

# **Diseño y construcción de un sistema de supervisión para la evaluación de la calidad del agua en sistemas de cultivo de camarón**

***José Juan Carbajal Hernández***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación, Av. Juan de Dios Bátiz s/n, Nva. Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero, C.P. 07738, México D.F., Teléfono (55) 57296000, ext. 56540  
*jcarbajalh@cic.ipn.mx*

***Luis Pastor Sánchez Fernández***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación, Av. Juan de Dios Bátiz s/n, Nva. Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero, C.P. 07738, México D.F., Teléfono (55) 57296000, ext. 56573  
*lsanchez@cic.ipn.mx*

***Luis Alfonso Aguilera Larrañaga***

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Zacatenco, Gustavo A. Madero, C.P. 07738, México D.F.  
*laquileral0800@gmail.com*

## **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. El presente trabajo propone el desarrollo de una tarjeta digital para el monitoreo y evaluación de la calidad del agua en estanques de cultivo de camarón de la especie "Litopenaeus Vanammei". Mediante la supervisión de un conjunto base de parámetros físico-químicos, se establecen pesos que determinan aquellos con mayor importancia y por lo tanto con una mayor afectación

en el ecosistema. Asimismo, se presenta un nuevo modelo computacional para la evaluación de la calidad del agua empleando el método de Procesos Analítico Jerárquicos. Resultados experimentales muestran un buen desempeño del dispositivo propuesto, empleando comparaciones contra los estándares más destacados en el campo de la acuicultura.

**Palabra(s) Clave(s):** acuicultura, adquisición, camarón, evaluación, tarjeta.

## **1. Introducción**

El cultivo de camarón es una importante actividad en el mundo debido a que genera grandes ganancias y sirve como sustento en la alimentación de la población en general. La producción de camarón es determinada mediante tres factores principales: reproducción del organismo, crecimiento y medioambiente [1].

El cultivo en estanques se realiza por lo general cerca de zonas costeras, prohibiéndose en zonas de manglar, cultivos de arroz, cacahuete, azúcar o salinas, debido a que se afectan este tipo de ecosistemas. Para reproducir una especie acuícola en un estanque, es necesario mantener condiciones medioambientales muy semejantes a las de su ecosistema original, de otra manera simplemente no subsistiría. Dentro del hábitat del camarón existen parámetros físico-químicos que interactúan de distintas formas y su impacto medioambiental varía dependiendo de las concentraciones que éstos presenten. Un análisis a detalle sobre tales parámetros permitirá generar un mejor criterio sobre el estado de la calidad del agua [2], [3].

Actualmente existen trabajos que permiten evaluar la calidad del agua en sistemas de cultivo marino como los propuestos por la CCME (2012) [4], Ferreira et al. (2013) [5], Carbajal et al. (2012) [6] y Carbajal et al. (2013) [7]. Estos trabajos proponen soluciones muy ingeniosas; sin embargo, resultan muy complejas para implementar en un microcontrolador genérico de baja capacidad, o bien, fueron desarrolladas para otro tipo de sistemas, por lo que tienen que ser adaptados a la camaronicultura. Por otro lado, el

sector industrial ofrece sistemas de medición muy sofisticados, pero olvidando incorporar la parte de análisis de la calidad del agua debido a que los instrumentos que proporcionan intentan abarcar diversos tipos de sistemas, permitiendo tener una mayor oportunidad de negocio [8], [9], [10]. Hasta el momento, estos tipos de sistema de supervisión solo proporcionan el valor de la medición de un determinado conjunto de parámetros, sin aportar información del deterioro de la calidad del agua, o del impacto negativo que éstos generan en el ecosistema. Debido a esto, el presente trabajo propone la creación de un sistema el monitoreo y evaluación de la calidad del agua en camaronicultura mediante el desarrollo de un tarjeta de adquisición de datos específica para este fin, empleando un conjunto de parámetros fisicoquímicos de mayor importancia en el ecosistema. Asimismo, se propone la creación de un nuevo modelo computacional de baja complejidad para el análisis de la calidad del agua, integrado en un microcontrolador de bajo perfil. Dicho modelo, proveerá un indicador basado en un análisis de prioridades empleando un Proceso Analítico Jerárquico. Esto permitirá realizar evaluaciones de gran precisión, aportando una idea clara del nivel de deterioro de la calidad del agua derivado de los niveles de concentración presentes en los parámetros fisicoquímicos, reduciendo costos en el desarrollo de instrumental tecnológico para este tipo de sistemas.

El resto de este trabajo se organiza de la siguiente manera: el capítulo 2 muestra los conceptos fundamentales para el entendimiento de la calidad del agua en sistemas camaronícolas. El capítulo 3 explica el diseño de la tarjeta digital elaborada para la medición y análisis de los parámetros medioambientales, así como también el modelo computacional 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 los puntos de discusión y conclusiones de este trabajo.

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

El ecosistema del camarón está compuesto por un conjunto de parámetros físico-químicos que deben de ser monitoreados en todo momento. Estos deben controlarse dentro de un intervalo permitido (de ser posible), generando una calidad del agua óptima para cultivo. Por lo general, situaciones de calidad del agua deficiente son comúnmente encontradas en estanques de cultivo extensivo, debido a que los parámetros suelen tener cambios bruscos o presentan niveles poco aceptables, derivado de las reacciones químicas y físicas presentes en el ecosistema. Debido a esto, resulta de gran importancia conocer las características de los parámetros de la calidad del agua, así como la frecuencia en que se deben monitorear cada uno de ellos para obtener un mejor entendimiento sobre su comportamiento en el hábitat del camarón [11], [12].

