

Sistemas de Recirculación Intensivos y con bajo Recambio: Factores Limitantes y Opciones de Solución

Intensive Recirculating Aquaculture Systems with low Water Exchange: Limiting Factors and Options for their Solution

Sánchez Ortiz, I.A.¹

Resumen

El objetivo de este trabajo consistió en revisar información relacionada con aspectos que limitan la producción de especies hidrobiológicas de manera intensiva en sistemas de recirculación con bajo recambio y algunas alternativas de solución a tales factores limitantes. El principal factor limitante dentro de los sistemas de recirculación con ese tipo de características es la acumulación progresiva del nitrato, producto final de la nitrificación. En condiciones de alta restricción en términos de disponibilidad de agua se presenta como solución la implementación de procesos de desnitrificación con o sin la adición de fuentes exógenas de carbono para garantizar la presencia de un donante de electrones que ayude a garantizar en las condiciones apropiadas de temperatura, pH, oxígeno disuelto, la transformación del nitrato en nitrógeno gaseoso. Las dos opciones fundamentales para abordar el proceso consisten en una predesnitrificación donde se incorpora afluente bruto con alto contenido de DBO, SSV y bajo nivel de oxígeno; o por medio de una desnitrificación terciaria con la adición controlada de la fuente de carbono orgánico. Se describieron los fundamentos de los procesos y se citó opciones técnicamente viables.

Palabras clave: Acuicultura, bajo recambio, sistemas de recirculación, desnitrificación.

Key words: Aquaculture, low exchange, recirculating systems, denitrification.

Objetivos

El objetivo fundamental del presente trabajo fue realizar una revisión de información relacionada con aspectos que limitan la producción de especies hidrobiológicas de manera intensiva en sistemas de recirculación con bajo recambio, así como algunas alternativas de solución a tales factores limitantes.

Introducción

Definición de acuicultura. Según la FAO [1], la acuicultura es la cría de organismos acuáticos, entre los que se encuentran peces, moluscos, crustáceos y plantas. La cría

¹ Ingeniero Civil, Especialista en Docencia Universitaria, Especialista en Alta Gerencia, Máster Science en Ingeniería Civil: Recursos Hídricos y tecnologías Ambientales. Profesor Asistente Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Facultad de Ciencias Pecuarias, Universidad de Nariño. iaso@udenar.edu.co

supone la intervención humana para incrementar la producción; por ejemplo: concentrar poblaciones de peces, alimentarlos o protegerlos de los depredadores.

Clasificación de la Acuicultura. Según el INPA [2], la acuicultura se puede clasificar de acuerdo al tipo de producción, grado de manejo y tecnología aplicada en:

- *Acuicultura extensiva.* Es la que se realiza con fines de repoblación y/o aprovechamiento de un cuerpo de agua determinado. Por lo general se efectúa en embalses y reservorios, bien sea naturales o artificiales, dejando que los peces subsistan de la oferta de alimento natural que allí se produzca. En este sistema no se proporciona ninguna clase de alimento suplementario y el aprovechamiento se efectúa a partir del momento en que se detectan animales de talla comercial. Las densidades a las cuales se siembran los organismos son bajas (1 pez por cada 5-10 m²) y la intervención del hombre se limita simplemente a la siembra y al aprovechamiento de estos organismos.
- *Acuicultura semiintensiva.* Se practica en forma similar a la extensiva, pero en este caso ya existen por lo general estanques o reservorios construidos por el hombre y las técnicas de manejo se limitan simplemente a la siembra de los peces, abonamiento y preparación del estanque en forma incipiente y esporádica. En ocasiones, si se suministra algún tipo de alimento, estará compuesto principalmente por desechos domésticos y residuos agrícolas. Cuando se suministra alimento concentrado, es de bajo contenido de proteína. Se emplean densidades de 2 a 4 peces/m² y se efectúa poco control sobre el cultivo; además existe una mayor producción debido al suministro de alimento y abonamiento.
- *Acuicultura intensiva.* Se efectúa básicamente con fines comerciales y para esto se necesitan estanques técnicamente construidos con entrada y salida de agua. Las cosechas y las siembras se llevan a cabo periódicamente, obedeciendo a una programación de la producción. En este tipo de piscicultura se realiza un control permanente de la calidad del agua y se practican abonamientos frecuentes con estiércol de animales o fertilizantes químicos. Se suministra alimento concentrado con niveles mayores de proteína en forma permanente y se programa la densidad de siembra, la cual varía de acuerdo a la especie y el grado de explotación. Se aplica una mayor tecnología cuya base está dada por los recambios continuos de agua y/o aireación.
- *Acuicultura superintensiva.* Se viene practicando en los últimos años como producto de los avances tecnológicos desarrollados y consiste en aprovechar el máximo la capacidad del agua y los estanques. La programación y la atención sobre cultivo es total, utilizando recambios de aguas continuos y aireación artificial. Con el fin de obtener altas producciones. En este sistema pierde importancia la productividad natural y en consecuencia se utilizan alimentos concentrados con un alto contenido de proteína (28–45%). El control permanente de los parámetros fisicoquímicos del agua es fundamental para la obtención de las producciones esperadas, ya se trabaja con elevadas densidades de siembra y por lo tanto se deben controlar parámetros vitales como el oxígeno disuelto, pH, amoníaco y nitritos entre otros.

