*Manual de*

# Acuicultura sostenible

Project N°: COLL-CT-2006-030384

Sixth Framework Programme

SUSTAIN AQUA

Propuesta integrada para una acuicultura continental sostenible y saludable

# Índice

Índice ..... 1
1. Introducción a SustainAqua ..... 4
2. Sostenibilidad en acuicultura ..... 6
3. Tecnología y producción de los principales tipos de acuicultura continental en Europa ..... 12
3.1. Estanques de tierra ..... 12
3.2. Sistemas de circuito abierto con flujo constante ..... 13
3.3. Sistemas de recirculación en circuito cerrado ..... 13
3.4. Crianza en jaulas ..... 14
4. Marco normativo y de gobernanza en la acuicultura continental europea ..... 15
4.1. Política Pesquera Común (PCC) y documentos relacionados ..... 16
4.2. Políticas ambientales con gran impacto en el desarrollo de la acuicultura ..... 20
5. Calidad y diversificación- Oportunidades de Mercado para los productos y subproductos de la acuicultura ..... 23
5.1. Calidad del producto- El caso Polonia ..... 23
5.2. Cultivos de humedales para la industria bioenergética- El caso Hungría ..... 24
5.3. Plantas acuáticas y frutas tropicales para la industria cosmética – El caso Suiza ..... 26
6. Tratamiento de las aguas residuales de sistemas intensivos de acuicultura mediante humedales y estanques extensivos – Estudio de caso en Hungría ..... 28
6.1. Humedales artificiales como método sostenible para el tratamiento de efluentes acuícolas y la producción de cultivos con valor (Granja de bagre africano) ..... 28
6.2. Del estudio de caso a la explotación: ¿Cómo tratar los efluentes de una granja intensiva de bagres? 33
6.3. Combinación de la acuicultura intensiva y extensiva para el uso sostenible del agua y los nutrientes (módulo intensivo-extensivo) ..... 37
6.4. Del estudio de caso a la explotación: Diseño de un sistema combinado teórico ..... 42
7. Mejora de la productividad natural en estanques extensivos – Estudio de caso en Polonia ..... 45
7.1. Nuevas especies y métodos de producción de peces en estanques: Módulo Policrianza ..... 45
7.2. Conclusiones y recomendaciones prácticas para la producción de espátula en estanques de policrianza ..... 51
7.3. Uso de residuos agrícolas como nutrientes para la crianza de peces en estanques: Módulo Cascada 54
7.4. Del estudio de caso a la explotación: Diseño de un módulo de producción en cascada ..... 60
8. Nuevos métodos de crianza de truchas para reducir los efluentes en las piscifactorías- Estudio de caso en Dinamarca ..... 63
8.1. Introducción – Descripción general del estudio de caso ..... 63
8.2. Piensos y alimentación – Impacto ambiental en las piscifactorías modelo de trucha ..... 65
8.3. Consumo de energía en las granjas de trucha modelo ..... 67
8.4. Cultivo de plantas acuáticas en las lagunas de las granjas modelo ..... 70
8.5. Crianza de otras especies de peces en las lagunas de las granjas modelo ..... 72
8.6. Resumen- Factores de éxito y limitaciones ..... 73
8.7. Del estudio de caso a la explotación: Como gestionar una granja modelo que produce 500 t truchas por año (Ejstrupholm) ..... 73
9. Crianza de tilapia en sistemas acuícolas de recirculación (SAR) - Estudio de caso en Holanda ..... 76
9.1. Módulo Reactor desnitrificador de lecho de lodos de flujo ascendente (USB-MDR) ..... 76
9.2. Del estudio de caso a la explotación: Integración de un USB-MDR en un SAR para 100 Tm de tilapia 80
9.3. Módulo – Reactor de perifiton (PTS) ..... 100
9.4. Del estudio de caso a la explotación: Cómo gestionar un modelo de estanque de peces para producir 5Tm por año con el módulo PTS ..... 102

10. Producción tropical basada en el concepto de sistema integrado "Tropenhaus" - Estudio de caso en Suiza ..... 104
10.1. Introducción - Concepto general de “Tropenhaus” en Suiza ..... 104
10.2. Integración de crustáceos en la producción de tilapia y alimentación de los peces con plantas tropicales 105
10.3. Filtros acuapónicos de agua cálida en el sistema integrado "tropical" ..... 107
10.4. Del estudio de caso a la explotación: El diseño del filtro acuapónico de agua cálida en el sistema "Tropenhaus Wolhusen" ..... 110
Referencias y lecturas recomendadas ..... 115
Informaciones sobre el proyecto SustainAqua ..... 115
Sostenibilidad en acuicultura ..... 115
Tecnología de producción de los principales tipos de acuicultura en Europa ..... 116
Humedales y sistemas intensivos-extensivos integrados ..... 117
Policrianza y sistemas en cascada ..... 118
Recirculación en piscifactorías de trucha ..... 118
Sistemas de recirculación en piscifactorías de tilapia ..... 119
Tecnología PTS en estanques ..... 119
Hidroponía y proyecto Tropenhaus ..... 120
Autores del Manual ..... 121

C/ General Moscardó
nº 3-5-F 28020 Madrid
Tel:91.553.06.16/64
Fax: 91.553.06.64
info@piscicultores.net
www.aquapiscis.org

## Prefacio

La acuicultura se está desarrollando rápidamente en todo el mundo debido a la acción combinada de un fuerte aumento de la demanda de los productos pesqueros y el agotamiento de las poblaciones de peces en los océanos. Para evitar los mismos errores de los sectores agrícola y pesquero, los acuicultores europeos necesitan encaminarse hacia los principios de la sostenibilidad, atribuyendo la misma importancia al medio ambiente, a la viabilidad económica y a la aceptabilidad social en su desarrollo actual y futuro.