La calidad del agua se basa principalmente en resultados de pruebas de toxicidad. Estas pruebas miden la respuesta que los organismos acuáticos tienen a cantidades específicas de ciertos compuestos químicos. 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, por lo que este conjunto representa a los parámetros de mayor vigilancia en un sistema de cultivo. 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); éstos no requieren una frecuencia elevada de medición o bien, se miden cuando se requiere un análisis más detallado sobre la calidad del agua [12], [13], [14], [15]. La Tabla 1 muestra la relación de parámetros con respecto a sus necesidades de supervisión.

Monitoreo diario	Monitoreo semanal	Monitoreo por requerimiento	
Temperatura	Amonio total	Alcalinidad	Clorofila A
Salinidad	Nitratos	Fósforo	Nitrógeno total inorgánico
Oxígeno disuelto	Amonio no ionizado	Sulfato de hidrógeno no ionizado	Sólidos suspendidos
pH		Sulfato de hidrógeno	Potencial redox
Turbidez		Dióxido de carbono	Conteo Vibrio
		Silicatos	Coleiformes fecales

**Tabla 1. Parámetros de calidad del agua clasificados por frecuencia de monitoreo.**

La medición de la turbidez se realiza con cierta facilidad, por lo que se considera como un parámetro de medición diaria ya que se mide la profundidad en que pierde la visibilidad (empleando un disco de Secchi). Debido a que los parámetros de calidad del agua monitoreados diariamente resultan de gran importancia en el análisis de calidad del agua, este trabajo se enfoca en el estudio de éstos, por lo que su importancia en el cultivo de camarón se enuncia en la Tabla 2.

Parámetros	Importancia en Camaronicultura	
Temperatura	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 [15].	
Monitoreo diario	Oxígeno disuelto	La concentración mínima de oxígeno para mantener una tasa aceptable de sobrevivencia varía con el tiempo de exposición [11], [16]. 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 [2], [14], [15].
	Salinidad	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 [2], [11].
	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 [15].
	Turbidez	La turbidez del agua es ocasionada por tres principales factores: a) producción plantónica, b) alta concentración de sustancias húmicas y c) partículas suspendidas de arcilla. La turbidez causada por el plancton favorece la producción de oxígeno durante el día gracias a la fotosíntesis y beneficia el crecimiento del organismo. A pesar de esto, la turbidez ocasionada por sustancias húmicas y/o partículas de arcilla dificultan el paso de la luz, impidiendo así la fotosíntesis y causando el efecto contrario al plancton [13].

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

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 medioambiental pueden definirse dentro de un rango de medición; valores fuera de éste puede representar problemas en la calidad del agua (Tabla 3).

Parámetros	Rango	
	Mínimo	Máximo
Temperatura (°C)	25	32
Salinidad (ppt.)	15	23
Oxígeno disuelto (ppm.)	4	10
pH	7	9
Turbidez (cm)	35	45

**Tabla 3. Rangos definidos para el buen manejo de la calidad del agua en estanques de cultivo.**

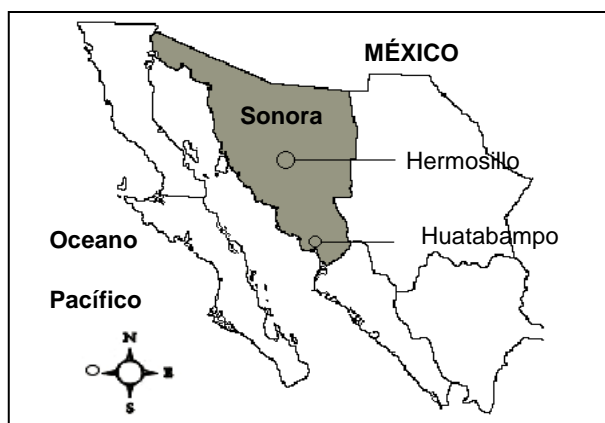
## 2.1. Estado de la calidad del agua

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.

1. Excelente: todos los parámetros medioambientales están dentro de los niveles permitidos. La calidad del agua es la óptima para el cultivo del camarón.
2. Bueno: algún parámetro físico-químico presenta niveles fuera del rango óptimo; sin embargo, esto no representa ningún peligro para el cultivo.
3. Regular: algunos parámetros presentan concentraciones que pueden ser perjudiciales para el correcto funcionamiento del sistema acuícola.
4. Deficiente: calidad el agua no aceptable para el cultivo de la especie; valores de los parámetros medioambientales peligrosos para el organismo (p. ej. situación de hipoxia debido a muy bajas concentraciones de oxígeno disuelto).

## 2.2. Área de estudio y adquisición de datos

Como se ya se mencionó con anterioridad, un pronto análisis puede realizarse con el conjunto de parámetros medidos diariamente. El monitoreo de éstos fue realizado mediante un grupo de sensores de pH, oxígeno disuelto, temperatura, salinidad y turbidez. La automatización de las mediciones permitió evitar algunos errores de supervisión como mediciones fuera de tiempo, mal posicionamiento de sensores o falta de mediciones. El proceso de monitoreo se realizó en la granja camaronícola “Rancho Chapo”, en Huatabampo, Sonora, México. La frecuencia de muestreo fue de 15 minutos entre cada medición (4 mediciones/hora). Dentro del registro de mediciones se generó un conjunto de datos correspondiente a 4 meses de cultivo.



