

Tecnologías para optimizar el agua en la acuicultura

María de la Luz Sánchez Estrada; Valeria Caltzontzin Rabell;
Priscila Sarai Flores Aguilar, Genaro Martín Soto Zarazúa,

Correspondencia: luzsanc_25@hotmail.com, Valeria.caltzontzinrabell@gmail.com, pflores21@alumnos.uaq.mx ,
genaro.soto@uaq.mx

Resumen

En México la acuicultura, al igual que en otros países, está creciendo y obligando a los productores a consumir o extraer grandes cantidades de agua. Este consumo es comparable al que ocupa el ganado, razón por la cual los acuicultores mexicanos necesitan actualizarse en el uso racional del recurso hídrico. Lo anterior es posible lograrlo a través de tecnologías que se ocupan en otros países con el fin de hacer eficiente el consumo de agua para no drenarla como lo hacen la mayoría de las industrias acuícolas. Este texto presenta las tecnologías actuales que pueden utilizarse en el cultivo de peces para usar menos recurso hídrico.

Palabras clave: acuicultura, biofloc, acuaponía, sistema de recirculación acuícola

Abstract

As in other countries, aquaculture in Mexico is growing, forcing producers to consume or extract large amounts of water. This consumption is comparable to that of livestock; therefore, Mexican aquaculture farmers need to be updated in the rational use of water resources through technologies that are used in other countries to make water consumption efficient and not drain it as most aquaculture industries currently do. This manuscript presents current technologies that can be used in fish farming to use fewer water resources.

Keywords: aquaculture, biofloc, aquaponic, recirculating aquaculture sistem

Artículo arbitrado

Recibido:

15 de febrero de 2023

Aceptado:

06 de marzo de 2023

Introducción

La acuicultura es una de las mayores industrias para la producción de alimentos. Su crecimiento promedio anual es de 3.2 % y se prevé que su consumo aumente de 52 % a 58 % para el año 2030 (Tom et al., 2021). Entre los organismos más cultivados se encuentran: camarón, róbalo, rodaballo, fugu, mero, tilapia, carpa y abulón (Robles-Porchas et al., 2020).

Este crecimiento se debe principalmente al aumento poblacional y a la disminución en la captura de especies salvajes. Sin embargo, esta demanda trae consigo daños al ambiente pues se contamina el agua, se genera eutrofización y se liberan químicos tóxicos, entre otros (Ahmad et al., 2021). El agua en los sistemas acuícolas tiene una importante carga orgánica, la cual está compuesta de residuos de alimento, heces y nutrientes como fósforo y nitrógeno, los cuales crean un ambiente dañino para los peces. Además, esta composición aumenta la actividad de bacterias aeróbicas y provoca que el oxígeno disuelto en el agua disminuya. La escasez del agua, así como su contaminación, son retos a los cuales nos enfrentamos como humanidad. Por esa razón, se requiere del desarrollo de tecnologías sustentables para optimizar y mejorar el tratamiento de aguas residuales acuícolas (Tom et al., 2021).

Para contribuir en la solución de esta problemática se han propuesto, desarrollado e implementado diversas tecnologías, tales como: los Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS por sus siglas en inglés), el Sistema Biofloc y la Acuaponía. En la Figura 1 se ilustra su funcionamiento. El presente trabajo tiene como objetivo describir cada una de las tecnologías tradicionales, las nuevas propuestas, sus ventajas y desventajas, así como las perspectivas que existen respecto a su desarrollo.

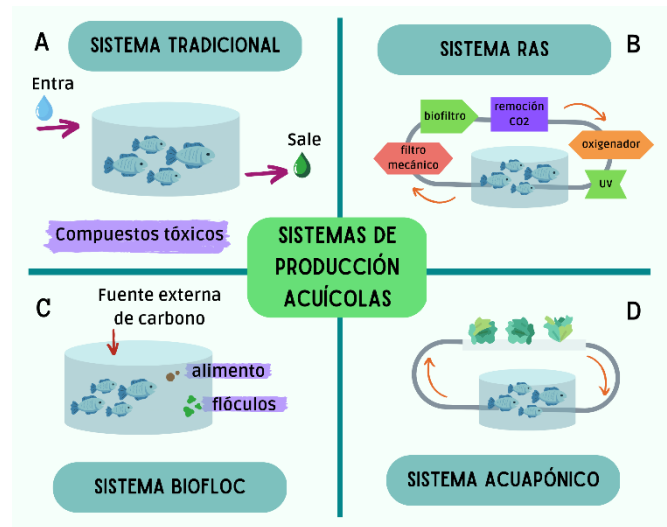


Figura 1. Tipos de sistemas de producción acuícola Fuente: Elaboración propia.

