



MONITOREO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA PARA CAMARONICULTURA POR MEDIO DE UN HARDWARE DE ACCESO ABIERTO Y UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA

WATER QUALITY INDEX MONITORING FOR SHRIMP AQUACULTURE USING OPEN SOURCE HARDWARE AND FUZZY INFERENCE SYSTEMS

R. A. Bórquez-López¹, L. R. Martínez-Córdova¹, R. Casillas-Hernández^{2*}, J. A. López-Elías¹, R. H. Barraza-Guardado¹, J. C. Ibarra-Gómez² y J. C. Gil-Núñez³

¹ Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, Boulevard Luis Donaldo Colosio Colosio s/n, 83000 Hermosillo, SON, México.

² Departamento de Ciencias Agropecuarias y Veterinarias del Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero 818 Sur, 8500, Cd. Obregón, SON, México.

³ Departamento de Biotecnología y ciencias alimentarias del Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de Febrero 818 Sur, 8500, Cd. Obregón, SON, México.

RESUMEN

La acuicultura de precisión es una nueva herramienta desarrollada en el campo de la tecnología de la información (TI) que permite al acuicultor tener un mejor control sobre los procesos de la granja, facilitar la toma de decisiones y mejorar la eficiencia de la actividad. El desarrollo de sistemas de monitoreo continuo son importantes para los cultivos acuícolas ya que estos pueden detectar condiciones no deseadas que puedan perjudicar los organismos. En este estudio, se valoran las plataformas de hardware abierto e inteligencia artificial como alternativa para desarrollar nuevos sistemas de monitoreo. El sistema que se propone registra de manera automática las variables fisicoquímicas del agua (oxígeno disuelto, temperatura y pH) y las procesa mediante lógica difusa (inteligencia artificial) para la determinación del índice de calidad de agua. El sistema fue probado mediante un cultivo de camarón (*Litopenaeus vannamei*) con una talla de 1.67 ± 0.23 g en un periodo de 84 días. Los resultados demuestran que el sistema analiza las variables fisicoquímicas más importantes de un cultivo de camarón y fue capaz de calificar el índice de calidad de agua como: pobre, regular, buena y excelente en función de los umbrales óptimos requeridos por el cultivo. Esto indica que es posible el uso del sistema de hardware abierto y lógica difusa para el monitoreo del índice de calidad de agua y su aplicación en la acuicultura.

Palabras claves: Acuicultura de precisión, Inteligencia artificial; alimentación acuícola, camarón.

ABSTRACT

Precision aquaculture is a new tool developed in the field of information technology (IT) that allows the farmers having a better control of the farm processes, facilitate the decisions making, and improve the efficiency of the activity. The development of systems for continuous monitoring are important to aquaculture crops since these can detect unwanted conditions that can be harmful for organisms. In this study, are valued open hardware and artificial intelligence as alternative platforms to develop new monitoring systems.

*Autor para correspondencia: R. Casillas-Hernández
Correo electrónico: ramon.casillas@itson.edu.mx

Recibido: 02 de junio de 2017

Aceptado: 31 de julio de 2017

The proposed system automatically records the physicochemical variables of the water (dissolved oxygen, temperature and pH) and processes them using fuzzy logic (artificial intelligence) for the determination of the water quality index. The system was tested in a shrimp culture (*Litopenaeus vannamei*) with a size of 1.67 ± 0.23 g in a period of 84 days. The results show that the system analyzes the physicochemical variables most important of a shrimp culture and were able to qualify as a water quality index: poor, good and excellent according to the optimal thresholds required by the crop. This indicates that it is possible the use of the open hardware and fuzzy logic system for the monitoring of water quality index and its application in aquaculture.

Key words: Precision aquaculture, Artificial Intelligence; Aquaculture Feeding, Shrimp.