En última instancia, cada acuicultor, independientemente del sistema de crianza (estanques o recirculación) se enfrenta a los mismos problemas. ¿Cómo utilizar de forma más eficiente los nutrientes para ahorrar costes de alimentación, lograr una mayor producción y reducir los vertidos en el efluente? ¿Cómo mejorar el tratamiento de las aguas residuales y disminuir su descarga para reducir los costes de canon de vertido a pagar a las administraciones? ¿Cómo cumplir con todos los requisitos legales y las limitaciones, demostrando a los consumidores que sus productos son de la más alta calidad, respetuosos con el medio ambiente y generar suficientes ingresos para ganarse la vida garantizando los puestos de trabajo de sus empleados?

El proyecto de la UE SustainAqua pretende responder a varias de estas cuestiones. Su objetivo global es hacer la acuicultura continental más sostenible mejorando los métodos de producción, investigando el potencial de mercado y aumentando la calidad del producto. SustainAqua ha realizado cinco estudios de casos en Europa representando los tipos de acuicultura y especies más relevantes. Se han puesto a prueba varias técnicas prácticas que refuerzan las diversas explotaciones de forma sostenible (desde los sistemas de estanques extensivos y semi-intensivos que prevalecen en Europa Central y Oriental, hasta la acuicultura intensiva de sistemas de recirculación – SAR- que se practican en Europa noroccidental) y los principales resultados se describen en este manual SustainAqua.

Como punto de partida hablamos de "sostenibilidad" y lo que podría significar para la acuicultura. Se presentan los indicadores de sostenibilidad que se han desarrollado para evaluar los diferentes estudios de caso SustainAqua. Las distintas tecnologías en el sector - estanques piscícolas, sistemas abiertos y cerrados con recirculación - se presentan brevemente para mejorar la clasificación de los módulos. Además, es bien conocido que el trabajo de los acuicultores y el desarrollo futuro de sus explotaciones están muy influenciados por las distintas normativas europeas y nacionales que se aplican al sector. Por lo tanto, también se ofrece una introducción al marco regulador europeo. Un criterio muy importante para ganar cuotas en un mercado de creciente competencia es demostrar la excelencia de la calidad del producto y la innovadora utilización de los subproductos. Un capítulo en el manual presenta el impacto de los diferentes sistemas de crianza en la calidad de los productos y las aplicaciones en el mercado potencial para los subproductos de la acuicultura.

El núcleo de este manual consiste en la descripción de los diferentes módulos de investigación en los cinco estudios de caso SustainAqua. Las zonas de Europa central que tradicionalmente crían los peces en estanques están representadas por los estudios de caso húngaro y polaco. En Hungría, el tratamiento de las aguas de sistemas intensivos de circuito abierto se mejora mediante humedales construidos como biofiltro y además se presentan las ventajas de combinar la acuicultura intensiva y extensiva para el uso eficiente del agua y los nutrientes. El estudio de caso polaco integra la acuicultura con una moderna explotación agrícola en un sistema de estanques en "cascada" que emplea el estiércol animal para la producción de plancton como alimento para las carpas en régimen de policrianza. La disminución de la demanda de carpa en el Este de Europa se aborda mediante la introducción de espátula como una nueva especie en la policrianza tradicional para diversificar la producción, mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y aumentar la rentabilidad de las granjas. En Dinamarca y Holanda, se probaron las técnicas de los sistemas de recirculación para su aplicación en exteriores e interiores. Mientras que en Dinamarca, la trucha arco iris se está estudiando en las llamadas explotaciones modelo con el objetivo de optimizar la gestión y la alimentación para reducir el impacto medioambiental y los costes energéticos, el estudio de caso holandés trató sobre la producción intensiva de tilapia en sistemas de recirculación (SAR) mediante dos módulos (Reactor Desnitrificador de Lecho de Lodos y Reactor de Perifiton) para reducir el uso del agua, el consumo de energía y la emisión de nutrientes. Por su carácter único en Europa, el estudio de caso de Suiza completa este proyecto mediante un sistema asociado que combina la crianza de tilapia con la producción de frutas tropicales en un invernadero utilizando el calor residual generado en una planta de densificación de gas de forma gratuita, a fin de demostrar que los «residuos» se pueden utilizar como un recurso multifuncional para producir peces y subproductos de forma ecológicamente viable y económicamente rentable.

Para transferir los resultados científicos a los acuicultores, los subcapítulos “Del estudio de caso a la piscifactoría” presentan la información para aplicar los módulos, precedida por una descripción general, sus principios, la evaluación de los indicadores SustainAqua, sus factores de éxito y limitaciones, así como sus principales beneficios.

A la acuicultura de agua dulce en Europa le esperan tiempos difíciles y un futuro brillante, si seguimos combinando nuestras fuerzas (los investigadores desarrollando y la industria aplicando las técnicas) para lograr una acuicultura sostenible, para una comunidad europea sostenible.