Tipos de sistemas de cultivo. De acuerdo con Wheaton [3], las tres categorías básicas de sistemas de cultivo en la acuicultura son: sistemas abiertos, semicerrados y cerrados. Los sistemas abiertos hacen referencia al cultivo de especies hidrobiológicas por ejemplo mediante jaulas flotantes en cuerpos de agua naturales como océanos, lagunas, estuarios, lagos y ríos; sistemas semicerrados son aquellos en los cuales existe un único paso del agua en el sistema y posteriormente su efluente es descartado, como por ejemplo los cultivos mediante *raceways*; en los sistemas cerrados el agua es reacondicionada y recirculada hacia las unidades de cultivo.

Pros y contras de la acuicultura. Según Focardi et al [4], ya que la acuicultura se encuentra encaminada a la producción de animales acuáticos en cautiverio se constituye en una opción para reducir la presión que la pesca ejerce sobre las poblaciones naturales de pescado; sin embargo, existen críticas enfocadas a la escasa sostenibilidad de esta actividad y a los impactos ambientales que suelen acarrear algunos de sus procesos productivos como las formuladas por Pauly et al [5] por la alta tasa de consumo de recursos naturales de la acuicultura moderna y por la tendencia, por parte de las producciones intensivas, a generar focos de contaminación y brotes de enfermedades. De igual manera, Naylor et al [6] han destacado que ciertos tipos de acuicultura como el cultivo de peces carnívoros, requieren de la captura de grandes cantidades de peces salvajes para su alimentación, expresándose de esta manera como una actividad que en vez de disminuir incrementa la presión sobre especies naturales.

Acuicultura intensiva. Pese a las críticas formuladas a la producción acuícola, ésta presenta tendencias a su intensificación; de acuerdo con Avnimelech [7], existen razones desde el punto de vista ambiental y económico para ello, entre las que se encuentran:

- La regulación ambiental prohibiendo o limitando la disposición final de las aguas residuales.
- Preocupaciones de bioseguridad que restringen la captación y uso de cierto tipo de aguas.
- La escasez o el costo elevado del agua.
- La demanda por el control de la calidad y transparencia del agua, difícil de lograr en sistemas extensivos.
- El uso del alimento podría ser mayor en los sistemas convencionales.
- En casos donde la producción se encuentra cerca del mercado objetivo, la limitación de espacio puede ser un factor importante.
- La intensificación habilita el fácil control de la temperatura.
- La intensificación y automatización pueden disminuir la cantidad de mano de obra.

Sistemas de recirculación. Uno de los mecanismos para intensificar la producción son los sistemas de recirculación para acuicultura (**SRA**), que son un conjunto integrado de dispositivos que permiten el reciclaje del agua, propiciando una utilización más eficiente e independiente de las condiciones climáticas y una reducción del volumen de efluentes en sistemas de producción acuícola.

De acuerdo con Timmons et al [8], un sistema de recirculación para acuicultura SRA es la tecnología que permite el cultivo de peces a mayor intensidad en un ambiente totalmente controlado. Los peces se crían en tanques en las condiciones más seguras posibles, pudiendo protegerse dentro de una construcción cerrada para controlar el ambiente aéreo. El agua circula a través del sistema y solamente un pequeño porcentaje de agua es remplazado diariamente.

Tratamiento de las aguas residuales. Para el apropiado funcionamiento de un SRA, éste debe disponer de un sistema de tratamiento de las aguas residuales para su posterior reutilización. Según Metcalf y Eddy [9], por su origen las aguas residuales presentan en su composición diferentes elementos que se pueden resumir como: Componentes suspendidos, gruesos (inorgánicos y orgánicos), y finos (inorgánicos y orgánicos); Componentes disueltos, Inorgánicos, y Orgánicos

Tipos de tratamientos de las aguas residuales. Los métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos se conocen como operaciones unitarias, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza con base en procesos químicos o biológicos se conocen como procesos unitarios. Al referirse a operaciones y procesos unitarios es porque se agrupan entre sí para constituir los tratamientos primario, secundario y terciario de los cuales a continuación se presenta algunas características básicas.

Tratamientos preliminares. Aunque no reflejan un proceso en sí, sirven para aumentar la efectividad de los tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Para esto son utilizados los tamices, las rejillas, los microfiltros, entre otros.

Tratamientos primarios. El principal objetivo es el de remover aquellos contaminantes que pueden sedimentar, como por ejemplo los sólidos sedimentables y algunos suspendidos o aquellos que pueden flotar como las grasas. Entre las opciones de este tipo de tratamientos se encuentra la sedimentación primaria o ciertos tipos de tratamientos de tipo físico-químico.