**Fig. 1. Ubicación del sitio de muestreo de datos en Huatabampo, Sonora en México. Las mediciones de los parámetros de calidad del agua se realizaron en “Rancho Chapo”.**

## 3. Desarrollo

### 3.1. Diseño de la tarjeta de monitoreo

La tarjeta digital para la medición y evaluación de la calidad del agua está diseñada para analizar la calidad del agua empleando 4 de los 5 parámetros anteriormente descritos. Es importante remarcar, que el oxígeno disuelto no fue considerado en una primera fase para ser monitoreada dentro de la tarjeta debido a costos en la adquisición



de los sensores, por lo que el algoritmo no contempla el uso de esta variable; no obstante se ha propuesto incluirla en un futuro. La construcción de la tarjeta se detalla a continuación mediante las siguientes etapas (Fig. 2):

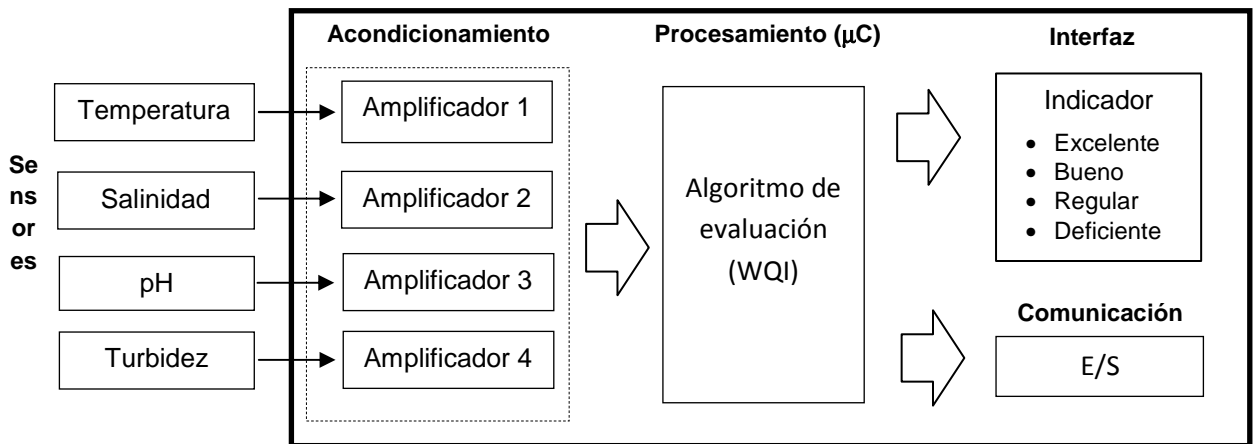
a) Medición de señales: distintos tipos de sensores han sido utilizados para medir a los parámetros de la calidad del agua definidos anteriormente:

- Sensor de temperatura (LM35) con un rango de medición de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , rango de operación de 4 a 30 V y una salida de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  en forma lineal.
- Sensor de pH (GF Signet 2716) con rango de operación  $\pm 2\text{V}$  y salida  $344\text{mV}$ , permitiendo medir valores de pH de 1 a 14 unidades en forma lineal [10].
- Sensor de salinidad (Signet 2819), con equivalencia de conductancia en  $\text{ppt sal} = (0.758544/\Omega)/(100)$  [10].
- Sensor de turbidez (General electric), empleando un transmisor y receptor infrarrojo, con una respuesta de 0 a  $4.75\text{V}$  en un rango de 0 a 2000 NTU [17].

b) Acondicionamiento de señales: un conjunto de amplificadores operacionales se encarga de amplificar las señales provenientes de los sensores mediante un procesode amplificación ( $A_v$ ) de 9.2. En el caso de la turbidez, se utiliza un amplificador operacional en configuración de buffer ya que no requiere amplificación (Fig. 2).

c) Adquisición y procesamiento de datos: la siguiente fase corresponde a la conversión analógico-digital y el procesamiento de la información para generar el indicador de la calidad del agua (ver sección 3.2). En este caso se empleó un microcontrolador PIC16F877 debido a su capacidad de procesamiento y amplio

conjunto de interfaces de comunicación como son puertos paralelos, números de convertidores analógico-digitales e interfaces de transmisión síncrona o asíncrona [18]. La programación del microcontrolador se realizó utilizando lenguaje C mediante el compilador CCs [19]. Los cuatro sensores correspondientes a los parámetros de la calidad del agua se conectaron a los puertos AN2, 3, 4 y 5 respectivamente. Asimismo, dos leds conectados al puerto RE indican en qué momento se hace una medición (RE1) y el estado de encendido de la tarjeta como tal (RE2).



**Fig. 2. Diagrama conceptual de la tarjeta de adquisición de datos.**

- d) Interfaz: El despliegado de la información se realiza mediante un LCD de 2 líneas, en donde los valores de los parámetros físico-químicos son mostrados, así como el valor del indicador de la calidad del agua. Un zumbador emite una alarma cuando la calidad del agua se encuentra en un nivel “deficiente”.
- e) Comunicación: para un monitoreo remoto, se utilizó la interfaz UART (RS232) del microcontrolador, estableciendo una comunicación entre la tarjeta y una PC, teniendo una interfaz de usuario la cual muestra las últimas mediciones realizadas por el microcontrolador y asimismo, guarda el histórico de mediciones para un análisis posterior. La interfaz de usuario realizada en este trabajo puede consultarse en la sección 3 (Resultados).

El diagrama electrónico de la tarjeta de adquisición y evaluación de datos se muestra en la Fig. 3, en donde se pueden observar cada una de las etapas descritas con anterioridad. Por otra parte, la fase de alimentación consta de una fuente dual a  $\pm 5$  volts, con una batería de 12 Volts como sistema de respaldo de energía adicional en caso de que la fuente principal falle, generando así un sistema tipo UPS. La Fig.4 muestra el diseño de dicha fuente de alimentación.