**Dipl. Ing. Alexandra Oberdieck**
Bremerhaven, Germany, June 2009
Coordinator SustainAqua

**Prof. Dr. Johan Verreth**
Wageningen, Netherlands, June 2009
Scientific Manager SustainAqua

# 1. Introducción a SustainAqua

Los acuicultores continentales europeos luchan en una batalla con dos frentes. Por un lado, con la expansión de la globalización, cada vez están más obligados a competir con los productores de países con muy bajos costos de producción. Por otro, tienen que ajustarse a las estrictas exigencias de las legislaciones nacional y europea con respecto a la calidad del producto, el medio ambiente y la salud. Además, se enfrentan a restricciones legales sobre la gestión de residuos, la obtención del agua, la utilización de productos químicos y la modificación genética. El éxito del sector europeo de la acuicultura continental depende en gran medida de la capacidad de los acuicultores para hacer frente a estos desafíos.

## Concepto de SustainAqua

SustainAqua es un proyecto de investigación colectiva de tres años, co-financiado por la Unión Europea en el Sexto Programa Marco con el objetivo global de hacer la industria de la acuicultura continental más sostenible y, por tanto, ayudar a los acuicultores a ser más competitivos a nivel mundial. El objetivo general del proyecto es ampliar la base de conocimientos de la acuicultura continental mediante la formación de los acuicultores en:

- La mejora de los métodos productivos, la eficiencia de los procesos y la rentabilidad.
- Investigar el potencial de mercado de diferentes subproductos para industrias alternativas, tales como la energética y la industria cosmética.
- Aumentar la calidad del producto (sabor, valor nutritivo) como herramientas de marketing para impulsar la aceptación de los peces de agua dulce por los consumidores y por lo tanto, mejorar la imagen del sector.

El proyecto presenta una variedad de posibilidades tecnológicas e información sobre cómo actualizar los diferentes sistemas acuícolas convencionales. Es de esperar que estas nuevas tecnologías tengan menores costes de construcción, mantenimiento y funcionamiento que los sistemas convencionales, en particular en el caso del tratamiento de las aguas residuales.

## Estudios de caso – investigación aplicada

Con el fin de satisfacer los objetivos generales, el consorcio SustainAqua ha acompañado cinco estudios de caso en Hungría, Polonia, Holanda, Dinamarca y Suiza. Cada lugar representa uno de los tipos de acuicultura continental más importantes en Europa, incluyendo diferentes especies como trucha, carpa, tilapia y bagre (pez gato). Cada estudio de caso ha desarrollado e investigado las diferentes opciones para optimizar los procesos de producción, mejora de la calidad y diversificación de los productos. En detalle, el consorcio del proyecto ha investigado:

- Diferentes técnicas para la optimización de la gestión de nutrientes, agua y energía mediante:
  - La reducción de los costos energéticos aumentando la eficiencia energética,
  - La reducción de costos de tratamiento de aguas residuales disminuyendo el volumen y los niveles de descarga,
  - La reducción de los costes de alimentación de los peces incrementando la eficiencia en la utilización de nutrientes.
- La reducción de los costes laborales por producto;
- El valor nutricional y sabor de los peces producidos en diferentes sistemas
- Los componentes y el valor económico de diversos subproductos de la acuicultura continental.

El consorcio pretende transferir los principios de gestión altamente efectivos de los ambientes naturales a los competitivos sistemas acuícolas. Un ejemplo es la gestión eficiente de los nutrientes. En la acuicultura, la materia orgánica puede aprovecharse en la medida de lo posible para la producción de macroinvertebrados, algas o plantas comercializables y con diferentes aplicaciones industriales. Esto optimiza la cadena de nutrientes reduciendo los residuos, evita la aplicación de costosos tratamientos de aguas residuales (como las tecnologías de filtración) y reduce los costes. Estos principios fueron probados en diferentes sistemas (intensivos, semi-intensivos y extensivos). Además, como "salud" y "sabor" son importantes demandas de los consumidores, el consorcio ha demostrado con test sensoriales y analíticos si los procesos de optimización previstos pudieran tener alguna influencia en la calidad de los productos.

## Breve introducción a los cinco estudios de caso

El estudio de caso húngaro se ha centrado en la producción de dos especies de bagres en tanques y en jaulas ubicadas en estanques de tierra. El tratamiento de las aguas residuales se realizó en estanques de tierra conectados en serie con el objeto de producir diferentes especies de carpas y plantas de humedal

como cañaverales y mimbrerales. Estos “subproductos” mejoran la eficiencia y rentabilidad de los sistemas biológicos de tratamiento. Además, su potencial como un recurso renovable para la industria bioenergética está siendo investigado.

En Suiza, la tilapia está siendo criada en un sistema asociado al cultivo de frutas tropicales como plátano, mango y guayaba. El sistema "Tropenhaus Ruswil" tiene un invernadero de 1 500m² y utiliza el calor residual de una planta de densificación de gas natural como fuente de energía. El estudio de caso tiene como objetivo demostrar que los "residuos" se pueden utilizar como un recurso multifuncional en un sistema integrado para producir peces y subproductos de forma sostenible, ecológicamente limpia y económicamente rentable.

La crianza de la carpa se ha investigado en dos módulos del caso de estudio polaco. Uno de los objetivos era producir alimento para peces a partir de agua residual usando un sistema de estanques en “cascada” en el cual los residuos orgánicos se utilizaron para criar peces (sin ninguna fuente de alimentación externa ni plantas). Además, se han introducido nuevas especies en la configuración de la policrianza tradicional para aumentar la diversidad de la producción en el estanque y mejorar la rentabilidad de las granjas de carpa.