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de la calidad de agua en la acuicultura y en el cultivo de camarón en particular, es uno de los mayores requerimientos para mantener condiciones óptimas en los sistemas de producción. Cada especie cultivada tiene exigencias fisicoquímicas y biológicas diferentes, sin embargo el no mantener buenas prácticas en el manejo en la calidad del agua no solo afecta la producción del cultivo sino que también afecta de manera adversa los cuerpos de agua receptores de las descargas (Casillas-Hernández *et al.*, 2007; Martínez-Porchas and Martínez-Cordova, 2012; Barraza-Guardado *et al.*, 2015; Xu and Boyd, 2016)

El índice de calidad del agua ICA o WQI (Water Quality Index), ha sido considerado como un indicador adecuado para dar un criterio en la clasificación del estado superficial del agua basado en el uso de los parámetros estándar. Este índice es el resultado de procesar grandes cantidades de datos obtenidos a lo largo de un cultivo, expresados en un solo indicador o un número que representa el nivel de calidad de agua. Dicho indicador va en un escala de 0 a 1, aunque algunos autores los utilizan de 0 a 100, siendo el 0 el indicador mínimo, lo que significa que el agua no es aceptable para

un cultivo y 1 ó 100 representa el valor ideal para calidad de agua (Colmenarejo *et al.*, 2007; Simo *et al.*, 2008; Lermontov, Augusta and Machado, 2009; Ferreira, Bonetti and Seiffert, 2011; Carbajal-Hernández *et al.*, 2013). En la tabla 1 se muestra la evaluación y significado según el resultado obtenido de ICA tomado de Hernández *et al.*, 2011. Para el desarrollo de los sistemas de instrumentación, se cuenta con las plataformas de hardware a código abierto (open source hardware u OSH), que son nuevas herramientas para el desarrollo de proyectos electrónicos. Arduino es una plataforma comercial a código abierto que ha sido muy popular en las comunidades estudiantiles debido a que es un sistema que permite desarrollarse de forma interactiva y además disminuye el tiempo de desarrollo. Fue creada en el 2005 por el Interaction Design Institute Ivrea, Italy. Los OSH cada día son más utilizados debido a su versatilidad en aplicaciones como en la robótica, automatización, agricultura de precisión, solo por mencionar algunos (Faugel and Bobkov, 2013; Bonarini *et al.*, 2014; Mesas-Carrascosa *et al.*, 2015).

Tabla 1. Descripción del estatus en el índice de calidad de agua.
Table 1. Description of water quality index status.

| Estatus | Evaluación | Índice de calidad de agua |
|-----------|---|---------------------------|
| Excelente | Todas las variables están en el umbral óptimo | 0.75 – 1.00 |
| Bueno | Una variable esta fuera del umbral óptimo | 0.50 – 0.65 |
| Regular | Dos variables están fuera del umbral óptimo | 0.25 – 0.50 |
| Pobre | Todas las variables están fuera del umbral óptimo | 0.00 – 0.25 |

Por otro lado, las redes inalámbricas de sensores (WSN, Wireless sensor network) se han convertido en una herramienta útil para ayudar a procesar información de manera eficiente para laboratorios, ya que ellos requieren de tiempo para analizar una muestra (Zhang *et al.*, 2011). Hoy en día los dispositivos WSN se están utilizando para el monitoreo de la calidad de agua en tiempo real ya que han demostrado ser una herramienta fiable para la medición de distintas variables físicas en sistemas automatizados para evaluar parámetros como oxígeno disuelto, temperatura y pH (Yoshikawa *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2011; Ferdoush and Li, 2014).

El propósito de este estudio fue aplicar la metodología de la inteligencia artificial (lógica difusa) en un sistema de hardware abierto como una alternativa para la evaluación de las condiciones del agua en un cultivo de camarón en tiempo real, considerando como variables fisicoquímicas básicas el oxígeno disuelto, la temperatura y el pH), así como la combinación entre ellas. Este sistema puede ser útil para la toma de decisiones en el manejo de la calidad del agua en proyectos acuícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cultivo de camarón

La prueba se realizó durante los meses de Noviembre del 2016 a Enero del 2017 en las instalaciones del laboratorio de acuicultura del Instituto Tecnológico de Sonora campus centro bajo, ubicado en Ciudad Obregón, Sonora, México.

Se colocaron en un tanque 100 litros de agua marina (35 UPS) con 15 camarones *L. Vannamei* de un peso promedio de 1.67 ± 0.23 g con aireación constante las 24 horas y ciclo de luz de 12 horas de 0700 h a 1900 h. La alimentación se realizó en charolas de alimentación tres veces al día (0800h, 1200h y 1800h) a una tasa del 5% diario de la biomasa de los camarones. El cultivo fue implementado en una habitación cerrada para alcanzar altos niveles de temperatura utilizando calentadores controlados con termostatos. Para mantener los niveles de oxígeno disuelto en el agua, se utilizó un cilindro, del que se suplementó al tanque de cultivo, mediante tubería de pvc y válvulas regulables.

