

Evaluación de los efectos de la variación de caudal sobre los niveles de amonio, nitrato y pH de un prototipo de cultivo acuapónico

Evaluation of the effects of varying water flow on the levels of Ammonium, Nitrate and Ph of a prototype aquaponic system.

Avaliação dos efeitos da variação de fluxo sobre os níveis de Amônia, Nitrito e Ph de um protótipo de cultivo acuapónico.

Para citar este artículo / To reference this article /
Para citar este artigo: Rodríguez Umaña, L. A. (2016).
Evaluación de los efectos de la variación de caudal sobre los niveles de amonio, nitrato y pH de un prototipo de cultivo acuapónico. *Ingenio Magno*, 7(2), 126-138.

Luis Alfredo Rodríguez-Umaña

Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Básicas
e Ingeniería, Grupo de investigación Gitecx

lrodriguez@unillanos.edu.co

Fecha de Recepción: 27 de Abril de 2016

Fecha de Aceptación: 06 de Julio de 2016

Resumen

Este artículo presenta los resultados del proyecto titulado “Diseño e implementación de un prototipo automatizado para los sistemas de recirculación y filtrado de agua mediante la técnica de detección de nitrato y amonio combinados”. Este prototipo se diseñó y construyó a escala de laboratorio mediante tres fases. Su objetivo general fue evaluar la efectividad de la técnica de detección del nitrato y amonio combinados en la materia orgánica del cultivo y su incidencia en la calidad del agua; para ello, se detectó el nivel de nitrato y amonio combinados presentes en un estanque de peces y se realizaron variaciones a la velocidad de su caudal de bombeo, lo cual permitió establecer su relación con los niveles de pH, temperatura, amonio y nitrato combinados. De este manera, se promovieron condiciones de funcionamiento más adecuadas para el proceso de filtrado de la materia orgánica y la preservación de la calidad del agua del cultivo sin necesidad de realizar recambios de ella. Se determinó el caudal más adecuado para el cultivo cuando se activó la bomba al 75% de su capacidad, a partir de lo cual se demuestra la influencia de las variaciones del caudal sobre los cambios en el pH y el amonio del agua del cultivo.

Palabras clave: calidad del agua, recirculación del agua, control de caudal, efluentes.

Abstract

This paper presents the results of the project “Design and implementation of an automated prototype for recirculation and filtration systems of water via the technique for detection of nitrate and ammonium combinations”, the prototype was built to scale in the laboratory, its general goal was to evaluate the effectiveness of the technique for detection of Nitrate and Ammonium combinations in the organic material of the system and its impact on the water quality, to this end we detected the level of Nitrate and Ammonium combinations present in the fish tank, we varied the water flow of the pump, allowing us to establish its relationship with the pH levels, temperature and ammonium and nitrate combinations in the fish tank, promoting operating conditions more appropriate to the process of filtering organic material and preserving the water quality of the system without needing to readjust it.

Keywords: Water quality, water recirculation, flow control, effluent.

Resumo

Este artigo apresenta os resultados do projeto intitulado “Projeto e implementação de um protótipo automatizado para os sistemas de recirculação e filtragem da água, através da técnica de detecção de Nitrato e Amônio combinados”. O protótipo foi construído em escala de laboratório, o objetivo geral foi avaliar a eficácia da técnica de detecção do Nitrato e do Amônio combinados na matéria orgânica do cultivo e o impacto na qualidade da água, para isso, detectou-se o nível de Nitrato e Amônio combinados presentes na lagoa dos peixes, foram realizadas variações na velocidade do fluxo de bombeamento, permitindo estabelecer a sua relação com os níveis de pH, temperatura e o Amônio e o Nitrato combinados na lagoa, promovendo as condições de funcionamento mais adequadas para o processo da filtragem da matéria orgânica e a preservação da qualidade da água do cultivo, sem a necessidade de trocá-la.

Palavras-chave: acuapónico, Amônio, fluxo de bombeamento.

1. Introducción

Durante el periodo 2000-2012, la producción acuícola mundial se expandió a una tasa anual promedio de 6,2%, con una producción acuícola mundial de 66,7 millones de toneladas en 2012. De hecho, superó la tasa mundial de crecimiento demográfico durante el mismo periodo, que fue del 1,6%. Se estima que para 2030 la acuicultura representaría el 62% del suministro mundial de pescado para el consumo humano (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2012). Esto impone a la humanidad retos en materia de estrategias que involucren la innovación, la gestión de la energía y el uso sostenible de los recursos hídricos y energéticos (Rakocy, 2003).