Sistema tradicional

La técnica de cultivo acuícola tradicional (utilizada por la mayoría de los acuicultores) usa una gran cantidad de agua limpia y tiene la desventaja de tirar agua sin medida diariamente. En promedio se tiene una tasa de recambio de entre el 20 % y 50 % del volumen de un estanque; este porcentaje puede ser ajustado dependiendo de la densidad y la disponibilidad de agua (Ver Figura 1a). La razón del recambio se debe a la concentración dentro de los estanques de sedimentos y compuestos tóxicos como amoníaco, amonio, nitritos (NH_3 , NH_4^+ , NO_2), entre otros; compuestos que deben ser removidos (Guzmán-Luna et al., 2021).

Para el año 2015, México contaba con 47 centros de cría de alevines y 3 970 centros de engorde registrados en el Consejo Nacional de Pesca y Acuicultura (aunque existían otros no registrados). Los sistemas de producción acuícola son los sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos que, de acuerdo con los insumos que requieran, generan diferentes impactos ambientales. Por ejemplo, los sistemas de producción semi-intensivos e intensivos se caracterizan por su maximización de la producción con altos rendimientos de 100 Tm/ha/año a 500 Tm/ha/año. Estos sistemas dependen totalmente de

alimento comercial, energía y recambios constantes de agua. En contraste, los sistemas extensivos almacenan peces a bajas densidades (tres peces por m³) y requieren de fertilizantes para estimular la producción natural del alimento dentro de los estanques. La desventaja: los fertilizantes contaminan el agua (Guzmán-Luna et al., 2021).

En una comparativa de la cantidad de agua utilizada en México para producir proteína de origen animal, la tilapia producida en sistemas intensivos genera la mayor huella hídrica (126 l/g de proteína), por encima de la carne de res (51 l/g), el cerdo (33 l/g) y las aves de corral (14 l/g) (Guzmán-Luna et al., 2021).

A pesar de que los peces de la acuicultura muestran un gran potencial para contribuir a la seguridad alimentaria, este tipo de producción está relacionada con altos impactos ambientales. México produce el 91 % de la tilapia que se consume en el país y, además, es el noveno productor mundial de tilapia con 180 000 toneladas reportadas en 2017 (Guzmán-Luna et al., 2021).

Recientes estudios resaltan una gran preocupación sobre la acuicultura de tilapia en los sistemas intensivos de México, pues éstos tienen grandes huellas de agua, energía y tierra debido a las cargas de efluentes del estanque. Sin embargo y debido al rápido crecimiento de la acuicultura, estas preocupaciones no han recibido mucha atención de los organismos que protegen el agua, por lo cual las consecuencias son inciertas a corto plazo.

En este sentido, los investigadores científicos centran sus estudios en hacer eficientes los procesos acuícolas para mejorar el rendimiento del cultivo, el control de enfermedades, el ahorro de energía y agua. Es este último, el agua, el más importante en el enfoque de este artículo, pues frente al calentamiento global el recurso hídrico en la acuicultura deberá ser monitoreado y regulado, esto con el fin de tomar acciones inmediatas para optimizar su uso.

Sistema de Recirculación Acuícola

Una de las estrategias que ha mostrado gran potencial es el Sistema de Recirculación Acuícola (RAS por sus siglas en inglés) (Figura 1b). Este sistema, el cual permite cultivar peces bajo techo y en un sistema controlado, fue desarrollado en 1950 en Japón. La primera vez que se propuso para la producción comercial de peces fue en Dinamarca en los años setenta. A partir de ahí, y durante las últimas dos décadas, la aplicación y desarrollo de estos sistemas ha crecido de manera significativa.

Los sistemas RAS han otorgado la oportunidad de producir peces en agua con baja calidad y entornos poco favorables. Se ha reportado que es posible cultivar tanto peces de agua dulce y cálida como peces de agua salada y fría; es posible producir alevines, peces en etapa juvenil y exóticos, lo cual lo vuelve un sistema flexible (Ahmed & Turchini, 2021). Algunos ejemplos de especies cultivadas son anguila, gambas, salmón, lubina, trucha, rodaballo, tilapia, atún, entre otros (Ahmad et al., 2021).