Tratamientos secundarios. El objetivo de este tratamiento es remover materia orgánica principalmente expresada como la demanda biológica de oxígeno (DBO) soluble que escapa a un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos sedimentables. El tratamiento secundario intenta reproducir los fenómenos naturales de estabilización de la materia orgánica, que ocurre en el cuerpo receptor. La ventaja es que en ese proceso el fenómeno se realiza con más velocidad para facilitar la descomposición de los contaminantes orgánicos en períodos cortos de tiempo. Para llevar a efecto este proceso se usan mecanismos tales como: los lodos activados, los biodiscos, los filtros biológicos de flujo ascendente o descendente, o el lagunaje.

Tratamiento terciario. Tiene el objetivo de remover contaminantes específicos, usualmente tóxicos o compuestos no biodegradables o aún la remoción complementaria de contaminantes o nutrientes no suficientemente removidos en el tratamiento secundario.

Tratamiento de aguas residuales en sistemas de recirculación. En los SRA es importante la captura y evacuación de los sólidos desde las propias unidades de cultivo, así como la presencia de un sistema de remoción de sólidos por medios físicos

gravitacionales o de filtración mecánica; sin embargo, el elemento de mayor relevancia para mantener la calidad del agua en un sistema de recirculación es el denominado biofiltro, ya que es ésta unidad de tratamiento la encargada de realizar la oxidación progresiva del amoníaco en nitritos y nitratos por medio del proceso de nitrificación.

Acumulación de residuos amoniacales. Este es uno, y tal vez el más importante de los factores limitantes para el funcionamiento de sistemas de recirculación para producción intensiva con bajos recambios, ya que los peces excretan varios productos nitrogenados residuales por difusión e intercambio iónico a través de las branquias, orina y heces, los cuales son altamente solubles en agua. La transformación -vía biofiltración- de estos compuestos nitrogenados es especialmente relevante en SRA debido a la toxicidad del amoníaco-NH₃, nitrito-NO₂ y en algún grado el nitrato-NO₃ [10]. A continuación, la Figura 1 presenta los tipos de biofiltro con biopelícula adherida a un medio fijo más comúnmente utilizados en acuicultura para desarrollo de las comunidades biológicas que realizan la nitrificación.

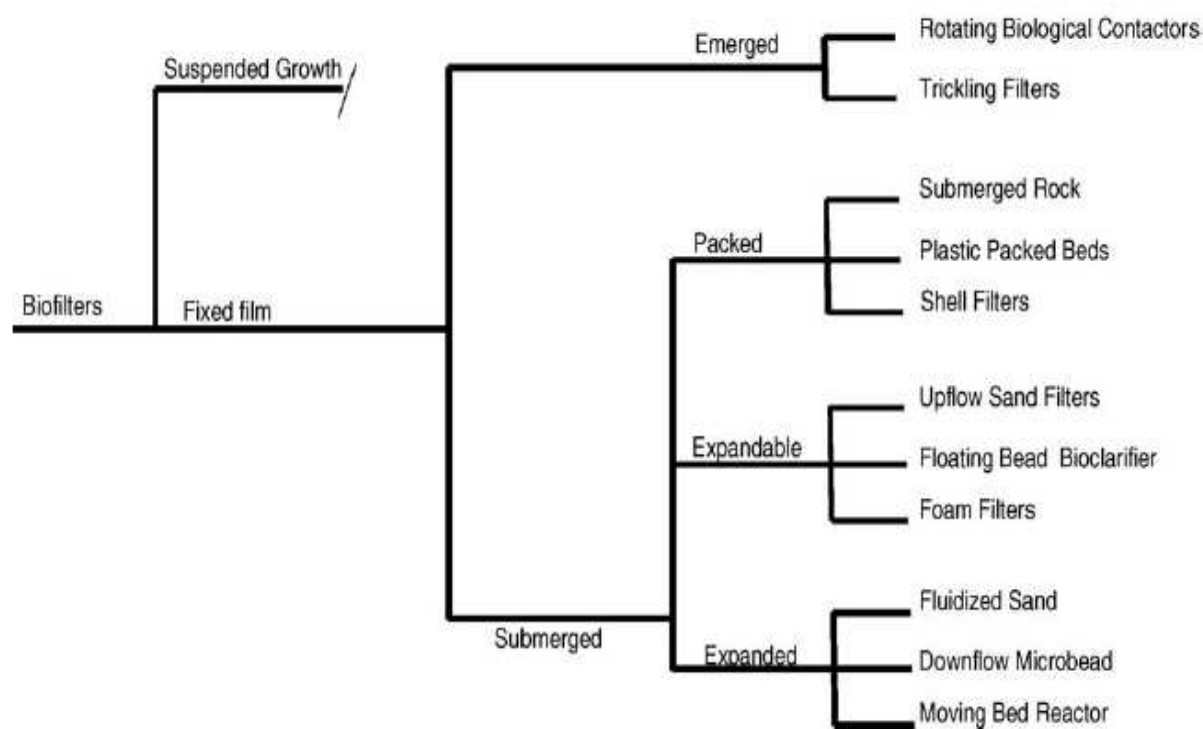


Figura 1. Tipos básicos de biofiltros más comúnmente utilizados en sistemas de recirculación (Adaptado de Malone y Pfeiffer, [11]).