La disponibilidad de agua dulce es una de las condiciones elementales para la vida en la tierra; sin embargo, el agua es un recurso limitado que ahora está bajo una presión sin precedentes, debido al crecimiento de la población mundial, el cambio climático y la demanda de varios sectores económicos como el turismo, la industria y, en particular, la agricultura de riego, que son los principales sectores consumidores de agua (Romero, Muriel, García y Muñoz, 2012).

La aceptación de comunidades asiáticas de pagar por agua dulce reciclada de la acuicultura abre una posibilidad de reuso de este valioso recurso en cultivos de olivo y tomate, lo que representa una oportunidad de ingreso adicional a los productores (Menegaki, Hanley y Tsagarakis, 2007).

Una alternativa de producción de alimentos que utilizan poca cantidad de agua y energía son los cultivos acuapónicos, aquellos que producen vegetales y peces al mismo tiempo, a través de una relación simbiótica entre especies (Tyson, Treadwell y Simonne, 2011). En la figura 1 se muestran las partes fundamentales de un cultivo acuapónico.

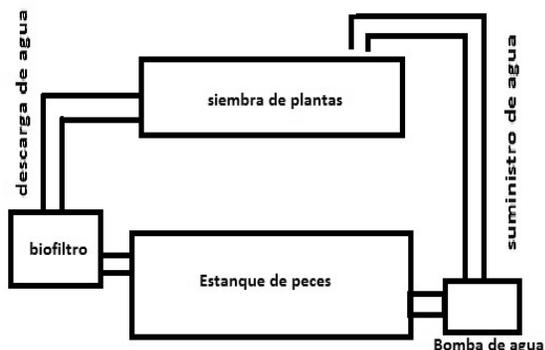


Figura 1. Partes de un cultivo acuapónico

En un cultivo acuapónico la relación entre plantas y peces inicia cuando se alimentan los peces y estos metabólicamente generan amoníaco y lo excretan en el agua (Tyson, Treadwell y Simonne, 2011). El amoníaco está presente en el medioambiente acuático debido a la escorrentía agrícola y la descomposición de los residuos biológicos. Además, es tóxico para todos los vertebrados, porque causa convulsiones, coma y la muerte, lo que se explica probablemente porque eleva los niveles de nitritos, desplaza los iones de potasio y despolariza las neuronas, lo cual provoca la activación de los receptores de glutamato tipo NMDA, que conduce a una afluencia de excesiva Ca^{2+} y la muerte celular subsiguiente en el sistema nervioso central (Randall y Tsui, 2002).

Este material se disuelve en el agua y se hace circular hacia un cultivo hidropónico, en el cual hay bacterias que degradan el amoníaco en forma de nitrito, y este, a su vez, en nitrato, para luego utilizarlo como el abono principal para las plantas. La función de estas últimas es liberar de amonio el agua de los peces para que ellos mismos puedan vivir allí (proceso de mineralización). El agua libre de amonio se hace recircular hacia los peces y de esta manera se hace un uso eficiente del agua sin necesidad de realizar su recambio.

Una gran ventaja de la acuaponía es su alta eficiencia de utilización de nitrógeno (NUE). El nitrógeno es un elemento vital para todos los organismos vivos, y alimento para peces ricos en proteínas, lo que representa el 50-70% de los costos de producción en un cultivo de peces (Valente *et al.*, 2011).

Existen varias técnicas para detectar y controlar los niveles de amonio en el agua; un ejemplo es la desarrollada por Kioussis, Wheaton y Kofinas (2000): su método consiste en utilizar hidrogeles poliméricos para eliminar eficazmente nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) y ortofosfato (PO_4^{3-}), los cuales se comportan como aniones de nutrientes de las aguas residuales de la acuicultura. Sus experimentos mostraron que las concentraciones de nutrientes en los efluentes de aguas residuales de la acuicultura disminuyeron con respecto a los ortofosfatos en 98%, NO_3^- en 50% y NO_2^- en un 85%, en una reacción química que duró tres horas.