Diseño del sistema

En la figura 1 se muestra el modelo conceptual del sistema. Consiste en 3 elementos principales: sensores de calidad de agua (temperatura, oxígeno disuelto y pH), hardware (microcontroladores, transceptores, multiplexor y depurador) y software (lógica difusa y base de datos). Los tres elementos trabajan en conjunto para generar el sistema de monitoreo de calidad de agua. El sistema es escalable haciendo posible incluir más sensores del mismo tipo o de otros, además de otras tecnologías de comunicación (GSM, WiFi etc.). El sistema se ocupa de las siguientes posibles soluciones: la generación de bases de datos automáticas y el minimizar los costos de las tecnologías requeridas por la acuicultura. La información almacenada en la base de datos se puede utilizar como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la actividad. Los usuarios pueden obtener información en tiempo real.

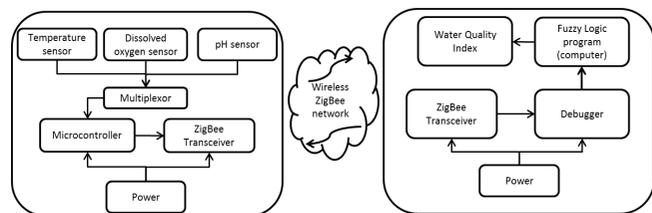


Figura 1. Diagrama a bloques del Sistema de Monitoreo del Índice de Calidad de Agua

Figure 1. Block diagram of water quality index monitoring system.

Descripción del hardware

El Sistema propuesto fue basado en la plataforma arduino (www.arduino.cc). Arduino es una tarjeta de desarrollo electrónica basada en un microcontrolador. La tarjeta arduino es una plataforma a código abierto (open-source) y su programación es similar al lenguaje c++. Para este trabajo se utilizó la tarjeta MEGA con microcontrolador ATmega2560. Cuenta con un cristal oscilador de 16 MHz, conexión USB

(universal Serial Bus), memoria flash de 256 KB, memoria RAM de 8 KB, puerto con protocolo de comunicación UART, 56 pines de entrada/salida digitales y 16 canales analógicos con resolución de 10 bits como se muestra en la figura 2.

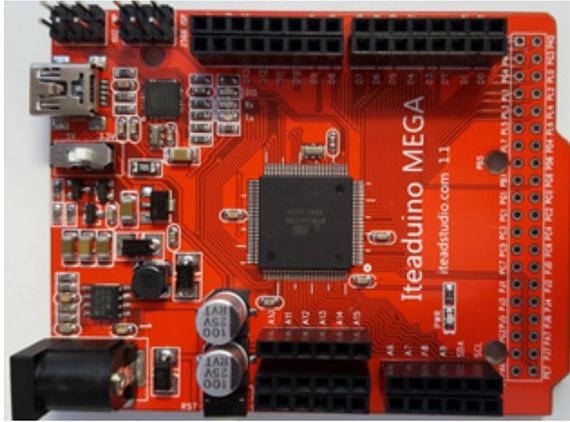


Figura 2. Tarjeta de desarrollo ATmega 2560 usado para el sistema de monitoreo.

Figure 2. ATmega 2560 development board used for monitoring system.

El papel del microcontrolador es gestionar y transmitir los datos de los sensores a una computadora. A través del multiplexor (controlado por el microcontrolador) se selecciona el sensor que se desea leer, transmitir, procesar y almacenar sus datos. En la tabla 2 se resumen los sensores utilizados para medir el oxígeno disuelto, temperatura y pH así como el hardware usado. Para asegurar un funcionamiento adecuado de los sensores, fueron calibrados acorde a las recomendaciones dadas por el fabricante. Las especificaciones técnicas de los sensores cumplen con los requisitos para ser utilizados en la acuicultura (www.atlas-scientific.com).