Como puede apreciarse en la anterior figura, existen dos tipos básicos de biofiltros con biopelícula fija a un medio soporte: aquellos que trabajan totalmente sumergidos, dentro de los cuales se encuentran las opciones del lecho totalmente estático, de lecho

expansible, y de trabajo en condiciones de lecho expandido; y los biofiltros con lechos no sumergidos, a través de los cuales percola el líquido a tratar.

Entre los tipos de biofiltros presentados en el anterior esquema cabe resaltar los siguientes:

Biofiltro de biopelícula fija con flujo descendente. Consisten en un depósito empacado con un relleno de soporte en material granular natural o artificial, o diversidad de configuraciones de materiales plásticos o cerámicos. El afluente se distribuye generalmente por aspersión en la parte superior del biofiltro, permitiendo de esta manera percolar por gravedad formando la biopelícula sobre el material de soporte donde crecerán las bacterias. Por tratarse de un sistema no sumergido se propicia también el intercambio de gases con el aire.

Biofiltro de medio soporte inundado. Este tipo de biofiltros poseen un medio soporte estático y se diseñan para que el líquido a tratar fluyan en sentido descendente o ascendente. Como alternativa para propiciar intercambio gaseoso pueden ser aireado, lo que ayuda también a regular el posible taponamiento por causa del excesivo crecimiento de biopelícula.

Biofiltros de lecho expandido o fluidizado. El medio soporte utilizado en este tipo de biofiltros consiste en objetos boyantes debido a su baja densidad o partículas granulares que son sometidas a expansión por el ingreso del flujo ascendente del líquido a tratar. Debido al crecimiento progresivo de la biopelícula, la densidad aparente de los medios soporte se altera (disminuyendo al crecer la biopelícula) provocando expansiones diferenciadas a lo largo de casi toda la columna del biofiltro. Debido a la acción dinámica y choque del medio y las paredes del biofiltro se produce desprendimiento de la biopelícula, regulando de esta manera su posición en la columna del líquido.

Nitrificación. Los biofiltros nitrificantes propician condiciones favorables para el establecimiento de bacterias nitrificantes, de los géneros de bacterias más importantes en este tipo de procesos se puede mencionar a las Nitrosomonas, que oxidan NH_3 a NO_2^- , y las Nitrobacter, que oxidan el NO_2^- en NO_3^- . A través de los procesos oxidativos, las Nitrosomonas y las Nitrobacter, obtienen la energía para crecer en lugar de obtenerlo por oxidación de carbono orgánico, como lo hacen las bacterias heterotróficas.

Según Timmons et al [12], un aumento del pH o la temperatura aumenta la proporción de la forma no ionizada del nitrógeno amoniacal total (NAT). Para exposiciones de largo plazo, las concentraciones permisibles de NH_3 dependen de la especie de la temperatura de cultivo, pero como regla general este debe mantenerse bajo 0.05mg/L. El nitrito es un producto intermedio en el proceso de nitrificación del amoníaco a nitrato; sin embargo, la falta de oxidación biológica del nitrito resultará en concentraciones elevadas en el sistema pudiendo alcanzar niveles tóxicos para los peces. Su concentración es un indicador de la eficiencia de funcionamiento del biofiltro.

Aunque el nitrato -producto final de la nitrificación- es la presentación menos tóxica del nitrógeno, algunas investigaciones han reportado efectos nocivos en ciertas especies producidas por altas concentraciones de este compuesto, esta situación es especialmente importante en el caso de organismos marinos debido a su acción inhibitoria de la osmoregulación de estos organismos [13]. Con base en lo anterior, es práctica común el control de los niveles de nitratos en SRA por medio del recambio diario de un cierto porcentaje del agua del sistema, del orden del 5 al 10% [14]. Con base en lo anterior, y considerando que si el abastecimiento de agua y su reposición son de por sí un factor limitante del sistema productivo, existirán casos en los que haya restricciones para tal reposición, por tal motivo cobra importancia la remoción de la cantidades cada vez mayores de nitritos a partir de un proceso de reducción anaeróbica de nitrato a nitrógeno molecular gaseoso denominado desnitrificación, el cual regularmente es considerado como costoso en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Desnitrificación. La desnitrificación biológica consiste en una reducción microbiana de dos etapas de nitratos a nitritos y finalmente a gas nitrógeno por medio de bacterias heterotróficas facultativas y algunos hongos. Durante el proceso de desnitrificación el nitrito y el nitrato reemplazan al oxígeno para la respiración microbiana. La desnitrificación se produce fundamentalmente en condiciones de baja concentración de oxígeno disuelto, altas concentraciones de nitratos. El proceso requiere la disponibilidad de una fuente de carbón orgánico que se utiliza como un donante de electrones mientras que el nitrato actúa como receptor de electrones así como rangos de valores de pH entre 7,0 y 8,5 y un rango de temperatura entre 25 y 32°C. Los electrones liberados por la oxidación del carbón orgánico son transferidos al átomo de nitrógeno desde la molécula de nitrato a través de una serie de pasos hasta que se produce el nitrógeno gaseoso inerte según se indica en las ecuaciones 1 a 3.