Pagand, Blancheton y Claude (2000) plantearon un modelo para predecir las cantidades de nitrógeno inorgánico disuelto liberados en los efluentes de un sistema de recirculación de agua. Debido a la relación entre la cantidad de nitrógeno y las cantidades de amonio y nitrato presentes en el agua, este modelo cobra gran importancia y merece ser tenido en cuenta. El modelo considera plantear submodelos empíricos para el crecimiento de los peces, los alimentos ingeridos y el reemplazo del agua. En [1] se presenta la ecuación para determinar la tasa de crecimiento específico (SGR) ($\% \text{dia}^{-1}$), y la tasa de alimentación diaria (DFR) ($\% \text{dia}^{-1}$); ambas dependen del peso promedio, W (g), de los peces:

$$Y = a * W^b \quad [1]$$

Donde Y puede ser SGR o DFR, a es el día inicial y b es el día final. En [2] y [3] se presentan los dos casos de cálculo usando la expresión para la tasa de

crecimiento específico y la tasa de alimentación diaria, respectivamente.

Para $Y = \text{SGR}$ entonces:

$$\text{SGR}(\% \text{dia}^{-1}) = a * W^b \quad [2]$$

Para $Y = \text{DFR}$ entonces:

$$\text{DFR}(\% \text{dia}^{-1}) = a * W^b \quad [3]$$

En [4] se expresa la velocidad de descarga DIN, ΓN (% del nitrógeno ingerido); en el sistema de acuicultura experimental se expresó como una función del aumento de velocidad de flujo de agua de repuesto:

$$\theta (\% \text{dia}^{-1}): \text{DIN} = c * \theta^d \quad [4]$$

Donde c es la velocidad inicial y d es la velocidad de salida del SAR.

Las técnicas para la remoción eficiente del nitrógeno y los sólidos en suspensión de los tanques de cultivo para los SAR tienen especial importancia como primer mecanismo para garantizar un adecuado tratamiento de las aguas residuales y su posterior vertimiento o reúso (Crab *et al.*, 2007).

Meng *et al.* (2009) diseñaron un sistema que utilizó múltiples bacterias, el cual estaba dominado por *Bacillus licheniformis* y fue desarrollado para el tratamiento de aguas residuales de la acuicultura. Este sistema permite controlar varios factores (por ejemplo, el pH). Los resultados mostraron que la calidad del agua a la que se añadió bacterias era mejor que el que no las utilizó.

La investigación de Teichert y Oddington (2010) determinó que la técnica de sedimentación es eficiente en la remoción de sólidos en suspensión, y no lo es para nitrato y amonio; por esto, la sedimentación debe ser

solamente una parte del tratamiento del efluente y debe evitarse la fragmentación de los sólidos en suspensión por la exagerada turbulencia de los aireadores, que perjudican la acción del filtro; además, logró alterar las tasas de eliminación de nitrato al modificar los recambios de agua, lo cual generó una reducción sobre la demanda biológica de oxígeno (DBO).

Una técnica para modificar las cantidades de nitrato presente en el agua del cultivo y de reducir el aumento en la DBO es realizar variaciones en las velocidades del flujo del agua. Los estudios demuestran que estos valores deben determinarse para cada pareja de cultivos peces-plantas, pues cada tipo de planta y pez reaccionan de diferentes maneras a la cantidad de materia orgánica presente (Tanveer *et al.*, 2015).

La investigación, el diseño y la implementación del prototipo automatizado para los sistemas de recirculación y filtrado de agua mediante la técnica de detección de nitrato y amonio, que se documentan en este artículo, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Automatización de la Universidad de los Llanos (Unillanos). Como antecedentes tecnológicos para obtener un diseño conceptual del prototipo, se parte de los desarrollos hechos por Ridha y Cruz (2001), Randall y Tsui (2002), Piedrahíta (2003), Crab *et al.* (2007), Oca y Masaló (2013), y otros investigadores.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la influencia de los cambios de velocidad del flujo del agua en el SRA, sobre los cambios de amonio, pH y temperatura del agua en el cultivo de peces. También busca evaluar la eficiencia del filtrado de la materia orgánica generada en el prototipo del cultivo acuapónico, compuesto por tilapias rojas y plantas aromáticas como toronjil, manzanilla, caléndula y romero.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó una metodología basada en 3 fases: fase 1, de documentación y diseño; fase 2, de implementación; y fase 3, de prueba y puesta a punto. En la fase 1 se realizó la documentación sobre los cultivos acuapónicos y los sistemas de recirculación de agua (SAR); por ello, se determina usar 50 alevines de tilapias rojas como especie para el estanque, por su alta resistencia a cambios en el pH y el amonio del agua; se plantaron también en semilleros las plantas que se utilizarían en el cultivo.

