi-intensive Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture ponds utilizing two different feeding strategies. *Aquacultural Engineering*, Vol. 36(2): 105-114.
- [CCME] Canadian Council of Ministers of the Environment (Canada). 2004. An assessment of the application and testing of the Water Quality Index of the Canadian Council of Ministers of the Environment for selected water bodies in Atlantic Canada. National indicators and reporting office. Available at: <http://www.ec.gc.ca/soer-ree/N> [Accessed August 2012].
- Carbajal, J., Sánchez, L., and Progrebnyak, O. 2011. Assessment and prediction of the water quality in shrimp culture using signal processing techniques. Springer. *Aquaculture International*.
- Carbajal, J., Sánchez, L., Carrasco, A. and Martínez, J. 2012. Immediate water quality assessment in shrimp culture using fuzzy inference systems. *Expert Systems with Applications*. Elsevier, In press.
- Chien, Y. 1992. Water Quality Requirements and Management for Marine Shrimp Culture. *Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming*. World Aquaculture Society, USA, 144 – 156.
- Chow M. 1997. Methodologies of using neural network and fuzzy logic technologies for motor incipient fault detection. World Scientific, Singapore.
- Clifford, H.C., 1994. Semi-intensive sensation: A case study in marine shrimp pond management. *World Aquaculture*. Vol. 25 (3):6-12.
- Ferreira, N., Bonetti, C. and Seiffert, W. 2011. Hydrological and Water Quality Indices as management tools in marine shrimp culture. *Elsevier. Aquaculture*, Vol. 318: 425–433.
- Gharibi, H., Sowlat, M., Mahvi, A., Mahmoudzadeh, H., Arabalibeik, H., Keshavarz, M., Karimzadeh, N. and Hassani, G. 2012. Development of a dairy cattle drinking Water Quality Index (DCWQI) based on fuzzy inference systems. *Ecological Indicators*. Elsevier, 20: 228-237.
- [INE] Instituto Nacional de Ecología. 2000. La calidad del agua en los ecosistemas costeros de México.
- Gutiérrez, J., Riss, W., & Ospina, R. 2006. Bioindicación De La Calidad Del Agua En La Sabana De Bogota – Colombia, Mediante La Utilización De La Lógica Difusa Neuroadaptativa Como Herramienta. *Limnología. Caldasia* 28(1): 45 – 46.
- Islam, S., Sarker, J., Yamamoto, T., Wahab, A. & Tanaka, M. (2004). Water and sediment quality, partial mass budget and effluent N loading in coastal brackishwater shrimp farms in Bangladesh. *Marine Pollution Bulletin* 48: 471–485.
- Lek, S., Guirese, M. & Giraudel, J. (1999). Predicting stream nitrogen concentration from watershed features using neural networks. *Water Resources. Pregamon* 3: 3469-3478.
- Lermontov, A., Yokoyama, L., Lermontov, M. and Soares, M. 2009. River quality analysis using fuzzy Water Quality Index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. *Ecological Indicators*. Elsevier, 9(6):1188-1197.
- Liu, S., Xu, L, Li, D. & Zeng, L. (2014). Online prediction for dissolved oxygen of water quality based on support vector machine with time series similar data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30 (3): 155-162.
- Martínez L. (1994). *Cultivo de Camarones Pendidos, Principios y Prácticas*, Ed. AGT Editor S.A.
- [NSF], National Sanitation Foundation International. Available at: [http://www.\(HI\)c.org](http://www.(HI)c.org) [Accessed August 2012].
- Páez O, F. 2001. *Camaronicultura y Medio Ambiente*. Instituto de Ciencias del mar y Limnología. UNAM. 271-298, México.
- Principe, J., Luliano, N. & Lefebvre W. (2000). *Neural and Adaptive systems: Fundamentals through Simulations*. John Wiley & Sons.
- Riss, W., Ospina, R., & Gutiérrez, J. 2002. Establecimiento de Valores de Bioindicación para Macroinvertebrados Acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Limnología. Caldasia* 24(1): 135 – 156.
- Ramesh, S., Sukumaran, N., Murugesan, A. and Rajan, M. 2010. An innovative approach of Drinking Water Quality Index—A case study from Southern Tamil Nadu, India. *Ecological Indicators*. Elsevier, 10(4): 857-868.
- [SEMARNAT]. Mexican Ministry of Environment and Natural Resources (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, in Spanish). Available at: <http://www.semarnat.gob.mx> [Accessed August 2012].
- Sharma, V., Negi, S., Rudra & R., Yang, S. (2003). Neural network for predicting nitrate-nitrogen in drainage water. *Agricultural Water Management*. Elsevier, 63: 169-183.
- Shen, X., Chen, M. & Yu, J. (2009) Water environment monitoring system based on neural networks for shrimp cultivation. *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, 3: 427-431.
- Simões, F., Moreira, A., Bisinoti, M., Nobre, S. and Santos, M. (2008). Water Quality Index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies. *Ecological indicators*. Elsevier, 8: 476–484.