Un sistema RAS está compuesto por tanques con peces que se encuentran bajo un ambiente controlado dentro de construcciones cerradas, normalmente invernaderos. Para limpiar el agua se utilizan sedimentadores, filtros mecánicos, filtros biológicos y esterilización UV. Para oxigenarla se utilizan oxigenadores. Una vez tratada, el agua recircula nuevamente al sistema (Robles-Porchas et al., 2020). De manera general, se logra reutilizar hasta un 90 % total del agua (Tom et al., 2021), pues sólo se tienen pérdidas por evaporación y por la extracción de lodos sedimentados (los cuales contienen entre 85 % y 98 % de la materia orgánica) (Ahmad et al., 2021).

La densidad de cultivo que puede lograrse con el sistema RAS se encuentra entre 70 kg/m³ y 120 kg/m³, con radios de conversión alimenticios entre 0.8 y 1.1. En los sistemas más grandes se pueden generar hasta 500 toneladas de peces al año. Esta elevada producción hace que el sistema también se conozca como cultivo hiper o super intensivo. Respecto a su impacto ambiental, este sistema permite aumentar el manejo de residuos, reducir la cantidad de agua utilizada y reciclar los nutrientes. Además, debido a los procesos de tratamiento sobre los nitritos presentes en el agua, los cuales son convertidos a nitratos, puede ser incorporado en un sistema integrado de agricultura y acuicultura conocido como Acuaponía (Ahmed & Turchini, 2021).

Aunque el RAS presenta diversas ventajas, su contribución a la producción acuícola global es baja. Esto se debe a diversos retos económicos y tecnológicos que incluyen la compra de equipos sofisticados como bombas, reguladores de temperatura, filtros y sensores para el monitoreo avanzado, además de la necesidad de la automatización de los sistemas de control (Ahmad et al., 2021). En este sentido, la energía juega un importante papel pues aumenta los costos operacionales. En comparación con un sistema de flujo continuo, el consumo total de energía del sistema RAS es entre 24 % y 40 % mayor (Badiola et al., 2018). Algunas propuestas para atacar estas desventajas incluyen: el uso de energías renovables como los sistemas fotovoltaicos para equipos (Badiola et al., 2018), la optimización de los procesos, el análisis tecno-económico para la compra de equipos más eficientes y el análisis del ciclo de vida del proceso completo, esto con el fin de identificar oportunidades que disminuyan los costos de transportación de los insumos (Ahmed & Turchini, 2021).

Sistema Biofloc

Otra tecnología ampliamente aceptada y de fácil manejo es el sistema Biofloc. Éste fue reportado por primera vez por Avnimelech en 1999 y desde entonces ha sido ampliamente estudiado como una de las alternativas de cultivo acuícola más sostenible, esto debido a que en él no existe el intercambio de agua. Esta tecnología es compleja pues se requiere conocimiento del sistema. En términos generales, se utiliza una fuente de carbono externa (comúnmente melaza), mientras los compuestos nitrogenados (amonio, nitritos y nitratos), el alimento no consumido y las heces de los peces son aprovechadas por una variedad de microorganismos (principalmente bacterias heterotróficas) quienes favorecen el crecimiento microbiano para formar los flóculos bacterianos conocidos como Biofloc. En los últimos 20 años se ha demostrado que la tecnología Biofloc es rentable y respetuosa con el medio ambiente, pues reduce los costos de alimentación debido a que el Biofloc sirve como alimento vivo para los peces (Minaz & Kubilay, 2021).

Otra ventaja del Biofloc: ayuda a que los peces no enfermen y las mortalidades disminuyan, esto en virtud de la existencia de una comunidad microbiana heterótrofa. Sin embargo, se requiere un consumo de oxígeno mayor en el agua para las bacterias y los peces, por lo cual la aireación debes ser constante. Actualmente han aparecido otras variantes de esta tecnología como el *flocponics*, el cual incorpora plantas en el cultivo para el mejor aprovechamiento de los nutrientes del medio (Ariza & Rodríguez, 2019; Pinho *et al.*, 2022).