Para tal fin, se seleccionaron cuatro especies aromáticas de ciclo corto: toronjil, manzanilla, caléndula y romero, con 10 plantas de cada especie, para un total de 40 plantas en el cultivo. Para el cálculo de la cantidad de materia orgánica del cultivo se tuvieron en cuenta los desarrollos realizados por Teichert y Oddington (2010). La fase 1 termina con la identificación y selección del *hardware* y el *software* que se habrían de utilizar en el diseño de los circuitos, para la medición y el control de las variables.

Durante la fase 2 se construyen la estructura del prototipo de cultivo acuapónico y los circuitos, se programaron los dispositivos de *hardware* y se realizaron pruebas de medición de caudal, amonio y pH. Una vez medidas las variables, se implementa la interfaz gráfica de usuario y el módulo de comunicación para transmitir los datos a un servidor web.

En la fase 3 se realizó la puesta a punto del prototipo, y se midieron y almacenaron las variables *caudal*, *amonio* y *temperatura*. Mediante un servidor web se controló la velocidad de bombeo, se visualizaron los registros, se exportaron los datos de lectura de las variables en archivos históricos de Excel para su graficación y se analizaron las relaciones entre ellas. Cada una de las etapas fue evaluada y ajustada permanentemente durante su desarrollo evolutivo.

Para evaluar los efectos de la variación del caudal en litros por minuto (L/min) sobre los niveles de pH y el amonio medido en partes por millón (ppm), se realizaron modificaciones periódicas del 25%, 50%, 75% y 100% de la velocidad de la bomba de agua, a través un modulador de anchura de pulsos cada hora.

Se registraron los datos en la base de datos vía *web socket*, durante las 24 horas del día, cada 15 minutos, para un total de 96 registros diarios. Estos datos se graficaron así: caudal vs. amonio, caudal vs. temperatura y caudal vs. pH. Se listan los materiales y desarrollo del proyecto a continuación.

A. Prototipo de cultivo acuapónico construido

La arquitectura del prototipo implementado está conformada por una estructura física utilizada para albergar el cultivo de peces y las plantas. El componente *hardware* está constituido por tres tarjetas electrónicas dedicadas a la lectura y el procesamiento de los sensores de temperatura, caudal amonio y pH, y por una tarjeta para la transmisión de los datos.

El componente *software* lo constituyen los aplicativos para captura de imagen del nivel amonio y nitrato. El aplicativo para transmisión de datos a la nube los almacena, para ser monitoreados de manera permanente desde la web.

1) Estructura del cultivo

En la figura 2 se muestra el prototipo de cultivo acuapónico implementado para el proyecto; está conformado por una estructura física que contiene tanto el estanque de los peces como las camas de siembra.



Figura 2. Estructura de cultivo acuapónico con partes implementadas

El prototipo de cultivo acuapónico funciona de la siguiente manera: el agua del estanque de los peces es bombeada hacia el nivel superior donde se encuentra la cama de grava; allí pasa previamente por el biofiltro para capturar el material más particulado; posteriormente el agua se drena hacia los niveles inferiores, a través de una serie de tuberías, donde se encuentran las camas flotantes de las plantas, para su posterior vertimiento nuevamente en el estanque de los peces. Se repite el ciclo a una velocidad prefijada por el sistema con un PWM que se controla desde la nube.

2) Componente *hardware*

Está conformado por la tarjeta de adquisición de datos, la tarjeta de acople de conexiones y la tarjeta de transmisión de la información hacia y desde la nube.

a) Tarjeta de adquisición de datos

Se selecciona para esta función una tarjeta Arduino 1, por su versatilidad y sencillez de programación y los

recursos como puerto análogo de conexión USB. La figura 3 muestra en físico la tarjeta utilizada.