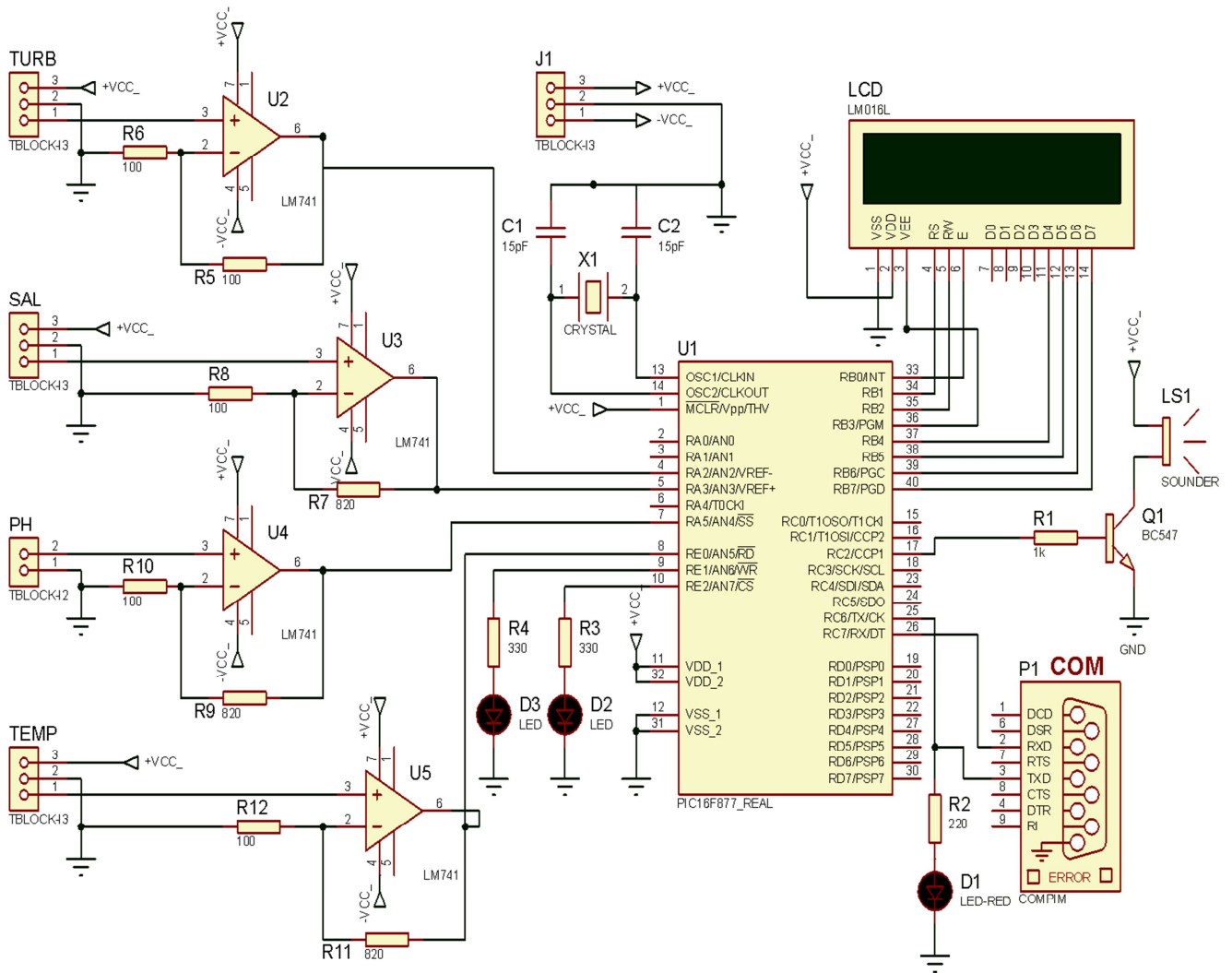


Fig. 3. Diagrama conceptual de la tarjeta de adquisición de datos.