Nitrato (NO_3^-) \rightarrow Nitrito (NO_2^-) \rightarrow Óxido Nítrico (NO) \rightarrow Óxido Nitroso (N_2) \rightarrow Gas Nitrógeno (N_2)



En el tratamiento de aguas residuales, algunas fuentes de carbón soluble (típicamente metanol, etanol, o ácido ascético) han sido utilizadas como donadores de electrones para desnitrificación. Sin embargo, se requiere de sistemas de control computarizados costosos y altamente sofisticados para regular la dosificación de carbón para prevenir su sobredosificación. Un exceso de carbón en ausencia de nitrato y bajo condiciones anaeróbicas puede reducir el potencial redox promoviendo la reducción de sulfatos y la producción de sulfitos tóxicos.

Muchos de los procesos de tratamiento empleados en acuicultura son adaptaciones de procesos unitarios usados en el tratamiento de aguas residuales industriales o domésticas que en los últimos han sido modificados y adaptados para lograr los altos estándares de calidad de agua requeridos en acuicultura, menor concentración de amoníaco y DBO y lograr que sean al menor costo efectivo posible. Tales procesos incluyen por ejemplo el uso de tanques sedimentadores, filtros de micromallas para captura de sólidos; filtros percoladores, biofiltros por cilindros rotatorios y biofiltros de lecho fluidizado para nitrificación. Por tal motivo es pertinente examinar las tecnologías de desnitrificación empleadas bajo el estado del arte actual de las estaciones de tratamiento de aguas residuales. Debido a los recientes requerimientos de remoción de nitrógeno en las aguas de descarte de las plantas de tratamiento de aguas residuales, diversas opciones han sido desarrolladas durante los últimos 10 años, tradicionalmente basados en la desnitrificación a partir de procesos de lodos en suspensión y más recientemente con bioreactores de película fija.

Los procesos de desnitrificación anteriormente citados han sido incluidos dentro del tren de tratamiento, tanto como un tratamiento de pre-desnitrificación antes de la(s) unidad(es) de remoción de amonio y DBO; o como un proceso de post-desnitrificación al final del tren, antes de la descarga final en el ambiente receptor. En la industria de tratamiento de aguas residuales, tales opciones son conocidas como desnitrificación terciaria versus una desnitrificación de único lodo. La distinción entre las dos tecnologías se basa en la adición o no de un donante de electrones como el metanol. La desnitrificación terciaria requiere de la adición de un donador de electrones exógeno, mientras que el sistema de desnitrificación por único lodo utiliza la DBO del agua residual afluente bruta como fuente orgánica donante de electrones.

Desnitrificación terciaria o Post-desnitrificación. Esta se emplea cuando el agua residual a tratar contiene nitratos y nitritos, pero escasos o nulos donantes de electrones; por ejemplo baja concentración de DBO, bajo contenido de sólidos suspendidos volátiles, baja materia orgánica disuelta. En acuicultura este caso se presenta cuando se trata el agua residual capturada lateralmente a partir de un sistema de drenaje doble (Figura 2) o el retorno de agua efluente de un sistema de tratamiento conformado por ejemplo por un sistema de captura de sólidos – biofiltración – aireación. El término de desnitrificación terciaria resulta de la utilización del efluente de un proceso de tratamiento biológico aerobio (tratamiento secundario), en el que se hace necesario involucrar un donante de electrones para garantizar la desnitrificación. Tradicionalmente se ha utilizado el metanol debido a su economía y disponibilidad comercial, pese a que no sea la mejor fuente de electrones.



Figura 2. Tanque de cultivo con doble drenaje

La Figura 3 muestra la manera en que una planta de tratamiento de aguas residuales tradicional puede tratar las altas concentraciones de SSV, DBO y NAT afluente con una remoción inicial de los sólidos (tratamiento primario), seguido de un reactor aeróbico para remoción de DBO, oxigenación y nitrificación del amonio para nitrato (tratamiento secundario), y finalmente seguido por un reactor anóxico para desnitrificar el nitrato a gas nitrógeno. Básicamente el mismo proceso de tratamiento se emplea en los SRA comerciales, con excepción del nivel de SSV, DBO y NAT en el afluente y los significativamente inferiores niveles de descarga.