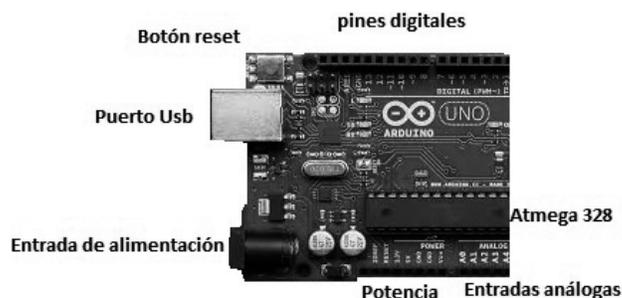


Figura 3. Tarjeta utilizada para conectar los sensores

b) Tarjeta de acople de conexiones

Realiza las veces de interfaz entre el Arduino y la Raspberry Pi 2. En la figura 4 se muestran las terminales asignadas a cada puerto de la tarjeta, la cual incluye

un circuito PWM para controlar la velocidad del caudal de bombeo desde el estanque de los peces hasta la cama de grava.

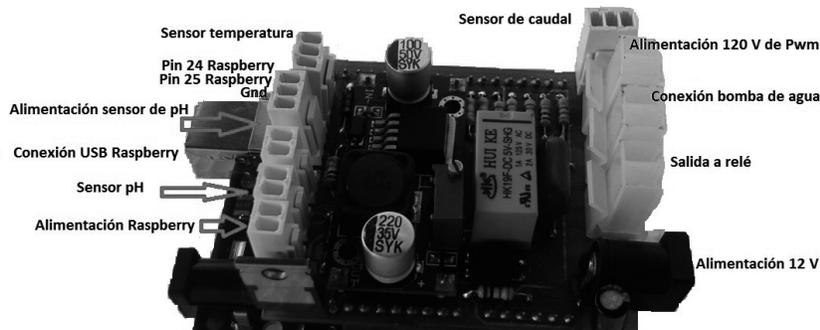


Figura 4. Tarjeta de interfaz implementada para conexión de sensores

c) Tarjeta de transmisión y recepción de datos

Para realizar esta función se eligió la tarjeta Raspberry Pi 2, debido a que permite realizar el tratamiento digital de imágenes con lenguaje Python y provee una fácil conexión web a través de sockets. Se encarga de recibir y enviar datos al Arduino a través de la conexión de su bus serial universal (figura 5).



Figura 5. Tarjeta Raspberry Pi 2 utilizada para la comunicación y transmisión de los datos

3) Sensores utilizados

Las variables por medir son pH, caudal, temperatura, amonio y nitrato combinados; para ello se seleccionaron los sensores que se describen a continuación.

caudal es de tipo efecto *hall* y funciona generando pulsos al paso de agua a través de él. Además, no requiere de acople de su señal. Como sensor de temperatura se utilizó el DS18B20, que ofrece una salida análoga. Los sensores se muestran en la figura 6.

a) Lectura de pH, caudal y temperatura

El sensor de pH tiene una salida normalizada de 4 mA a 20 mA y siempre permanece sumergido. El sensor de



Figura 6. Sensores utilizados para medir pH, caudal y temperatura

b) Sensor de amonio y nitrato combinados

Para la medición de esta variable se usó el tratamiento digital de imágenes, se tomó la fotografía a un disco indicador de amonio y nitrato combinados sumergido dentro del estanque, se digitalizó dicha imagen y mediante un algoritmo se identificaron las partes por millón de amonio y nitrato presentes en el estanque de los peces. En la figura 7 podemos ver el montaje de la cámara frente al disco y el disco indicador utilizado.

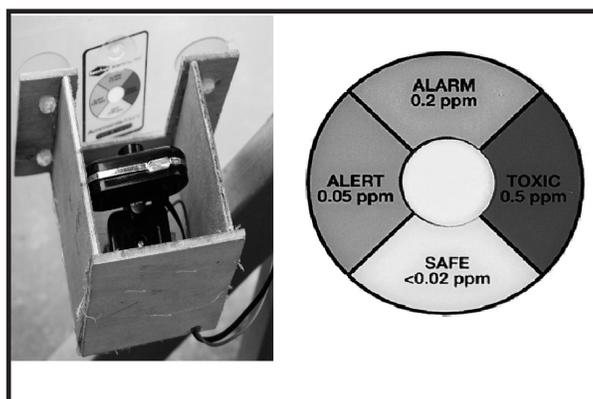


Figura 7. Disposición de la cámara para toma de imágenes y disco indicador sumergido en el estanque de peces