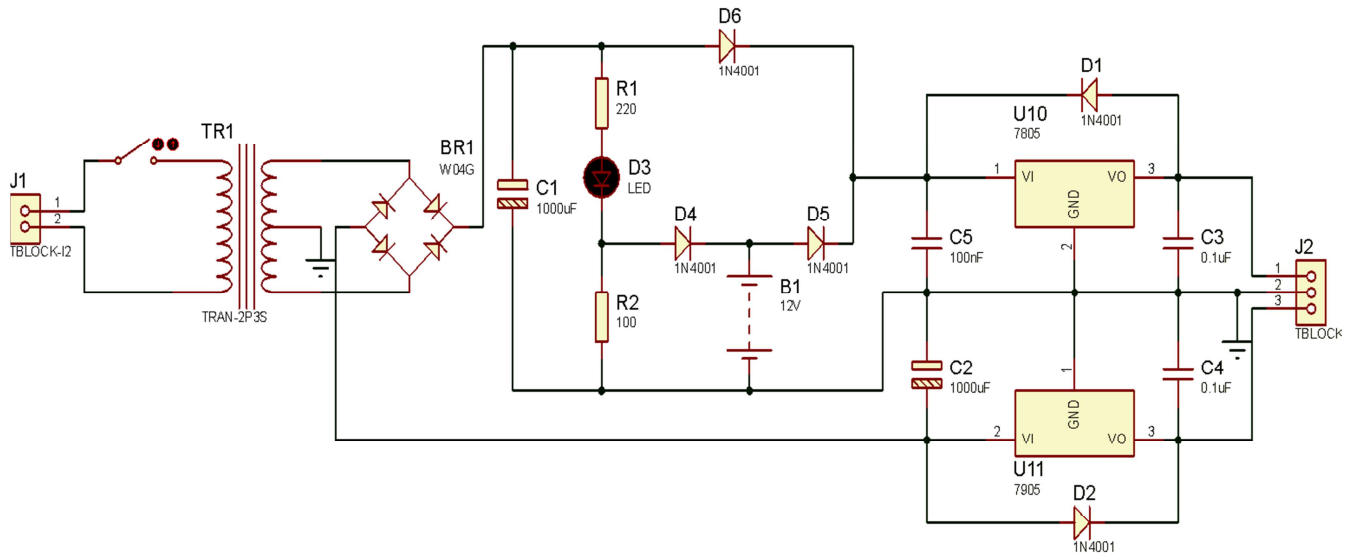


Fig. 4. Diagrama conceptual de la etapa de alimentación.

### 3.2. Modelo de evaluación de la calidad del agua

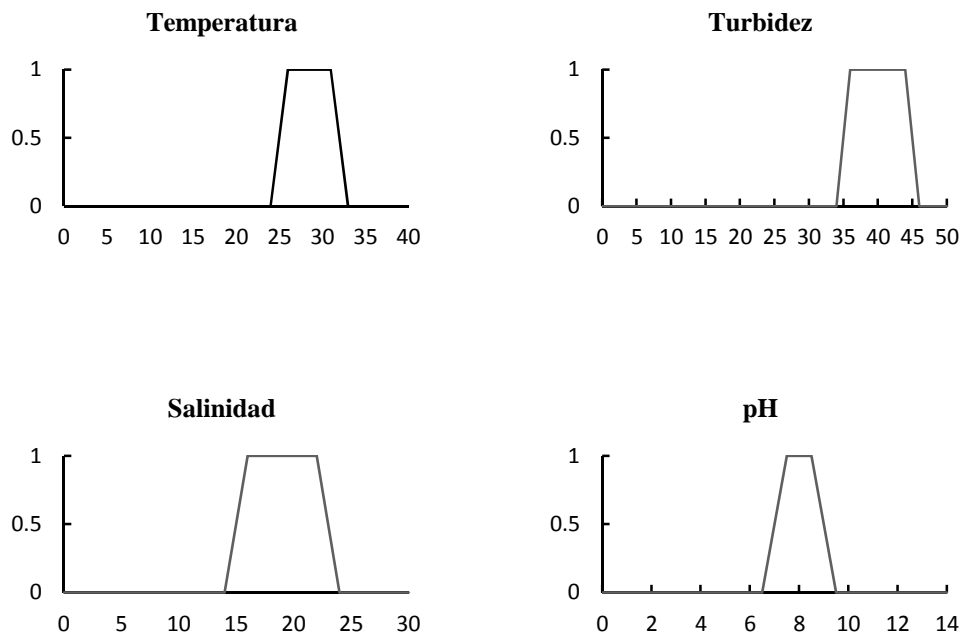
La calidad del agua está compuesta por varios parámetros fisicoquímicos. Como se mencionó anteriormente, la medición del conjunto de mayor impacto permite tener una idea del comportamiento de la calidad en el estanque. Aunque existen diversos trabajos en el área, mismos que emplean técnicas de lógica difusa o modelos estadísticos [7], [20], un algoritmo de cálculo de la calidad del agua de baja complejidad computacional se planteó debido a las limitaciones del microcontrolador en memoria y procesamiento. Dicho algoritmo considera el uso de pesos, permitiendo dar mayor importancia a aquellos parámetros críticos en el ecosistema mediante el método del Proceso Analítico Jerárquico [21]. Para realizar esto, se propuso normalizar los niveles de medición de cada parámetro en un rango [0, 1], permitiendo maximizar el efecto negativo generado por aquellos con mayor importancia en el ecosistema cuando se integran los pesos de prioridad. Así pues, este modelo permite obtener de manera precisa el nivel de deterioro en la calidad del agua en el hábitat del camarón; su metodología se detalla a continuación.

### Funciones de entrada

Cada parámetro de la calidad del agua presenta valores y rangos diferentes, por lo que es necesario transformarlos a un espacio en donde todas tengan un mismo rango de medición. Esto se realiza mediante la aplicación de una función de pertenencia ( $\mu$ ), la cual estandariza a cada una de las mediciones de cada parámetro en valores entre 0 y 1. No existe alguna regla que defina como construir una función de pertenencia, sin embargo, una función lineal simplifica el proceso. Derivado de esto, se diseñaron funciones trapezoidales, mismas que se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

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

donde  $x$  es el parámetro medioambiental;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son los parámetros que definen a la función de entrada (Tabla 4.) La Fig. 5, muestra la funciones de entrada definidas para estandarizar a los parámetros medioambientales.



**Fig. 5. Funciones de pertenencia de los parámetros medioambientales.**

Parámetro	Unidad	Normal			
		a	b	c	d
Temperatura	°C	24	26	31	36
Salinidad	mg/l	14	16	22	24
pH	-	6.5	7.5	8.5	9.5
Turbidez	NTU	34	36	44	46

**Tabla 4. Parámetros de las funciones de entrada.**

### Proceso Analítico Jerárquico

Es importante identificar aquellos parámetros de mayor impacto en el hábitat del camarón, debido a que desestabilizan el ecosistema mayormente que los demás. Derivado de este razonamiento, se asigna una mayor prioridad a éstos. El Proceso Analítico Jerárquico es un método para asignar pesos mediante un nivel de importancia empleando la escala propuesta por Saaty (2004) (Tabla 5) [21].