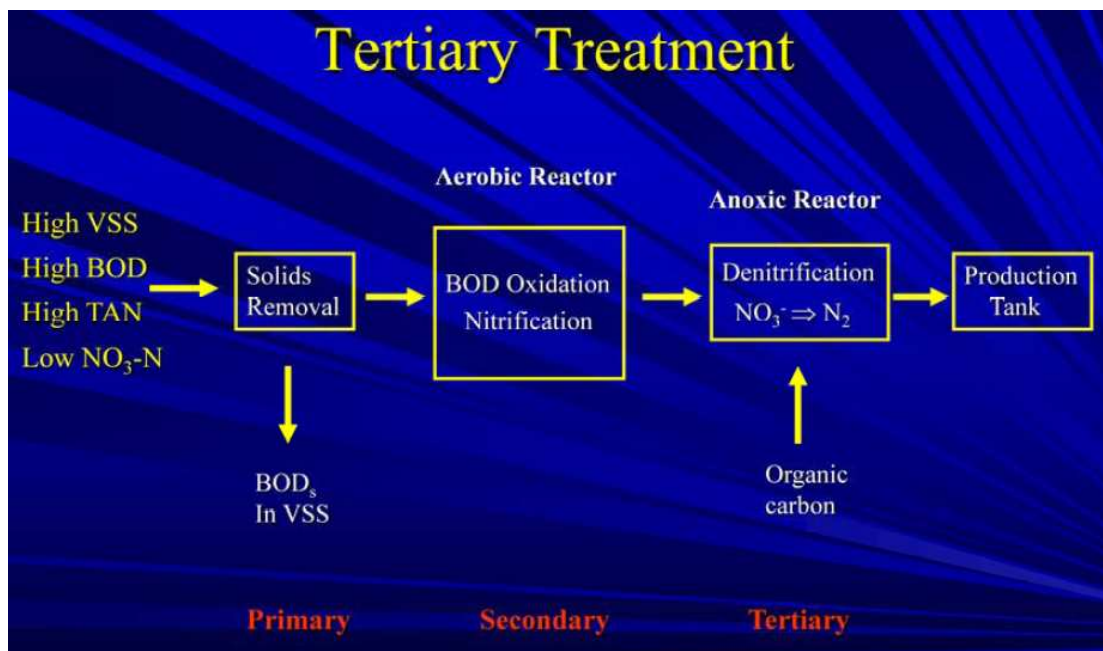


Figura 3. Esquema de flujo de la desnitrificación terciaria o post-desnitrificación.

En la aplicación de los procesos de post-desnitrificación en acuicultura, los procesos fundamentados en biopelícula son uno de los procesos preferidos y de más fácil aplicación.

Existen algunos procesos de biopelícula fija que han sido utilizados en el tratamiento de aguas residuales y que incluyen los contactores biológicos rotativos (CBR), los biofiltros de lecho fluidizado, biofiltros sumergidos y diversos tipos de filtros de arena. Una de las ventajas primarias de este tipo de filtros es la alta tasa de desnitrificación en relación al volumen de filtro requerido. Por ejemplo, la tasa volumétrica de desnitrificación para filtros sumergidos es del orden de $2 \text{ kg NO}_3^- \text{N/m}^3 \cdot \text{día}$, oscilando entre 1 y $7 \text{ kg NO}_3^- \text{N/m}^3 \cdot \text{día}$. Los biofiltros de lecho fluidizado reportan una tasa volumétrica de desnitrificación del orden de $4 \text{ kg NO}_3^- \text{N/m}^3 \cdot \text{d}$, oscilando entre 3 y $7 \text{ kg NO}_3^- \text{N/m}^3 \cdot \text{d}$. En comparación, un sistema de lodos en suspensión posee una tasa volumétrica de desnitrificación del orden de $0,2 \text{ kg NO}_3^- \text{N/m}^3 \cdot \text{d}$ cuando se utiliza metanol como fuente de carbón.

Pre-Desnitrificación. La pre-desnitrificación incluye el uso de DBO en el afluente bruto del agua residual como la fuente exógena donadora de electrones para producir la desnitrificación, por tanto no requiere la adición de químicos. Las dos estrategias básicas usualmente utilizadas consisten en un tanque aeróbico inicial de lodos activados seguido de un reactor de desnitrificación anóxica, o un reactor inicial de desnitrificación anóxica seguido de un reactor aerobio para nitrificación y oxidación de la DBO. En un sistema acuícola, ello podría aplicarse a una fuente de agua residual proveniente de los dispositivos de captura de sólidos para remoción de nitrato antes de su descarga final. También podría ser utilizado en un sistema con alta concentración de SSV como los sistemas de flocs heterotróficos para camarón o tilapia.

La Figura 4 muestra que la biomasa almacenada y perdida emplean un bioreactor aerobio, usualmente un tanque de lodos activados, en el cual el amonio es nitrificado a nitrato y la DBO es parcialmente oxidada y almacenada como biomasa o arrastrada al reactor anóxico. En el reactor anóxico tal biomasa sufre respiración endógena y libera los electrones requeridos por el proceso de desnitrificación con una cantidad adicional de amonio. Pese a que este proceso aparenta funcionar bien en el papel, en la práctica no es utilizado como único proceso, debido principalmente a la lenta cinética de la respiración endógena, la alta concentración de los sólidos suspendidos volátiles requiere de un largo tiempo de retención hidráulica en el tanque anóxico, lo que se traduce en grandes reactores y por ende, altos costos de capital.