c) Conexión del hardware

En la figura 8 podemos ver cómo se conectan entre sí las tarjetas. Los sensores de caudal, temperatura y pH van conectados a la tarjeta de expansión y potencia del Arduino; esta entrega la información de los 3 sensores a través del puerto USB a la Raspberry. Esta, por su parte, la recibe junto con la imagen de la cámara, procesa el color de la imagen, identifica el nivel de amonio y nitrato,

concatena la información en un vector y lo entrega a la base de datos del servidor dispuesto para tal fin en la web.

La información es tomada por el aplicativo para su monitoreo en el computador, donde se grafica y se pueden descargar los registros históricos de las variables, con el fin de observar el comportamiento de las variables frente a los cambios de caudal, ordenados a través de un *web socket* a la bomba del estanque de los peces.

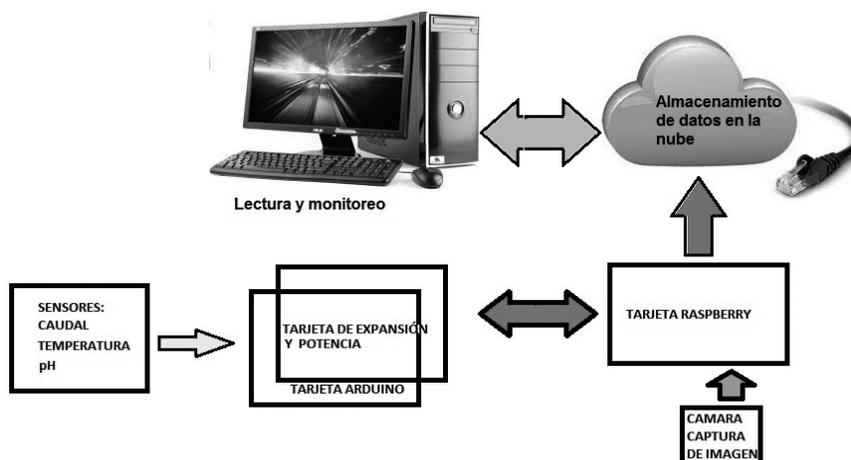


Figura 8. Diagrama de bloques de la conexión del hardware

4. Componente de software

En la figura 9 se muestran las rutinas para la lectura, transmisión y graficación de los datos. Las etapas de lectura y transmisión se desarrollaron en una tarjeta

Arduino 1; la concatenación y etapa de transmisión, en una tarjeta Raspberry Pi2; a la base de datos se accede a través de un *web socket*.



Figura 9. Diagrama de flujo para las etapas de la lectura, transmisión y graficación de los datos adquiridos por los sensores

3. Resultados

En la figura 10 se observa el comportamiento de las variables de amonio, pH y temperatura frente a los cambios del caudal de la bomba de agua.

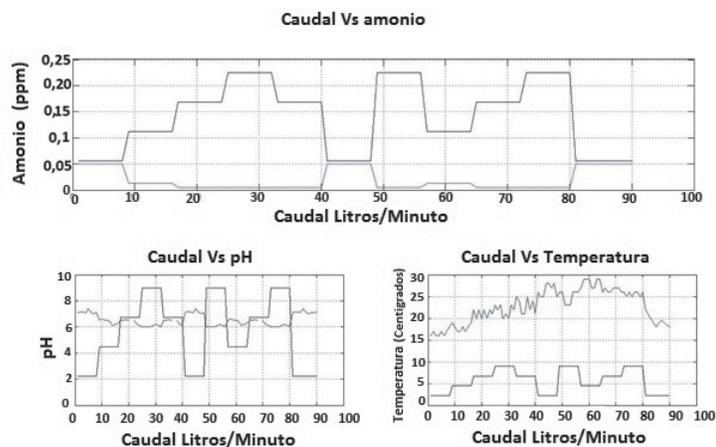


Figura 10. Curvas de respuestas para cambios de caudal vs. amonio, pH y temperatura

A. Amonio

Frente a los incrementos del caudal, el amonio disminuyó sus valores: siempre se mantuvo en valores promedio de seguridad para las tilapias rojas (0,18 ppm). Las variaciones del amonio sufrieron cambios sustanciales cuando la bomba de agua funcionó al 100%, los sólidos del biofiltro se dividen y no se logra condensar con facilidad, debido a fenómenos de turbulencia en el estanque de peces (Teichert y Oddington, 2010).