Prioridad	Importancia
1	Igual importancia
3	Moderada
5	Fuerte
7	Muy Fuerte
9	Extrema

**Tabla 5. Escala de prioridades propuesta por Saaty.**

En este trabajo, diferentes prioridades fueron asignadas a cada parámetro correspondiendo a su nivel de impacto en la acuicultura. Por esta razón, el oxígeno disuelto resulta ser el de vital importancia en la supervivencia del organismo, así como el control de pH. La turbidez y salinidad presentan el siguiente nivel de importancia, y la temperatura resulta ser la variable con menor impacto del conjunto en estudio (Tabla 6).

Parametros	Temp	Sal	pH	Turb
Escala	1	2	4	3

**Tabla 6. Escala de valores asignados para cada uno de los parámetros medioambientales.**

El siguiente paso es realizar una matriz de comparaciones, empleando cada uno de los niveles de importancia asignado a cada parámetro. La siguiente ecuación describe el procedimiento:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde  $w_i$  representa cada uno de los niveles de importancia asignados a cada  $i^{th}$  parámetro mediante la escala de Saaty [21].

Finalmente, los pesos son obtenidos mediante el cálculo del eigenvector principal propuesto por Perron (1904) [22], mismo que se describe mediante los siguientes pasos:

a) Primero, la matriz de comparaciones A es multiplicada por sí misma:

$$B = A \times A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

b) Después, la suma de las filas  $C_i$  se realiza empleando la siguiente ecuación:

$$C_i = \sum_{j=1}^m B_{ij}, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

c) Finalmente, cada vector  $C_i$  es normalizado como sigue:

$$P_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^m C_j}, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Donde  $P_i$  contiene las prioridades asignadas a cada parámetro físico-químico (peso). El proceso debe iterarse nuevamente cuadrando la matriz de comparaciones (repitiendo desde el paso a) hasta que el eigenvector no presente cambios significativos de la iteración anterior.

Índice de la calidad del agua

El estado de la calidad del agua se calcula mediante la siguiente expresión:

$$WQI = \sum_{i=1}^n \mu_i(x) P_i \quad (6)$$

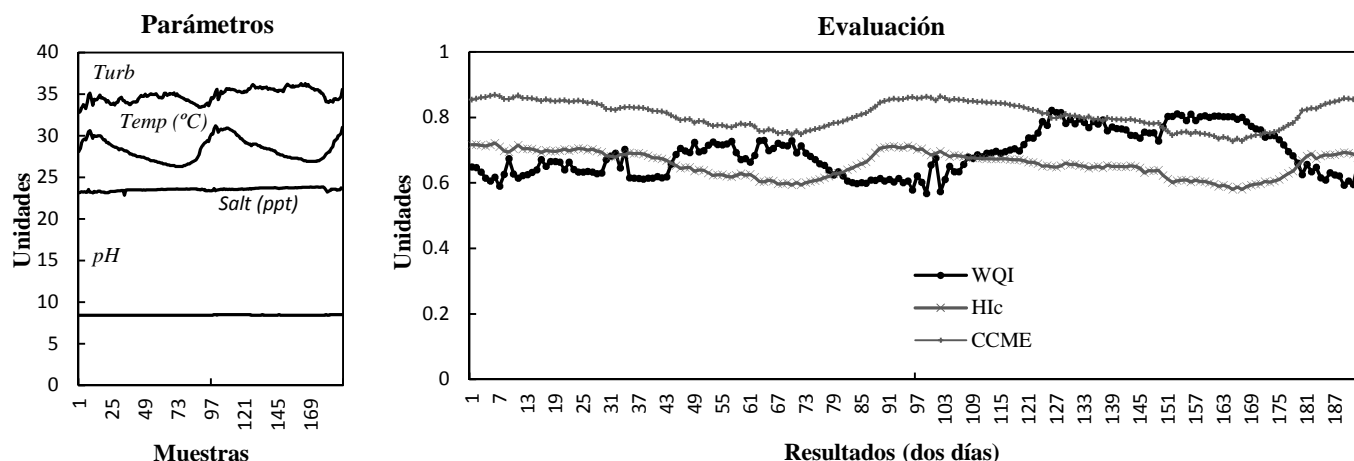
Donde  $n$  es el número de parámetros,  $P_i$  los pesos obtenidos del eigenvector de Perron e  $i$  corresponde al parámetro medioambiental.

#### 4. Resultados

Una serie de pruebas fueron realizadas para mostrar el desempeño del sistema propuesto. Se instaló la tarjeta electrónica durante una semana en la granja de cultivo propuesta, obteniéndose un total de 96 mediciones por día con una frecuencia de muestreo de 15 minutos en cada medición (4 x hora). Una comparación empleando dos modelos utilizados ampliamente en acuicultura marina fueron propuestos como parte de una prueba experimental. Por una parte el índice propuesto por la Canadian Council Minister of Environment (CCME) [4], se emplea para medir conjuntos de parámetros y conjunto de mediciones al mismo tiempo, calculando un promedio que varía en un rango de [0 – 100] y donde el máximo valor representa una excelente calidad del agua. Por otro lado, el indicador hidrológico de la calidad del agua Hlc, fue propuesto por Ferreira et al. (2010) [5] exclusivamente para cultivo de camarón, por lo que sirve para