Por otro lado, surgió una nueva variante de la tecnología Biofloc para su uso en los cultivos de camarón. Se trata de un concepto innovador llamado acumimética (*aquamimicry* en inglés), el cual favorece el crecimiento de los copépodos. Esta técnica fue creada en 2013 por dos antiguos criadores de camarones de Tailandia, Sutee Prasertmark y Veerasan Prayotamornkul. Este método trata de imitar el alimento de los camarones en el medio acuático natural, para ello simula las condiciones

naturales mediante alimento con zooplancton y el uso de bacterias beneficiosas para mejorar la calidad del agua. Para que la acumimética sea exitosa es necesario usar fuentes de carbono fermentado de salvado de arroz, soja y harinas de trigo combinadas con la aplicación de probióticos que mejoran pronunciadamente la floración de zooplancton. Además, es preciso promover la calidad del agua y facilitar el reciclaje de metabolitos nitrogenados en el sistema mediante la creación de una relación simbiótica entre derivados de fuentes de carbono fermentadas (por ejemplo, oli-gosacáridos) y probióticos (por ejemplo, especies de *Bacillus*). Lo anterior reduce la aplicación de terapéuticos y contribuye a la acuicultura verde (Khanjani et al., 2022).

Sistema acuapónico

Los sistemas acuapónicos consisten en integrar prácticas acuícolas con diversas formas de cultivo como, por ejemplo, la hidroponía (cultivo sin suelo) para de esta forma compartir recursos tales como el agua y los nutrientes (Figura 1d). Fue Naegel (1977) el primero en describir un sistema de recirculación en producción combinada de peces y plantas, lo cual dio la base para los sistemas acuapónicos modernos. Más adelante, en los años noventa, Masser, Timmons, Hargreaves, Losordo y Rakocy fueron los pioneros en ocupar, modificar, medir y estandarizar los sistemas acuapónicos acoplados o de un ciclo para producción de vegetales con peces (Rakocy et al., 2016).

A partir de entonces, se generaron un sin número de adecuaciones y modificaciones en la producción; además, se probaron más de 150 tipos de cultivos entre los que se encuentran plantas pertenecientes a la horticultura, plantas medicinales, condimentos y árboles frutales con poco requerimiento nutricional. Respecto a la ingeniería de los sistemas, se han hecho adaptaciones para casi todos los modelos hidropónicos conocidos, tales como: Cultivo en capa nutriente (NFT), Cama flotante (DWF), Cultivo con medio inerte, Flujo y reflujos, Riego por goteo, Torres y paredes verticales, Aeroponía e incluso, como se mencionó anteriormente, se han hecho adaptaciones para

cultivos con Biofloc (Figura 1c) (Flores-Aguilar et al., 2020).

Las tres partes principales de un sistema acuapónico son: el cultivo acuícola, el cultivo vegetal y los microorganismos que se encuentran de forma natural en el agua. Estos últimos, anteriormente menospreciados, hoy en día se sabe que son la clave del buen funcionamiento, rendimiento, crecimiento, desarrollo y calidad del alimento que se integre en un sistema acuapónico. Estos microorganismos consumen los compuestos en las aguas residuales acuícolas, es decir, los desechos metabólicos de los peces por respiración (orina, heces y alimentos no consumidos) y los transforman en las formas químicas más asimilables para las plantas (Delaide et al., 2019). Recientes estudios han reportado que estas aguas residuales generan un estrés benigno en las plantas, de tal manera que aumentan su contenido de antioxidantes, vitaminas y minerales (Delaide et al., 2019).

En contraste, se ha observado a lo largo de más de cuatro décadas que la recirculación del agua de manera continua entre los peces y las plantas genera un equilibrio en el pH. Este proceso es desfavorable para el rendimiento pues no permite que cada componente del sistema acuapónico (peces, plantas y microorganismos) tenga su pH apropiado. Las plantas requieren de un pH de entre 5.5 y 6.0; los peces necesitan un pH de entre 7.0 y 8.0; finalmente, los microorganismos requieren un pH de entre 7.0 y 9.0. Como consecuencia, en 2015 se hizo una modificación a los sistemas acuapónicos en donde el agua que regaba a las plantas no regresaba finalmente al estanque (Goddek et al., 2019). A estos sistemas se les nombró Acuapónicos desacoplados (por sus siglas en inglés AQD). Así, cada ciclo del agua en cada unidad de producción mantiene las condiciones óptimas respectivas. De esta manera es posible aprovechar mejor los nutrientes y el agua, lo cual aumenta el rendimiento y hace a estos sistemas más sostenibles y con cero recambios (Goddek et al., 2019).

En los sistemas acuapónicos modificados es posible cultivar plantas con mayores requerimientos

nutricionales, pues es posible añadir más nutrientes a la parte vegetal sin causar algún daño a los peces, lo cual abre una ventana de posibilidades para cultivar nuevas especies (Rodgers et al., 2022). Pese a estos datos favorables, los AQD tienen como desventaja el costo de inversión y el monitoreo necesario para las unidades de plantas y peces. Por esta razón no se recomiendan su uso en escalas pequeñas. Hoy en día estos sistemas sólo se utilizan a escala semi-comercial y comercial (Goddek et al., 2019).