Sensores

Oxígeno disuelto

Para la medición de oxígeno disuelto fue utilizado un electrodo galvánico con ánodo de zinc y cátodo de plata. Las especificaciones técnicas son las siguientes: rango de medición de 0.01 to +35.99 mg/L, precisión de ± 0.2 , mg/L y tiempo de respuesta de ~ 0.3 mg/L/segundo. Circuito embebido con protocolo de comunicación UART e I²C. El circuito embebido del electrodo tiene compensación para temperatura, salinidad y presión atmosférica; su voltaje de operación es de 3.3 V a 5.0 V y es compatible con cualquier microcontrolador que soporte comunicación UART. La calibración es mediante una solución de referencia de 0 mg/L proporcionada por el fabricante (www.atlas-scientific.com).

Temperatura

El sensor digital de temperatura tiene un rango de operación de -20°C to 133°C con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, índice de protección por arriba del estándar IP 68 y voltaje de operación de 3.3 V a 5.0 V de corriente directa. La comunicación con el microcontrolador es mediante el protocolo UART configurado a una velocidad de transmisión de 9600 baudios (www.atlas-scientific.com).

Tabla 2. Resumen de materiales utilizados para el Sistema de monitoreo de índice de calidad de agua.

Table 2. Summary of materials used for the water quality index monitoring system.

| Producto | Descripción | Función |
|------------------------------|--|---|
| 1 tarjeta MEGA 2560 | Tarjeta de desarrollo con microcontrolador ATMEL 2560. | Gestionar las lecturas de los sensores. |
| 2 Módulos transceptores | XBee XBP24-BZ7UIT-004 red inalámbrica con alcance de una milla. | Transmitir la información vía inalámbrica. |
| 1 Sensor de Oxígeno disuelto | Electrodo galvánico con ánodo de zinc y cátodo de plata. | Registro de datos de oxígeno disuelto. |
| 1 Sensor de pH | Electrodo de plata con solución de referencia de cloruro de potasio. | Registro de datos de pH. |
| 1 Sensor de temperatura | Sensor digital de temperatura con estándar de protección IP68. | Registro de datos de temperatura. |
| 1 Depurador | Convertidor de datos de protocolo UART a USB. | Introducir los datos a la computadora. |
| 1 Unidad de poder | Adaptador AC/DC con entrada de AC100~240V y DC9V 100mA de salida. | Proveer de energía eléctrica al sistema de monitoreo. |
| 1 Computadora | Computadora personal HP modelo ProDesk 400 G1. | Procesar información, almacenamiento de datos. |

pH

El electrodo de pH utilizado, cuenta con las siguientes especificaciones: rango de medición de 0.001 a 14.000, precisión de ± 0.002 y tiempo de respuesta del 95% en un segundo. El voltaje de operación es de 3.3 V a 5.0 V de corriente directa. El circuito embebido es compatible con protocolo UART y su calibración es mediante soluciones estándar de en tres puntos de 4.0, 7.0 y 10.0 (www.atlas-scientific.com).

Software

El desarrollo del software se hizo en lenguaje c# y consta de tres bloques principales: Recepción de información, lógica difusa y almacenamiento de datos. En la recepción de la información el software solicita al microcontrolador los valores de los sensores y verifica que el dato no sea atípico para poder ser procesado. El sistema de lógica difusa se realizó basado en la metodología utilizada por Carbajal-Hernández et al. (2012). Las funciones de pertinencia utilizadas se muestran en la figura 3. En la tabla 3 se muestran los valores lingüísticos para obtener las reglas base de conocimiento. Un total de 125 reglas fueron programadas. Una vez que los datos recibidos del microcontrolador pasan por los dos primeros bloques, la información es graficada y almacenada para ser consultada

(de ser necesario). El software toma lectura cada minuto y guarda el promedio cada 10 minutos.

Tabla 3. Ejemplo de valores lingüísticos para obtener las reglas base para oxígeno disuelto, temperatura, pH e índice de calidad de agua (WQI); TL: temperatura baja, TMB: temperatura muy baja, O: oxígeno disuelto, T: temperatura, p: pH; N: normal, B: bajo, MB: muy bajo, A: alto, MA: muy alto. Ejemplo; OMB: oxígeno disuelto muy bajo.