B. pH

En cuanto al comportamiento, el pH no presentó incrementos significativos cuando se elevó el caudal. Aunque los procesos biológicos desarrollados por las tilapias y las plantas en el biofiltro alteran el pH en el agua, la continua recirculación diaria del agua contribuye a mantener los niveles homogéneos (Ridha, 2001).

Los recambios de agua del cultivo inferiores al 10% del volumen del tanque garantizan un equilibrio entre la carga orgánica y los niveles de amonio (Tanveer *et al.*, 2015).

C. Temperatura

Su promedio en el estanque fue de 25 °C; la refrigeración del medio por convección permite mantener valores seguros para la tilapia roja (Oca y Masaló, 2013); los valores máximos se presentaron al mediodía y los mínimos, en la madrugada.

D. Filtrado de la materia orgánica

La remoción de sólidos realizada por el biofiltro tuvo diferencias significativas entre las diferentes velocidades de la bomba de agua; los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1. Materia orgánica retenida por el biofiltro diariamente, para cuatro velocidades de bombeo

Velocidad de la bomba	Peso de concentrado suministrado al día	Peso de materia Orgánica filtrada al día
25%	100 g	15 g
50%	100 g	20 g
70%	100 g	30 g
100%	100 g	18 g

La velocidad más efectiva para la retención del material particulado de la materia orgánica fue la de 70%. La influencia de los fenómenos de turbulencia y el tamaño del material particulado son determinantes para generar un efecto de desfragmentación en múltiples y pequeñas partículas, las cuales taponan las raíces de las plantas y, en consecuencia, estas generan una pobre nutrición y se debilitan (Schneider, Sereti, Eding y Verreth, 2005).

4. Discusión

La temperatura media del estanque de agua se mantuvo en os 25 °C, el pH promedio fue de 6,5 y los niveles de amonio y nitrato combinados fueron de 0,25 ppm.

Estas condiciones fueron propiciadas por su constante aireación gracias a la arquitectura del prototipo, ya que al usar el sistema de descarga por gravedad, se refrigera el fluido y se logra disminuir la temperatura por convección, debido a su constante movimiento (Romero *et al.*, 2012).

Las plantas crecieron con buen ritmo y se mantuvieron nutridas en el sistema de camas flotantes; se evidenciaron sus progresos con inspección visual diaria, por su color verde y fortaleza en tallos y raíces, sin exponerse a cambios bruscos de clima. Los peces mantuvieron su hábitat preservado, gracias a lo cual se

podieron establecer periodos y cantidades adecuadas de alimentación, a fin de no sobrecargar el cultivo con materia orgánica (Rijin, 2013).

Las variaciones realizadas al caudal de la bomba a través del modulador de anchura de pulsos evidenciaron el efecto que esta tiene en la desintegración del material particulado y la eficiencia del biofiltro, ya que, a velocidades excesivas, este sufre un proceso de descompactación y se divide en minúsculas partículas que pasan del estanque a las camas flotantes a tapar las raíces de las plantas; en consecuencia, disminuye el ciclo de cultivo de las plantas del sistema de camas flotantes.

La implementación de sensores con mejor resolución es un factor determinante a la hora de evaluar resultados, ya que de su precisión y efectividad se pueden sacar ventajas para asegurar un proceso tecnificado y confiable. El control de la velocidad de bombeo es un aporte sustancial, al poder manipular a la medida su efecto en el desempeño del biofiltro, además de disminuir el consumo de energía eléctrica.

La medición de los parámetros del cultivo acuapónico se realizaron gracias a la arquitectura abierta de los circuitos de medición y control, lo cual hace posible la inclusión futura de más variables. Se recomienda medir la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, para poder garantizar aún más su calidad, e implementar un sistema de monitoreo y control para el nivel del agua del estanque, ya que por el fenómeno de evaporación se producen cambios en el volumen del líquido.