A continuación, en la Tabla 1 se muestran las ventajas y desventajas de cada sistema presentado.

Sistema de producción	Ventajas	Desventajas	Referencia
Tradicional	Diferentes organismos a cultivar	huella hídrica energética y terrestre son similares a la carne de res	(Guzmán-Luna et al., 2021)
SAR	-Mayor control sobre la producción -Flexibilidad en tipo de cultivo -Se pueden tener cultivos superintensivos	-Adopción lenta de la tecnología por la sociedad. -Requiere equipos sofisticados. -Son costosos (equipo y energía). -Son complejos.	(Ahmed & Turchini, 2021)
Biofloc	-No hay intercambio de agua -Los floculos sirven como alimento vivo disminuyendo los costos de alimentación -menor mortalidad debido a que el sistema inmune de los peces mejora	- Necesita una fuente de aireación constante - mayor formación de lodos	(Ariza y rodríguez, 2019)
Acuaponía	-Se diversifica la producción obteniendo proteína vegetal y animal -Trazabilidad en la producción y a modo orgánico -Menos contaminación por gases tipo invernadero -Mejor uso de los recursos norenovables (agua y nutrientes)	-Conocimiento de cultivo mínimo requerido -Cálculo de cantidades de peces y de plantas (regla general 1:2 respectivamente) -Requiere infraestructura inicial lo cual representa costos de inversión	(Goddek et al., 2019; Flores-Aguilar et al., 2020; Rodgers et al., 2022)

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas acuícolas. Fuente: Elaboración propia.

Sostenibilidad para la acuicultura

La Economía circular (EC) es un modelo económico actual y global para el manejo de los bienes y servicios. Comenzó con Stahel y Reday (1967) para establecer el enfoque que debía tomar la industria y la producción en el planeta. Se conceptualizó con Pearce y Turner (1989), quienes explicaron que el ciclo de los materiales (dentro de la economía global) debía seguir el principio de “todo es entrada de otro todo” y, de esta manera, señalaron que las salidas y desechos de un proceso podían ser de nuevo incluidos, ya fuera en el mismo proceso o dentro de otros alternativos, esto con el fin de evitar desechos innecesarios (Figura 2).

El principio de la EC, aplicado a los sistemas de producción de alimentos, busca la conservación de la biodiversidad y el aprovechamiento máximo de los recursos finitos (agua y nutrientes) que circulan dentro de los sistemas de producción. Esto genera una expansión para obtener subproductos de calidad, buscar la concreción del ideal de “cero-desperdicios” y, como resultado añadido, fomentar la seguridad alimentaria y nutricional (Serraj et al., 2018).



Figura 2. Esquema general de la Economía Circular Fuente: Elaboración propia.

Existen tres principios que resumen como debe ser la sostenibilidad en el sector acuícola y piscícola en conjunto con la aplicación de la EC: 1) “Preservar y mejorar el capital natural, minimizando la extracción de recursos y priorizando los renovables”. 2) “Optimizar los rendimientos de los recursos, empleando tecnologías eficientes y promoviendo los flujos circulares de productos y materiales para que sean empleados en su estado de máxima utilidad (mayor valor)”. 3) Minimizar los efectos negativos de la producción de residuos, minimizando su producción y facilitando la conversión de residuos en recursos” (Rodríguez, 2019).

En este sentido, las tecnologías que se describen en este trabajo se han documentado por proveer casi en su totalidad estos tres principios. Existen muchas asociaciones gubernamentales y privadas que promueven y fomentan la investigación, aplicación y transferencias de estas tecnologías para transformar las técnicas piscícolas hacia una Acuicultura Climáticamente Inteligente, esto con el fin de lograr una productividad sostenible en este sector, mientras al mismo tiempo se garantiza la seguridad alimentaria, nutrición y crecimiento económico. Asimismo, se promueve la producción y consumo responsables, lo cual contribuye al desarrollo sostenible local que se encuentra en la Agenda 2030 con sus 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (Figura 2). Los recursos que usamos pertenecen al mismo planeta en que vivimos todos, colaborar localmente marca la diferencia de manera global (FAO, 2022; Randers et al., 2019; Sachs et al., 2021).