Table 3. Example of linguistic values to obtain the basic rules for dissolved oxygen, temperature, pH and water quality index (WQI); TL: low temperature, TMB: very low temperature, O: dissolved oxygen, T: Temperature, p: pH; N: normal, B: low, MB: very low, A: high, MA: very high. Example; OMB: very low dissolved oxygen.

| Oxígeno disuelto | Temperatura | pH | ICA |
|------------------|-------------|-----|-----------|
| ON | TN | pN | Excelente |
| OB | TN | pN | Bueno |
| ON | TMB | pMB | Regular |
| OMB | TMB | pMA | Pobre |

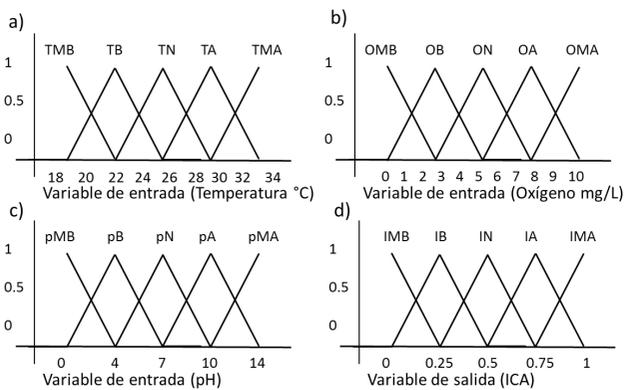


Figura 3. Funciones de pertinencia del índice de calidad de agua: (a) oxígeno disuelto, (b) temperatura, (c) pH y (d) índice de calidad de agua ICA. MB: muy bajo, B: bajo, N: normal, A: alto y MA: muy alto. (TMB: temperatura muy baja).

Figure 3. Membership functions of water quality index: (a) dissolved oxygen, (b) temperature, (c) pH and (d) water quality index (WQI). MB: very low, B: low, N: normal, A: high and MA: very high. (TMB: very low temperature).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4 se muestra gráficamente el comportamiento del promedio diario del índice de calidad de agua de un total de 24 datos almacenados por día de cada variable. Se puede observar que en el intervalo de 31 °C a 34 °C el ICA se encuentra en un valor de 0.62 lo que determina una buena calidad de agua al tener una sola variable (temperatura) fuera del umbral deseado. Cuando los niveles de oxígeno bajaron, el ICA también se ve afectado llegando a valores de hasta 0.37 lo que indica que la calidad de agua es pobre al tener dos variables fuera de los niveles deseados para un cultivo de camarón. Se observa que en el rango de 30 °C a 25 °C, sube el valor ICA a un nivel máximo de 0.876 indicando una excelente calidad de agua, al constatar que los rangos de las variables monitoreadas son los deseados. Este comportamiento coincide con el reportado por Hernández *et al*.

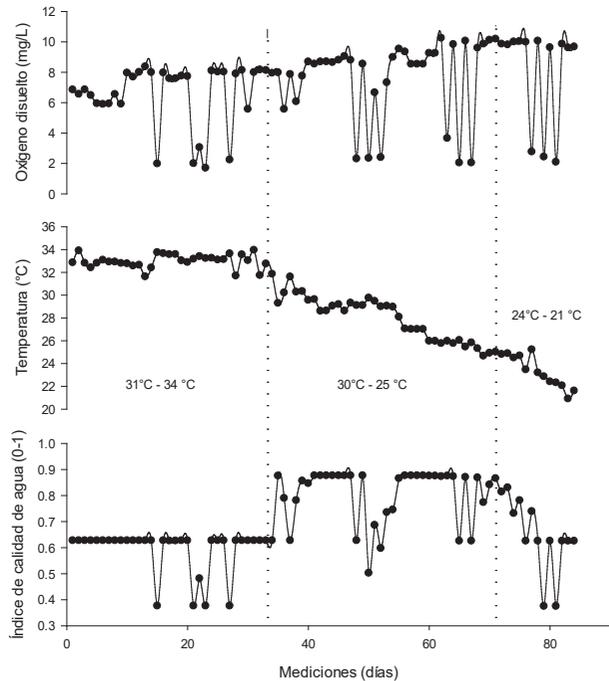


Figura 4. Resultados obtenidos del sistema de monitoreo de calidad de agua con OSH: Oxígeno disuelto, Temperatura e Índice de calidad de agua.

Figure 4. Results from the water quality system monitoring with OSH: Dissolved oxygen, Temperature and water quality index.