En Holanda, el estudio de caso se centró en la producción intensiva de tilapia en Sistemas Acuícolas de Recirculación (SAR) usando diferentes experimentos con un Reactor Desnitrificador de Lecho de Lodos (MDR) y un Reactor de Perifiton (PTS, biomasa de algas capaces de eliminar la contaminación del agua). El objetivo es reducir la cantidad de agua a menos de 25 litros/kg de pienso, al tiempo que se reduce el consumo de energía y los vertidos de partículas disueltas, nitrógeno, fósforo, dióxido de carbono y materia orgánica.

En Dinamarca, se está estudiando la trucha arco iris en ocho piscifactorías modelo, con el objetivo de optimizar la alimentación y la gestión de las explotaciones para reducir el impacto medioambiental y los costes energéticos. Las granjas modelo combinan las tecnologías de recirculación para la producción intensiva de peces con el tratamiento del efluente en humedales artificiales para incrementar sustancialmente la producción de pescado y reducir (incluso eliminar) el impacto ambiental.

## Importancia de la Sostenibilidad

La sostenibilidad de la acuicultura es crucial para el sector si la industria no va por el camino de la pesca. Alrededor del 75 % de las pesquerías marinas con mayor valor han sido capturadas hasta su límite e incluso están siendo sobreexplotadas. Al mismo tiempo, el consumo mundial de pescado ha aumentado de 45 millones de toneladas en 1973 a más de 130 millones en 2000, y la FAO estima que serán necesarios 40 millones de toneladas más en el año 2030 sólo para mantener los actuales niveles de consumo.

Con el fin de servir a esta creciente demanda a largo plazo, se han fortalecido las alternativas sostenibles. La más prometedora es el sector de la acuicultura. Su tasa de rápido crecimiento (8% al año desde los años 80) es la más alta en la industria agroalimentaria, representando actualmente casi la mitad del pescado que se consume a nivel mundial (frente al 9% en 1980).

## Transferencia de conocimiento

El proyecto SustainAqua, con sus diferentes módulos AQUA +, proporciona diferentes técnicas prácticas y una amplia información sobre cómo actualizar los diferentes sistemas acuícolas convencionales para mejorar el proceso de producción, rentabilidad, desempeño ambiental, calidad del producto, y para diversificar la gama de productos. Estas opciones ayudarán a los acuicultores a ajustarse de forma sostenible a los cambios actuales y futuros en las legislaciones nacional y europea satisfaciendo las normas de calidad y códigos de conducta (que también suponen un importante beneficio para los acuicultores en relación a sus estrategias publicitarias). La mayoría de los módulos AQUA + desempeñan más de una función simultáneamente, como por ejemplo, la mejora en la eficacia de la gestión de los nutrientes unida a la producción económica de subproductos valorables y el tratamiento de las aguas residuales. Con la diversificación productiva, los acuicultores serán más flexibles y menos susceptibles a las fluctuaciones del mercado.

Los conocimientos generados con los estudios de caso, serán promovidos a través de 22 seminarios presenciales de capacitación para la acuicultores (a celebrar entre mayo y julio de 2009) en Austria, Dinamarca, Alemania, Hungría, Polonia, Suecia, España y Turquía; y dos seminarios de aprendizaje electrónico vía internet (e-learning). Las actividades de información y formación incluyen el desarrollo de este manual, la Wiki-SustainAqua y una plataforma de aprendizaje interactivo, que, en conjunto, resumen los beneficios, riesgos y costos, criterios de éxito e información técnica sobre los diferentes módulos de investigación. Además habrá 8 puntos de contacto nacionales (coordinados por la asociación responsable) que servirán como plataformas individuales de asesoramiento para los acuicultores incluso después de finalizado el proyecto. Con la ayuda de estas herramientas, los acuicultores podrán reestructurar una parte o la totalidad de su producción para hacerla más sostenible, eficiente, y con beneficios económicos y ambientales a largo plazo. Toda la información necesaria se puede consultar en www.sustainaqua.org

# 2. Sostenibilidad en acuicultura

El término "sostenibilidad" o también "desarrollo sostenible", utilizado a menudo como una mera frase hecha, tiene mucho más que ofrecer. Es un concepto que garantiza un medio ambiente habitable para todo el mundo a largo plazo y que abarca al menos tres componentes fundamentales para su desarrollo: la preservación de un medio ambiente funcional, el bienestar económico y la equidad social. En consecuencia, también en el ámbito de la acuicultura, la sostenibilidad significa no sólo alcanzar los objetivos medioambientales, sino también ofrecer una clara ventaja económica para los acuicultores a largo plazo.

El término "sostenibilidad" se diluye, debilita y desgasta cuando es utilizado por políticos, empresarios y público en general que, en numerosas ocasiones, aportan un sentido falso o incorrectamente definido sólo para acentuar la conexión positiva de la palabra (como sucedió con "bio" o "eco" en la década de los 90).

El siguiente texto indica el contexto en el que fue desarrollado dentro del proyecto, ofreciendo una breve información sobre los antecedentes y la definición original del término "sostenibilidad", el tema de la "sostenibilidad en acuicultura" y su aplicación en SustainAqua.