Referencias

- Ahmad, A., Sheikh Abdullah, S. R., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Ismail, N. 'Izzati. (2021). Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. *Journal of Environmental Management*, 287(January), 112271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112271>
- Ahmed, N., & Turchini, G. M. (2021). Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126604>
- Ariza, F. G., & Rodríguez, E. M. (2019). Tecnología Biofloc (BFT), una alternativa sostenible para el desarrollo de la acuicultura: revisión. *Ingeniería y Región*, 21, pp. 2-11.
- Avnimelech, Y. (1999). Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 176(3-4), pp. 227-235. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00085-X)
- Badiola, M., Basurko, O. C., Piedrahita, R., Hundley, P., & Mendiola, D. (2018). Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. *Aquacultural Engineering*, 81, pp. 57-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.03.003>
- Delaide, B., Teerlinck, S., Decombel, A., & Bleyaert, P. (2019). Effect of wastewater from a pikeperch (*Sander lucioperca* L.) recirculated aquaculture system on hydroponic tomato production and quality. *Agricultural Water Management*, 226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105814>
- FAO. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. FAO. DOI: <https://doi.org/10.4060/CC0461EN>
- Flores-Aguilar, P. S., García-Trejo, J. F., & Martínez-Guido, S. I. (2020). Aquaponic: a Versatile and Integrated alternative in Food Production for the Mexican environment. *Ciencia Autónoma University of Queretaro (UAQ)*, 13, 43-53. Goddek, S., Joyce, A., Wuertz, S., Körner, O., Bläser, I., Reuter, M., & Keesman, K. J. (2019). Decoupled Aquaponics Systems. *Aquaponics Food Production Systems*, pp. 201-229. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8
- Guzmán-Luna, P., Gerbens-Leenes, P. W., & Vaca-Jiménez, S. D. (2021). The water, energy, and land footprint of tilapia aquaculture in Mexico, a comparison of the footprints of fish and meat. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105224. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105224>
- Khanjani, M. H., Mozanzadeh, M. T., & Fóes, G. K. (2022). Aquamimicry system: a suitable strategy for shrimp aquaculture—a review. *Annals of Animal Science*, 22(4), pp. 1201-1210. DOI: <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0044>
- Minaz, M., & Kubilay, A. (2021). Operating parameters affecting biofloc technology: carbon source, carbon/nitrogen ratio, feeding regime, stocking density, salinity, aeration, and microbial community manipulation. *Aquaculture International*, 29(3), pp. 1121-1140. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00681-x>

- Pinho, S. M., de Lima, J. P., David, L. H., Emerenciano, M. G., Goddek, S., Verdegem, M. C., ... & Portella, M. C. (2022). FLOCponics: The integration of biofloc technology with plant production. *Reviews in Aquaculture*, 14(2), pp. 647-675. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12617>
- Rakocy, J., Masser, M., & Losordo, T. (2016). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture*. DOI: <http://osufacts.okstate.edu>
- Randers, J., Rockström, J., Stoknes, P.-E., Goluke, U., Collste, D., Cornell, S. E., & Donges, J. (2019). Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries. *Global Sustainability*, 2. DOI: <https://doi.org/10.1017/SUS.2019.22>
- Robles-Porchas, G. R., Gollas-Galván, T., Martínez-Porchas, M., Martínez-Cordova, L. R., Miranda-Baeza, A., & Vargas-Albores, F. (2020). The nitrification process for nitrogen removal in biofloc system aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 12(4), pp. 2228–2249. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12431>
- Rodgers, D., Won, E., Timmons, M. B., & Mattson, N. (2022). Complementary Nutrients in Decoupled Aquaponics Enhance Basil Performance. *Horticulturae* 2022, 8(2), p. 111. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8020111>
- Rodríguez, M. (2019). *Implicaciones de la Economía Circular para el sector acuícola*. Recuperado de: <http://webs.uvigo.es/miguel.r/>
- Sachs, J., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Lafortune, G., & Fuller, G. (2021). Sustainable Development Report 2020. In *Sustainable Development Report 2020*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108992411>
- Serraj, R., Krishnan, L., & Pingali, P. (2018). *Agriculture and Food Systems to 2050: A Synthesis* (pp. 3–45). DOI: https://doi.org/10.1142/9789813278356_0001
- Tom, A. P., Jayakumar, J. S., Biju, M., Somarajan, J., & Ibrahim, M. A. (2021). Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review. *Energy Nexus*, 4(July), 100022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100022>