Al llegar la temperatura a l intervalo de 24 °C a 21 °C, el índice baja su valor a 0.625 lo que indica una calidad de agua buena, más sin embargo cuando se detectaron valores bajos de oxígeno, el índice llegó a valores de 0.375, determinando una regular calidad de agua. Lo más relevante a resaltar en este trabajo es la implementación física de estos sistemas, logrando el monitoreo en tiempo real en un cultivo, ya que anteriormente solo se contaban con datos reales de granjas pero procesados por computadora a través de un usuario. En la tabla 4 se muestra la relación que existe en el índice de calidad de agua a diferentes temperaturas y niveles de oxígeno disuelto y pH estables para un cultivo de camarón. Se puede observar que a temperatura alta (33.02±0.55 °C) el índice de calidad de agua es de 0.62 considerado este como indicador de buena calidad, seguido por una temperatura óptima para un cultivo de camarón (29.20±0.56 °C), en donde se obtiene el índice más alto de 0.83, lo que indica una excelente calidad de agua y en temperatura baja (23.37±1.33 °C) el índice fue

Tabla 4. Efecto de la temperatura y óptimo nivel de oxígeno disuelto sobre el índice de calidad de agua.

Table 4. Temperature effect and optimun dissolved oxygen level on water quality index.

| Temperatura (°C) | Oxígeno disuelto (mg/L) | pH | Índice de calidad de agua |
|------------------|-------------------------|-----------|---------------------------|
| 33.02±0.55 | 7.27±0.87 | 8.31±0.23 | 0.62±0.00 |
| 29.20±0.56 | 8.31±0.92 | 8.06±0.19 | 0.83±0.06 |
| 23.37±1.33 | 9.88±0.19 | 8.17±0.06 | 0.74±0.10 |

de 0.74 lo que indica también una buena calidad. En la tabla 5 se muestra la relación que existe en el índice de calidad de agua a diferentes temperaturas, nivel de oxígeno disuelto bajo (2.19 ± 0.53 mg/L) y pH estable (8.22 ± 0.12), los resultados indican que a temperatura alta y nivel bajo de oxígeno el índice de calidad de agua se encuentra en un valor de 0.40, considerado como un índice regular al tener dos variables fuera de los umbrales óptimos para el cultivo de camarón. Para una temperatura óptima el índice de colocó en 0.62 y para una temperatura baja se obtuvo un valor de 0.50 siendo una calidad de agua regular.

Tabla 5. Efecto de la temperatura con bajo nivel de oxígeno disuelto sobre el índice de calidad de agua.

Table 5. Temperature effect with low dissolved oxygen level on water quality index.

| Temperatura (°C) | Oxígeno disuelto (mg/L) | pH | Índice de calidad de agua |
|------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|
| 33.33 ± 0.52 | 2.19 ± 0.52 | 8.33 ± 0.17 | 0.40 ± 0.05 |
| 28.83 ± 0.43 | 2.24 ± 0.92 | 8.13 ± 0.16 | 0.62 ± 0.02 |
| 22.63 ± 1.23 | 2.14 ± 0.16 | 8.21 ± 0.04 | 0.50 ± 0.13 |

CONCLUSIONES

Los sistemas de inferencia difusa son una herramienta efectiva para el desarrollo de programas de monitoreo del índice de calidad de agua. La lógica difusa procesa y evalúa las variables fisicoquímicas básicas que afectan el cultivo del camarón, lo cual es reflejado en una sola medición precisa como resultado final. El sistema puede monitorear oxígeno disuelto, temperatura y pH continuamente y en tiempo real a un bajo costo lo que los hace accesible a los productores de la región.