### Introducción- Antecedentes de la “sostenibilidad”

El origen del concepto de "sostenibilidad" o "desarrollo sostenible" se encuentra en el informe “*Nuestro Futuro Común”*, más conocido como Informe Brundtland (1987). En él, se afirma de forma contundente que “*el desarrollo sostenible satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. En los sectores de la agricultura, silvicultura y pesca conserva los recursos terrestres, el agua, las plantas y animales, es ambientalmente no degradante (limpio), técnicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptable”* (Consejo de la FAO 1988).

El desarrollo sostenible se basa en consideraciones a largo plazo con un enfoque integrador, no sectorial. El término suele presentarse en tres dimensiones: ecológica, económica y social. Todas las dimensiones tienen la misma importancia, se influyen mutuamente y no se pueden separar. En principio, se consideró que este modelo de tres dimensiones con igual importancia mejoraba la situación en relación a los problemas ambientales. Sin embargo, cuando se reflexiona sobre la dependencia de cada una de las dimensiones sobre las otras, ha sido criticado por no mostrar adecuadamente que la sociedad y su economía fundamentalmente dependen de la naturaleza y sus recursos (ver Figura 1).

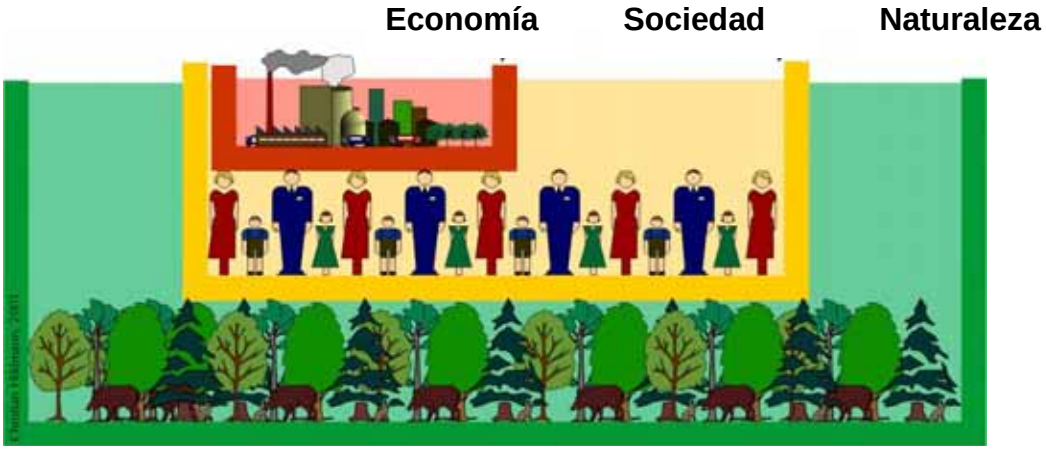



*Figura 1: Estructura jerárquica de la sostenibilidad. Fuente: Hildmann (2001)*

A principios del siglo XXI debe quedar claro que se necesita una mejor integración de estas tres dimensiones para alcanzar el desarrollo sostenible. El enfoque actual, fundamentalmente económico, suele descuidar los objetivos sociales y ambientales. Sin embargo, para equilibrar el concepto de sostenibilidad hay que prestar mayor atención a los temas ambientales y sociales compensando el exceso de peso de la economía (UICN 2006). En este proceso ha jugado un importante papel la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y el Desarrollo indicando que la protección del medio ambiente deberá constituir parte integrante del proceso general de desarrollo y no puede considerarse aisladamente de él (PNUMA 1992). Se ha reconocido que ninguna actividad industrial, agrícola o acuícola puede tener lugar si no es económicamente rentable. Sin embargo, es tarea de los políticos y de la sociedad encontrar formas para conciliar las tres dimensiones de la sostenibilidad. Una herramienta importante es investigar y aplicar tecnologías innovadoras u optimizadas. En el ámbito de la acuicultura continental, este es precisamente el objetivo de SustainAqua.

## Sostenibilidad en acuicultura

La acuicultura, como toda industria agroalimentaria, se enfrenta al reto del desarrollo sostenible. La acuicultura ha crecido de manera exponencial en los últimos 50 años, partiendo de una producción de menos de 1 millón de toneladas en 1950 a 51.7 millones de toneladas en 2006 (FAO 2008). Considerando que la producción pesquera de capturas se mantiene estática e incluso ha decrecido en los últimos años, la acuicultura continúa creciendo más rápidamente que cualquier otro sector productor de alimentos de origen animal y seguirá desempeñando un gran y creciente papel a nivel mundial en la producción de pescado para satisfacer la creciente demanda de productos pesqueros.

Por lo tanto, es esencial continuar buscando los medios para hacer las prácticas de producción acuícola más sostenibles, eficientes y rentables mejorando, por ejemplo, las capacidades humanas, el uso de los recursos y la gestión ambiental. En este particular contexto puede entenderse el proyecto SustainAqua. Para lograr una acuicultura más sostenible en Europa, en primer lugar ha investigado soluciones concretas, como herramientas técnicas (metodológicas); y en segundo lugar, ofrece diversas actividades de capacitación para informar a los acuicultores sobre los resultados.