La Figura 4 representa el esquema de proceso de la predesnitrificación o desnitrificación preanóxica, donde la DBO presente en el afluente se utiliza directamente como fuente donadora de electrones. El primer tanque -de características anóxicas- recibe el nitrato, tanto del afluente bruto como del agua reciclada desde el segundo reactor aerobio. En el reactor aerobio, el afluente con alta concentración de amonio es nitrificado a nitrato y parte de la DBO no utilizada en el tanque anóxico es consumida de manera aerobia. El nitrato producido en el tanque aerobio se retorna al reactor anóxico mediante un alto flujo de reciclaje, usualmente 400% del caudal afluente o superior. Entre las ventajas de este sistema está el uso directo de la DBO

afluente para el proceso de desnitrificación, la cinética de crecimiento más acelerada tanto de la biomasa almacenada como de la removida y la no liberación de amonio.

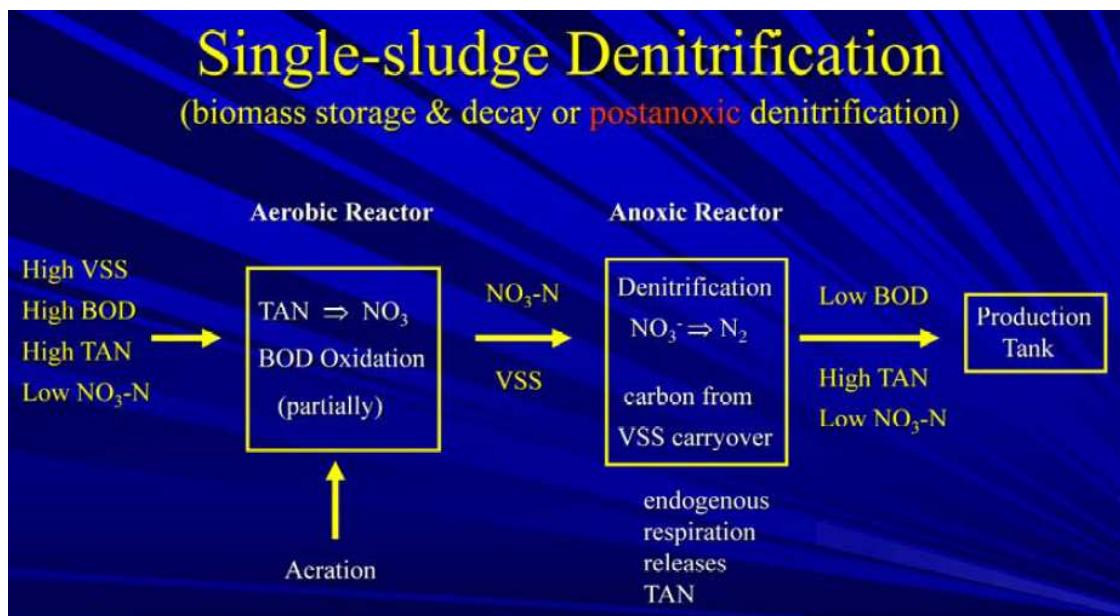


Figura 4. Esquema de flujo de pre-desnitrificación.

Reactores de lecho móvil. Los reactores de lecho móvil o (moving bed bioreactor: MBBR) se desarrollaron en Noruega a principios de los años 80's como una manera de propiciar procesos de pre-desnitrificación o post-desnitrificación de manera efectiva y con costos moderados en estaciones de tratamiento de aguas residuales existentes. Una ventaja significativa de los MBBR corresponde a su relativo pequeño tamaño y bajas exigencias en cuanto a mantenimiento en comparación a los requisitos operacionales y de mantenimiento asociados a los biofiltros percoladores y los sistemas de lodos activados. La tecnología MBBR ha sido implementada de manera amplia en Europa y recientemente se ha incorporado en instalaciones comerciales acuícola de pequeña y gran escala con fines de nitrificación.

Los MBBR son un sistema de tratamiento con biopelícula adherida a un medio soporte, de operación continua, que no es susceptible a colmataciones o taponamientos, con baja pérdida de carga, alta superficie específica y sin requerimientos de retrolavado. La biomasa bacteriana crece en el medio soporte y se mueve libremente en el volumen líquido del reactor. El reactor puede ser operado bajo condiciones aerobias de nitrificación o condiciones anaerobias de desnitrificación. Para nitrificación, el medio soporte se mantiene en constante circulación debido a la inyección de aire que crea condiciones aerobias; para desnitrificación el medio se somete a circulación por medio de un mezclador de eje horizontal sumergido para crear condiciones anóxicas o anaerobias. El medio soporte usualmente ocupa menos del 67% del volumen del reactor (normalmente 50%), en el que para porcentajes mayores se reducirá la eficiencia del sistema. El medio es mantenido al interior del reactor por medio de una

malla localizada a la salida del efluente. El medio soporte más comúnmente usado es "Kaldnes K1", elaborado en polietileno de alta densidad (0.95 gr/cm^3), con forma de pequeño cilindro y una cruz en su interior y con pequeñas "aletas" en su superficie externa [15]. Otros medios soporte han sido utilizados y cuya característica común es la de mantener un área protegida o reservada para el desarrollo de la biopelícula.