REFERENCIAS

- Barraza-Guardado, R. H., Arreola-Lizárraga, J. A., Miranda-Baeza, A., Juárez-García, M., Juvera-Hoyos, A. and Casillas-Hernández, R. (2015) 'Enhancing Ecoefficiency in Shrimp Farming through Interconnected Ponds', *BioMed Research International*, 2015. doi: 10.1155/2015/873748.
- Bonarini, A., Matteucci, M., Migliavacca, M. and Rizzi, D. (2014) 'R2P: An open source hardware and software modular approach to robot prototyping', *Robotics and Autonomous Systems*. Elsevier B.V., 62(7), pp. 1073–1084. doi: 10.1016/j.robot.2013.08.009.
- Carbajal-hernández, J. J., Sánchez-fernández, L. P. and Carrasco-ocha, J. A. (2012) 'Immediate water quality assessment in shrimp culture using fuzzy inference systems', *Expert Systems with Applications*, 39, pp. 10571–10582. doi: 10.1016/j.eswa.2012.02.141.
- Carbajal-Hernández, J. J., Sánchez-Fernández, L. P., Villa-Vargas, L. a., Carrasco-Ochoa, J. a. and Martínez-Trinidad, J. F. (2013) 'Water quality assessment in shrimp culture using an analytical hierarchical process', *Ecological Indicators*. Elsevier Ltd, 29, pp. 148–158. doi: 10.1016/j.ecolind.2012.12.017.
- Casillas-Hernández, R., Nolasco-Soria, H., García-Galano, T., Carrillo-Farnes, O. and Páez-Osuna, 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*, 36(2), pp. 105–114. doi: 10.1016/j.aquaeng.2006.09.001.
- Colmenarejo, M. F., Vicente, J., Rubio, A. and Garcí, G. (2007) 'Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution', 7, pp. 315–328. doi: 10.1016/j.ecolind.2006.02.005.
- Faugel, H. and Bobkov, V. (2013) 'Open source hard- and software: Using Arduino boards to keep old hardware running', *Fusion Engineering and Design*. Elsevier B.V., 88(6–8), pp. 1276–1279. doi: 10.1016/j.fusengdes.2012.12.005.
- Ferdoush, S. and Li, X. (2014) 'Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications', *Procedia Computer Science*. Elsevier Masson SAS, 34, pp. 103–110. doi: 10.1016/j.procs.2014.07.059.
- Ferreira, N. C., Bonetti, C. and Seiffert, W. Q. (2011) 'Hydrological and Water Quality Indices as management tools in marine shrimp culture', *Aquaculture*. Elsevier B.V., 318(3–4), pp. 425–433. doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.05.045.
- Hernández, J. J. C., Fernández, L. P. S. and Pogrebnyak, O. (2011) 'Assessment and prediction of water quality in shrimp culture using signal processing techniques', *Aquaculture International*, 19(6), pp. 1083–1104. doi: 10.1007/s10499-011-9426-z.
- Lermontov, M., Augusta, M. and Machado, S. (2009) 'River quality analysis using fuzzy water quality index : Ribeira do Iguape river watershed , Brazil', 9, pp. 1188–1197. doi: 10.1016/j.ecolind.2009.02.006.
- Lin, Q., Jian, Z., Xu, M., Zetian, F., Wei, C. and Xiaoshuan, Z. (2011) 'Developing WSN-based traceability system for recirculation aquaculture', *Mathematical and Computer Modelling*. Elsevier Ltd, 53(11–12), pp. 2162–2172. doi: 10.1016/j.mcm.2010.08.023.
- Martinez-Porchas, M. and Martinez-Cordova, L. R. (2012) 'World aquaculture: environmental impacts and troubleshooting alternatives', *TheScientificWorldJournal*, 2012(April), p. 389623. doi: 10.1100/2012/389623.
- Mesas-Carrascosa, F. J., Verú Santano, D., Meroño, J. E., Sánchez de la Orden, M. and García-Ferrer, a. (2015) 'Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture', *Biosystems Engineering*, 137, pp. 73–83. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.07.005.
- Simo, S., Nobre, S. M., Josefa, M. and Yabe, S. (2008) 'Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies', 8, pp. 476–484. doi: 10.1016/j.ecolind.2007.05.002.
- Xu, Z. and Boyd, C. E. (2016) 'Reducing the monitoring parameters of fish pond water quality', *Aquaculture*. Elsevier B.V., 465, pp. 359–366. doi: 10.1016/j.aquaculture.2016.09.031.
- Yoshikawa, T., Murata, O., Furuya, K. and Eguchi, M. (2007) 'Short-term covariation of dissolved oxygen and phytoplankton photosynthesis in a coastal fish aquaculture site', *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74(3), pp. 515–527. doi: 10.1016/j.ecss.2007.05.004.
- Zhang, M., Li, D. and Wang, L. (2011) 'Design and Development of Water Quality Monitoring System Based on Wireless', pp. 629–641.