Sin embargo, es esencial que las diversas iniciativas en el ámbito nacional, europeo y mundial también desarrollen y actualicen permanentemente los códigos de conducta, indicadores de sostenibilidad y sistemas de certificación. De este modo se podrá alcanzar un entendimiento común y aceptado entre todas las partes interesadas sobre la sostenibilidad acuícola y cómo lograrla en la práctica. Citando sólo algunos ejemplos:

- FAO: "Código de Conducta para la Pesca Responsable" (1995)
- FEAP: "Código de conducta para la acuicultura europea" (2000), actualmente en proceso de revisión
- EVAD: "Guía para la co-construcción de los indicadores de desarrollo sostenible en la acuicultura" (2008)
- Acuerdo de la Alianza Mundial de Acuicultura (GAA) y GLOBALGAP para la elaboración y armonización de los sistemas de certificación para el sector de la acuicultura en todo el mundo (2009)

Como ejemplo, el proyecto de la UE CONSENSO[1] ("Multi-stakeholder involvement towards protocols for sustainable aquaculture in Europe", 2005-2008) ha elaborado un conjunto de indicadores de sostenibilidad como una primera aproximación para un sistema de certificación de la acuicultura sostenible y para un proceso de evaluación comparativa que se basa en el bajo impacto ambiental, la alta competitividad y la responsabilidad ética en relación con la diversidad biológica y el bienestar de los animales. En él han participado todas las grandes organizaciones y asociaciones dentro de la producción acuícola.

SustainAqua ha "completado" CONSENSO investigando varias mejoras tecnológicas para que los diferentes sistemas acuícolas continentales europeos sean más sostenibles (véase el capítulo 1). Por lo tanto, la descripción de sostenibilidad que se presenta aquí, pretende dar una orientación clara sobre la investigación que se ha realizado dentro de SustainAqua con el fin de desarrollar métodos y tecnologías más sostenibles para la producción acuícola en Europa. De este modo, SustainAqua se anticipa a la futura legislación y etiquetado (que actualmente está todavía en discusión), y proporciona directrices y soluciones técnicas más sostenibles en las prácticas acuícolas.

## Límites del sistema

Para que la “acuicultura sostenible” sea manejable y factible, es importante definir los límites del sistema. Para SustainAqua, se han definido tres niveles diferentes, visualizados en círculos en la Figura 2:

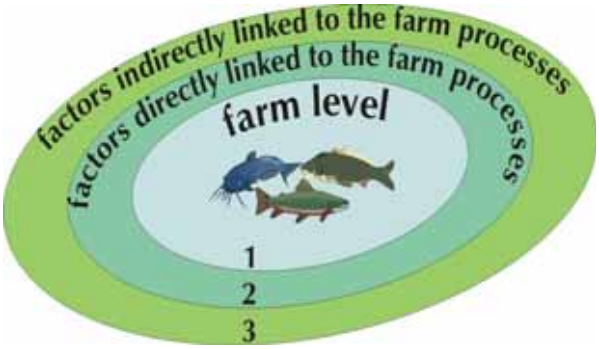



*Figura 2: Limites de los tres niveles del sistema para los cuales se define la sostenibilidad en SustainAqua.*

1. **"Primer nivel":** agrupa los factores de explotación que pueden verse influidos directamente por el acuicultor, como por ejemplo la calidad del agua, la gestión de los nutrientes y energía, la salud de los peces, etc.
2. **"Segundo nivel"**: incluye los factores directamente relacionados con el proceso de explotación en los cuales el acuicultor no tiene ninguna influencia directa, pero sobre los cuales podría tenerla potencialmente si quisiera o necesitara. Por ejemplo, la calidad de los piensos, su composición y procesado, el medio de transporte

[1] http://www.euraquaculture.info/

empleado, el tipo de energía utilizada (renovables o no renovables), la distancia a los mercados de sus productos (corta o larga), etc. El productor también puede transferir algunos factores del segundo nivel al primero, por ejemplo cuando elabora el alimento de sus peces en la propia explotación, utiliza la energía generada en la granja o vende sus productos directamente.

Los dos primeros círculos son los más importantes para el proyecto SustainAqua puesto que se centra en el proceso de producción a nivel de explotación. Los factores más importantes del segundo nivel también son considerados, como por ejemplo la producción de alimento y energía, los costes energéticos para el abastecimiento de agua con una cierta calidad y el transporte, así como los mercados potenciales.

3. **"Tercer Nivel":** determinado por los factores indirectamente relacionados con el proceso de explotación, pero que normalmente no puede ser influenciados por el acuicultor. Estos son, entre otros, el grado de sostenibilidad del embalaje (cadena de producción, materiales), combustible para el transporte de los peces, etc.
4. Para completar, debe tenerse en cuenta el **"nivel normativo"** que incluye las legislaciones regionales, nacionales y europeas, así como los reglamentos y normas que afectan a todos los niveles de diferentes maneras, pero que no pueden ser influenciados por el acuicultor. En SustainAqua sólo se han considerado los reglamentos directamente relacionados con el primer y segundo nivel (véase también el capítulo 4).

## Indicadores de sostenibilidad y certificación

La disponibilidad limitada de los recursos naturales y el aumento de los precios de la energía también señalan la necesidad de dirigir la acuicultura hacia formas más sostenibles. El sector de la acuicultura ya está trabajando en esta difícil tarea, pero aún queda un largo camino por recorrer. En comparación con otros sistemas de producción animal, la acuicultura está especialmente presionada para ser más sostenible debido al uso de importantes recursos naturales como el agua, los humedales, las zonas costeras y también la captura de peces para la producción de pienso o su almacenamiento en estanques (como alevines y con fines productivos).