5. Conclusiones

Los resultados de las pruebas de operación del prototipo de cultivo acuapónico registraron cuál es la velocidad de la bomba más efectiva para retener el material particulado de la materia orgánica en el biofiltro. En términos de efectividad del método de detección del

amonio y nitrato combinados, junto con la variación de la velocidad de la bomba del SAR, se observa que para una misma cantidad de alimento suministrado y diferentes velocidades de bombeo, existe un caudal que optimiza la función del biofiltro.

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que la técnica de detección de nitrato y amonio combinados es funcional y se puede acompañar con procesos técnicamente viables —como el control de velocidad de bombeo y nivel del agua—, para obtener mejores resultados de productividad en un cultivo acuapónico. Resultado de este análisis, se evidencia la necesidad de optimizar el diseño del equipo a nivel de sistemas de control, para lograr mayores niveles de precisión y eficiencia en el proceso.

A través de esta investigación se ha desarrollado un prototipo útil para el estudio del comportamiento de los cultivos acuapónicos, en el cual se puede experimentar con diversas especies de peces y plantas, en búsqueda de la mejor relación de las variables para el SAR.

6. Referencias

Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P. y Verstraeteet, W. (2007). Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*, 270(1-4), 1-14. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2007.05.006.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2012). *The state of World Fisheries and Aquaculture*. Roma.

Kioussis, D. R., Wheaton, F. W. y Kofinas, P. (2000). Reactive nitrogen and phosphorus removal from aquaculture wastewater effluents using polymer hydrogels. *Aquacult Engineering*, 23, 315-332. Doi: 10.1016/S0144-8609(00)00058-3

- Menegaki, A. N., Hanley, N. y Tsagarakis, K. P. (2007). The social acceptability and valuation of recycled water in Crete; A study of consumers and farmers attitudes". *Ecological Economics*, 52, 7-18. Doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.01.008
- Meng, R., He, L. S., Xi, B. D., Hu, X. y Li, Y. Y. (2009). Experimental study on purifying aquaculture wastewater between bacillus and nitrifying bacteria. *Environmental Science & Technology*, 32(11), 28-31.
- Oca, J. y Masaló, I. (2013). Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacultural Engineering*, 52, 6572. Doi: 10.1016/j.aquaeng.2012.09.002
- Pagand, P., Blancheton, J. P. y Claude, C. (2000). A model for predicting the quantities of dissolved inorganic nitrogen released in effluents from a sea bass (*Dicentrarchus labrax*) recirculating water system. *Aquacultural Engineering*, 22, 137-153. Doi: 10.1016/S0144-8609(00)00037-6
- Piedrahíta, R. H. (2003). Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*, 226(1-4), 35-44. Doi: 10.1016/S0044-8486(03)00465-4.
- Rakocy, J. (2003). Initial economic analysis of aquaponic systems. *European Aquaculture Society*, 33, 58-64.
- Randall, D. J. y Tsui, T. K. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 45, 17-23. Doi: 10.1016/S0025-326X(02)00227-8
- Ridha, M. T. y Cruz, E. M. (2001). Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* L. reared in a simple recirculating system. *Aquacultural Engineering*, 24, 57-166. Doi: 10.1016/S0144-8609(01)00060-7
- Rijin, J. V. (2013). Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 53, 49-56. Doi: 10.1016/j.aquaeng.2012.11.010
- Romero, R., Muriel, J. L., García, I. y Muñoz de la Peña, D. (2012). Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agricultural Water Management*, 114, 59-66. Doi: 10.1016/j.agwat.2012.06.026.
- Schneider, O., Sereti, V., Eding, E. H. y Verreth, J. A. (2005). Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 32, 379-401. Doi: 10.1016/j.aquaeng.2004.09.001
- Teichert, C. y Oddington, D. R. (2010). Treatment of harvest discharge from intensive shrimp ponds by settling". *Aquacultural Engineering*, 19, 147-161. Doi: 10.1016/S0144-8609(98)00047-8.
- Tyson, R. V., Treadwell, D. D. y Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponics. *HortTechnology*, 21(1), 6-13.
- Valente, L. M., Linares, F., Villanueva, J. L., Silva, J.M., Espe, M., Escórcio, C., Pires, M. A., Saavedra, M. J., Borges, P., Medale, F., Álvarez, B. y Peleteiro, J. B. (2011). Dietary protein source or energy levels have no major impact on growth performance, nutrient utilisation or flesh fatty acids composition of market-sized. *Aquaculture*, 318, 128-137. Doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.05.026