La tecnología MBBR ha sido utilizada de manera creciente en sistemas de tratamiento de aguas residuales y posee un marcado potencial en sistemas acuícolas debido a su implementación como reactores nitrificantes. Esta tecnología puede usarse para remoción de nitrógeno por medio de pre-desnitrificación o post-desnitrificación o una combinación de los dos procesos. Las limitaciones de los procesos de pre-desnitrificación es la alta tasa de reciclaje de agua enriquecida con oxígeno disuelto y el potencial efecto limitante debido a la insuficiente disponibilidad de carbón en el afluente bruto. En la post-desnitrificación es factible obtener altas tasas de desnitrificación por medio de la adición de fuentes de carbón de fácil degradación. Pese a presentar tasas de desempeño menores que otros tipos de biofiltros tradicionalmente utilizados como los de lecho fluidizado o los biofiltros sumergidos, los procesos MBBR proporcionan una operación más fácil y operación más flexible que tales procesos. Al ser comparado con los reactores de lodos activados los MBBR no requieren de recirculación de los lodos. Adicionalmente, es digno de resaltar que se puede asumir casi cualquier configuración geométrica en este tipo de reactores y que pueden funcionar a diferentes cargas para un mismo volumen de reactor por medio del cambio en la fracción de llenado del medio soporte [16].

Referencias

1. Food and Agriculture Organization. Acuicultura: principales conceptos y definiciones. Acceso: 27 de mayo de 2011. URL: <http://www.fao.org/spanish/newsroom/focus/2003/aquaculture-defs.htm>
2. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura - INPA. "Fundamentos de acuicultura continental". Colombia. 1993. 286 p.
3. F.W. Weathon. "Acuicultura, diseño y construcción de sistemas". México: A. G. T., 1993. 704 p.
4. S. Focardi, I. Corsi, E. Franchi. "Safety issues and sustainable development of European aquaculture: new tools for environmentally sound aquaculture". Aquaculture International. Vol. 13, 2005, Numbers 1-2, pp. 3-17.
5. D. Pauly, V. Christensen, S. Guénette, T.J. Pitcher, U.R. Sumaila, C.J. Walters, R. Watson, D. Zeller. "Towards sustainability in world fisheries". Nature. Vol. 418. 2002. N. 8. pp. 689-695.
6. R.L. Naylor, R.J. Goldberg, J.H. Primavera, N. Kautsky, M.C.M. Beveridge, J. Clay, C. Folke, J. Lubchenco, H. Mooney, M. Troell. "Effect of aquaculture on world fish supplies". Nature, New York. Vol.405. 2000. N. 6790. pp.1017-1024.
7. Y. Avnimelech. "Bio-filters: the need for a new comprehensive approach". Aquacultural Engineering. Vol.34. 2006. N.3. pp.172-178.
8. M.B. Timmons, J.M. Ebeling, F.W. Wheaton, S.T. Summerfelt, B.J. Vinci. "Sistemas de recirculación para la acuicultura". Fundación Chile. 2002. 747 p.

9. Metcalf y Eddy. "Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización". 3 Ed. Mc Graw Hill. 1996. Vol.1. 752 p.
10. F.W. Weathon. "Acuicultura, diseño y construcción de sistemas". México: A. G. T., 1993. 704 p.
11. R.F. Malone, T.J. Pfeiffer. "Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems". Aquacultural Engineering. Vol. 34. 2006. N.3. pp. 389-402.
12. M.B. Timmons, J.M. Ebeling, F.W. Wheaton, S.T. Summerfelt, B.J. Vinci. "Sistemas de recirculación para la acuicultura". Fundación Chile. 2002. 747 p.
13. R.C. Russo, R.V. Thurston, "Aquaculture and water quality". Editado por D.E. Brune y J.R. Tomasso. World Aquaculture Society. 1991. Pp. 58-89.
14. M.P. Masser, J. Rakocy, T.M. Losordo. "Recirculating aquaculture tank production systems - Management of Recirculating Systems". Southern Regional Aquaculture Center. SRAC Publication No. 452. 1999. 12p.
15. H. Ødegaard, B. Rusten, F. Wessman. "State of the art in Europe of the moving bed biofilm reactor (MBBR) process". Proceedings of the annual meeting of WEFTEC. 2004.
16. H. Ødegaard, "Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process". Wat. Science Technol. 2006. N. 53. pp.17-33.