La sostenibilidad de una actividad y su medición no es un tema estático (UICN 2008), ya que, por definición, incorpora aspectos económicos, ambientales y sociales (véase la Figura 3). Cada enfoque de la sostenibilidad incluye, además de hechos inalterables, los valores de la sociedad que pueden ser objeto de debate o de un cambio en el tiempo. Esto significa que en todos los casos no es posible decidir si un proceso es sostenible o no de forma inequívoca (no hay blanco y negro exclusivamente). Frecuentemente hay transiciones entre los procesos sostenibles y los que no lo son.

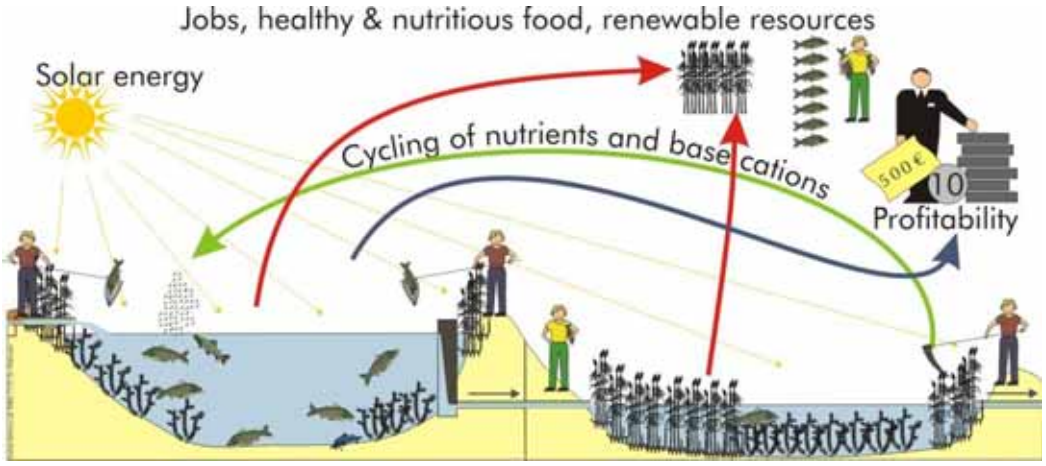



*Figura 3: La acuicultura continental sostenible combina aspectos ecológicos, económicos y sociales.*

Los diferentes códigos de conducta y sistemas de criterios antes mencionados tienen por objeto solucionar este problema con la intención de apoyar la acuicultura sostenible y sus productos. Pero hasta ahora no hay criterios, indicadores y sistemas de etiquetado completos y viables a nivel europeo capaces de certificar realmente la condición de “status de sostenibilidad” para los peces producidos en acuicultura. El proyecto SustainAqua intenta apoyar este desarrollo, que está actualmente en curso por diversas iniciativas (ver arriba). Como se mencionó antes, SustainAqua no tiene la intención de competir con los sistemas de indicadores que ya se habían desarrollado con un amplio enfoque orientado a las partes interesadas, por ejemplo por CONSENSO. La selección de los criterios que figuran a continuación se centran en los cinco estudios de caso de SustainAqua, ofreciendo una idea clara de cómo se podría aumentar la sostenibilidad

en las piscifactorías (a nivel de explotación). Se trata de dar una orientación sobre cómo medir la transferibilidad y viabilidad de la investigación realizada con el fin de desarrollar métodos y tecnologías aplicables a la producción sostenible en Europa. No se trata de juzgar si una granja acuícola continental es sostenible o no; más bien se ofrecen unas directrices inequívocas en relación a qué se puede hacer en un determinado caso para mejorar la sostenibilidad.

## Indicadores de sostenibilidad en SustainAqua

El consorcio SustainAqua ha desarrollado al comienzo del proyecto 28 indicadores, considerado las tres dimensiones del concepto (ambiental, económica y social). Sin embargo, como SustainAqua no puede cubrir todas las posibles áreas de investigación y mejora de la sostenibilidad en las granjas acuícolas, se seleccionaron finalmente 8 indicadores para su aplicación en los cinco estudios de caso, como se indica en la Tabla 1. Los criterios de selección fueron los siguientes:

- **Acción pertinente:** El indicador es sensible a los cambios de gestión de acuerdo con el objetivo y es útil para determinar en qué forma el actor trabaja para lograr el objetivo o no.
- **Plausible, convincente:** El indicador es comprensible para el actor.
- **Mensurable**: Los indicadores ofrecen una idea fiable de medida o grado
- **Factible**: Será posible registrar la medida del indicador con los recursos previstos (presupuesto y tiempo) en el proyecto.