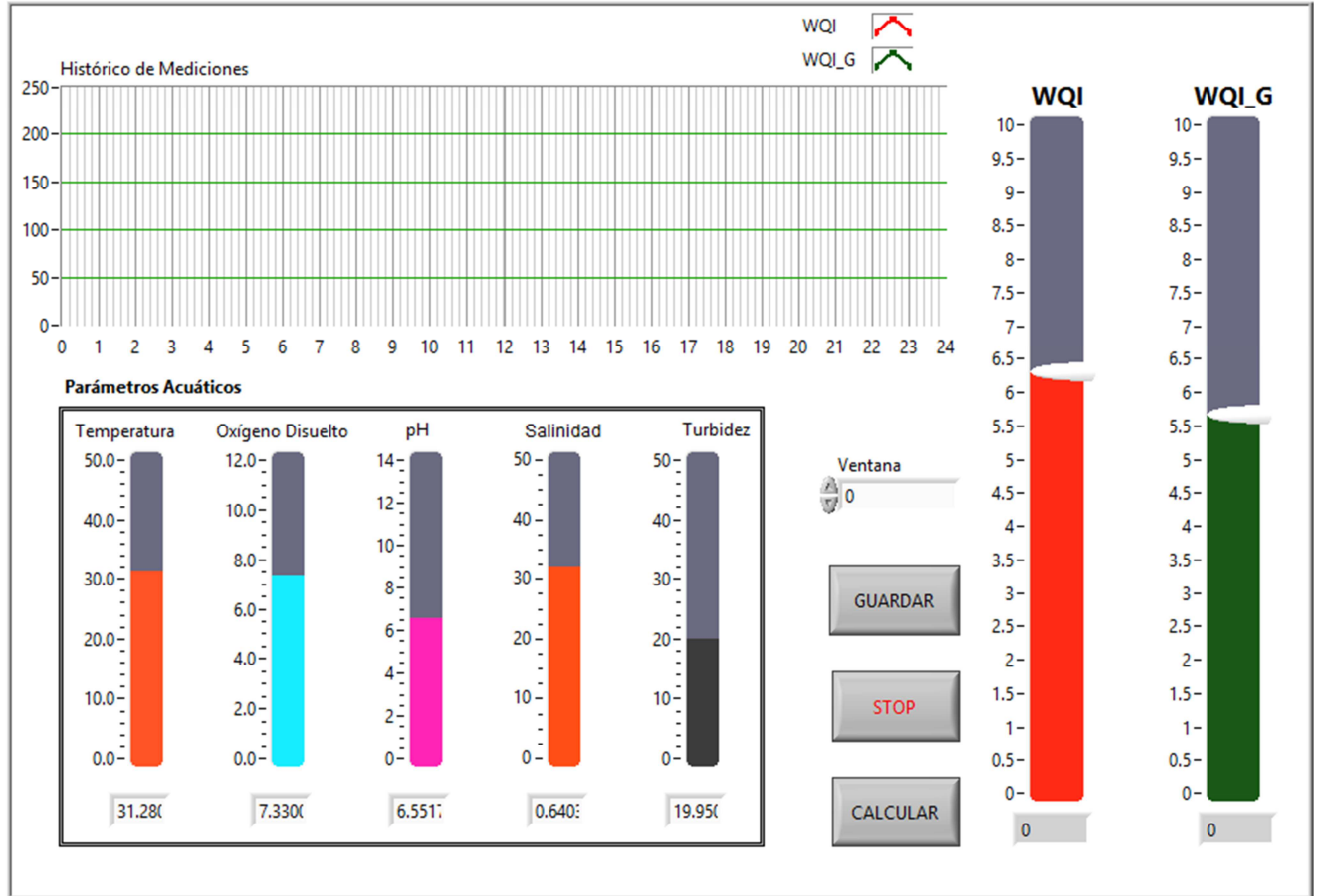
validar el indicador propuesto en este trabajo. Por cuestiones didácticas, en la Fig. 6 sólo se muestran los resultados de las evaluaciones de dos días debido a la gran cantidad de datos que se obtuvieron, de tal forma que se pueda observar el funcionamiento y eficiencia del modelo propuesto.



**Fig. 6. Conjunto de mediciones durante un día de cultivo y su evaluación empleando el modelo propuesto.**

En la sección de parámetros de la Fig. 6, la temperatura varía diariamente debido a la intensidad solar. Los parámetros restantes presentan mayor estabilidad. En la sección de evaluación, se puede observar a los tres indicadores propuestos evaluando al conjunto de mediciones. El índice propuesto por la CCME calcula los resultados como “buena” calidad del agua; esto se debe a que en su formulación, se calculan promedios de desviaciones que en cierta forma compensan a aquellos parámetros fuera de rango. El Hlc es más preciso ya que es un modelo basado en asignación de pesos mediante algunas funciones de ajuste. El índice WQI presenta evaluaciones muy similares a los dos indicadores empleados por excelencia, ya que la asignación de pesos derivado de un análisis sobre aquellos parámetros más conflictivos, permite tener evaluaciones de gran precisión, por lo que sus resultados logran evaluar aquellas situaciones no deseadas de manera individual mediante las funciones de entrada. La Fig. 7 muestra la interfaz de usuario final para el cálculo de la calidad del agua.

## EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA



**Fig. 7. Interfaz gráfica propuesta para el cálculo de la calidad del agua en estanques camaronícolas en donde WQI muestra la última evaluación realizada y WQI\_G representa en promedio de evaluaciones durante un determinado periodo de tiempo (ventana).**

### 5. Conclusiones y discusiones

La calidad del agua es un tema de gran importancia en cuanto a producción de especies acuícolas. Resulta de gran importancia determinar aquellos parámetros dentro del sistema de cultivo que desestabilizan en mayor medida el hábitat del organismo. Debido a esto, existe una gran diversidad de equipos de monitoreo que persiguen el mismo fin; no obstante, solamente se dedican a monitorear sin ofrecer un análisis

integral de la calidad del agua. Por otra parte, los modelos convencionales de análisis del agua han sido diseñados para ser implementados en sistemas de alto rendimiento como lo son los ordenadores convencionales, por lo que este trabajo contempla la oportunidad de realizar cálculos de baja complejidad mediante un análisis de prioridades, mismo que puede ser implementado dentro de un microcontrolador. La interfaz realizada permite sincronizarse con el sistema embebido, por lo que los cálculos de calidad del agua en la interfaz de usuario son empleando el mismo algoritmo AHP con la finalidad de ser compatibles con los cálculos de la tarjeta electrónica. Finalmente, este trabajo pretende desarrollar herramientas que apoyen la toma de decisiones en sistemas de cultivo de camarón. Asimismo, puede ser considerado como una base importante para su implementación en otro tipo de sistemas de cultivo acuícolas.

### **Agradecimientos**

Los autores del presente trabajo agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional por su apoyo en el otorgamiento del presupuesto para el proyecto No. 20150690.

### **6. Referencias**

- [1] Current practices of water quality management in shrimp farming and their limitations. Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming. World Aquaculture Society, USA. 1992.
- [2] Shrimp pond effluents: observations of the nature of the problem on commercial farms. Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming. World Aquaculture Society, USA. 1992.
- [3] Principals of shrimp culture chemotherapy. Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming. World Aquaculture Society, USA. 1992.
- [4] [CCME] Canadian Council of Ministers of the Environment (Canada). 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. Disponible en <http://www.ec.gc.ca/soer-ree/N>. Acceso: agosto, 2007.
- [5] N. Ferreira, C. Bonetti, W. Seiffert, Hydrological and Water Quality Indices as management tools in marine shrimp culture. 2011. Elsevier. *Aquaculture* 318. 425–433 pp.
- [6] J. Carbajal-Hernández, L. Sánchez-Fernández, A. Carrasco-Ochoa, J. Martínez-Trinidad, Immediate water quality assessment in shrimp culture using fuzzy inference systems. 2012. *Expert Systems with Applications*. Elsevier 40. 5148–5159 pp.
- [7] J. Carbajal-Hernández, L. Sánchez-Fernández, A. Carrasco-Ochoa, J. Martínez-Trinidad. Water quality assessment in shrimp culture using an analytical hierarchical process. 2013. *Ecological Indicators*, Elsevier 29. 148–158 pp.
- [8] Khrono Group. Disponible en [http:// http://krohne.com/en/products/analysis-instruments/converter/mac-100-converter](http://krohne.com/en/products/analysis-instruments/converter/mac-100-converter). Acceso: septiembre, 2014.
- [9] Hanna Instruments. Disponible en <http://hannainst.com/usa/subcat.cfm?id=030> Acceso: septiembre, 2014.
- [10] GF Piping Systems. Disponible en [http://www.gfps.com/content/gfps/country\\_US/en\\_US/products/sensors.html](http://www.gfps.com/content/gfps/country_US/en_US/products/sensors.html). Acceso: septiembre, 2014.
- [11] F. Páez, Camaronicultura y Medio Ambiente, Instituto de Ciencias del mar y Limnología. 2001. UNAM. México. 271-298 pp.
- [12] R. Casillas, H. Nolasco, T. García, O. Carrillo, F. Páez, 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. No. 2. 2007. 105-114 pp.

- [13] C. Boyd, Water composition and shrimp pond management. *Global Aquaculture Advocate*. Vol. 3. No. 5. 2000. 40-41 pp.
- [14] L. Martínez, Cultivo de Camarones Peneidos, principios y practices. 1994. AGT Editor. México.
- [15] Y. Chien, "Water quality requeriments and management for marine shrimp culture. Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming". World Aquaculture Society. USA. 1992.
- [16] Water Quality Management and Aeration in Shrimp Farming. Fisheries and allied aquaculture departmental. Series N° 2. Alabama Agricultural Experiments Stations. Auburn University, Alabama. 1989.
- [17] General Electric. Disponible en <http://www.ge.com>. Acceso: septiembre, 2014.
- [18] Microchip Technology Inc. 2014. Disponible en <http://www.microchip.com/products/Devices.aspx?product=PIC16F877A>. Acceso: septiembre, 2014.
- [19] Custom Computer Services, Inc. Disponible en <http://www.ccsinfo.com>. Acceso: septiembre, 2014.
- [20] W. Ocampo, N. Ferré, J. Domingo, M. Schuhmacher, "Assesing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study". *Environment International*, Elsevier 32. 2007. 733-742 pp.
- [21] T. Saaty, "Decision Making – The Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP)". *Journal of Systems Science and Systems Engineering*. Vol. 13. No. 1. 2004. 1-35 pp.
- [22] O. Perron, "Zur Theorie der Matrizen. *Mathematische Annalen*". Vol. 64. 1907. 248–263 pp.

## **7. Autores**

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.

Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández es egresado del Doctorado en Ciencias Técnicas del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de la Habana, Cuba en 1998, Actualmente trabaja como investigador titular de tiempo completo en el Centro de investigación en Computación – IPN y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores del CONACyT, México. Sus actuales líneas de interés incluyen Instrumentación Virtual, Procesamiento de Señales y Reconocimiento de Patrones, Redes Neuronales y Teoría de Control.

Alfonso Aguilera Larrañaga es alumno de la Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica por parte de la Escuela Superior en Ingeniería Mecánica y Eléctrica del IPN, México. Sus líneas de interés son: Instrumentación Electrónica y Sistemas Digitales.