| **Dimensión ambiental** | | | |
|---|---|---|---|
| | **Objetivo específico o criterio** | **Indicador** | **Unidad** |
| Energía | **Eficiencia energética:** Reducir la entrada de energía tanto como sea posible | Entrada de energía por salida de producto (peces, biomasa) | KWh/kWh salida (diferenciando para cada producto) |
| Agua | **Abastecimiento de agua:** Reducir la cantidad de agua dulce externa al sistema (Reutilizar el agua en la medida de lo posible) | Abastecimiento de agua por producto (peces, biomasa) | l/kg producto |
| | **Salida de agua:** Reducir el agua de vertido hasta casi cero (para ver los aspectos de calidad Nutrientes / salida) | Vertido por producto (peces, biomasa) (sin evapotranspiración y filtración - puede ser positivo o negativo-pero incluyendo las precipitaciones) | l/kg producto |
| Nutrientes | **Eficacia de utilización:** Utilizar la entrada de nutrientes con la mayor eficacia posible. Producir a partir de una cierta unidad de entrada de nutrientes mayor cantidad de productos comercializables con un alto nivel de calidad | Eficiencia en la retención de nutrientes (NRE) (retención de nutrientes en productos por Kg de entrada de nutrientes al sistema, en general peces, biomasa). | Kg nutrientes (N, P, COD) retenidos en producto/kg entrada de nutrientes (%). TOD calculado a partir de COD y N |
| | **Salida (véase también agua):**Reducir la cantidad de vertidos residuales (pérdidas de nutrientes, minerales y materia orgánica) a casi cero | Cantidad de nutrientes/ calidad del vertido | N,P,COD, conductividad eléctrica liberada por Kg producido |
| | **Re-utilización de nutrientes para productos de valor añadido:** Producir bienes de valor añadido dentro de la piscifactoría | Retención de nutrientes de re-utilización N/P para productos de valor añadido | Kg nutrientes retenidos en productos de valor añadido por Kg salida de nutrientes en el sistema en general (%) |
| **Dimensión económica** | | | |
| | Objetivo específico o criterio | **Indicador** | **Unidad** |
| Costes de producción | **Incremento de la productividad por unidad de trabajo** | Uso del tiempo de trabajo por cada producto producido en las explotaciones (modelo basado en hipótesis) | h / Kg de producto |
| Amortiguación de las fluctuaciones de mercado | **Mejorar la seguridad de los productos y la salud de los peces:** reducir los brotes de enfermedades | Número de tratamientos / ciclo de producción | Número de tratamientos / ciclo producción |

*Tabla 1: Indicadores de sostenibilidad para los 5 estudios de casos SustainAqua*

En los capítulos siguientes se alude con frecuencia a estos indicadores porque ellos constituyeron la base para la evaluación de la investigación en los cinco estudios de caso del proyecto SustainAqua y para la transferencia de los resultados a su aplicación práctica (ver folletos técnicos).

Los restantes 20 indicadores no han sido medidos ni evaluados en detalle, ya que su estimación no estaba al alcance de este proyecto. Entre ellos estaban indicadores tales como "Agua y clima: apoyo a la estabilización del clima local mediante el aumento de la evapotranspiración por humedales / aguas abiertas"

o todos los indicadores encontrados para la dimensión social: "Desarrollo de nuevos puestos de trabajo" o "Apoyo al desarrollo rural". Más detalles sobre este tema se pueden encontrar en la herramienta SustainAqua-Wiki (www.sustainaqua.org)

## Aplicación de los principios de Sostenibilidad a la acuicultura

En los siguientes sub-capítulos se presentan en detalle los principios de sostenibilidad en cada área. Además se incluyen algunas sugerencias generales sobre cómo hacer una acuicultura más sostenible de acuerdo a esos principios. Ejemplos prácticos de potenciales aplicaciones de estos principios pueden verse en los diferentes estudios de caso SustainAqua y en el capítulo 3.

*Mejorando la sostenibilidad ecológica*

Los temas más importantes relacionados con la sostenibilidad ecológica de las explotaciones acuícolas son el agua, los nutrientes, el área utilizada para la piscifactoría y la energía. En relación al agua, es importante considerar tanto la cantidad necesaria como su calidad. El agua se puede obtener a partir de fuentes superficiales, como lagos o ríos, o del subsuelo (acuíferos) utilizando pozos. Debe ser un objetivo importante en todos los sistemas acuícolas reducir la cantidad de agua necesaria para aliviar los ecosistemas naturales. Pero además es igualmente importante controlar la salida de nutrientes en los vertidos para evitar la eutrofización del medio, bien sea reduciendo los niveles de descarga u optimizando el tratamiento de los efluentes. La mejor práctica de gestión, naturalmente, depende del tipo de acuicultura. Por ejemplo, los estanques tradicionales de carpas solamente necesitan agua para reemplazar la consumida por evaporación y filtración, la salida se reduce al proceso de despesque. Los sistemas de recirculación (SAR) como las granjas modelo danesas, son otro ejemplo de cómo reducir la cantidad de agua necesaria drásticamente. En este caso se usan además estanques para la producción de plantas para retener los nutrientes en los vertidos (véase el capítulo Dinamarca).

El uso eficiente de los nutrientes necesarios también es esencial para la sostenibilidad ambiental. Una gestión ajustada del régimen de alimentación (dosis, horarios, etc.), unida a la adecuada selección de los piensos (elevada digestibilidad) es el primer paso para reducir las pérdidas de alimento. El uso adicional de los nutrientes es una tarea específica a desarrollar en cada local. El empleo de perifiton, como en el estudio de caso húngaro, es una posibilidad. La utilización de diferentes especies de peces en los estanques (policrianza) puede incrementar la eficiencia de utilización puesto que se optimiza la producción en los diferentes nichos, como ocurre en el estudio de caso polaco. Sin embargo, hay que considerar la no utilización de especies exóticas ausentes a nivel local. Otros ejemplos de cómo aumentar la utilización de nutrientes si se dispone de espacio suficiente son la producción de recursos renovables como cañaverales y mimbrerales (Hungría) o plantas de jardín (Dinamarca).

Considerar el origen de los piensos utilizados es una forma de contribuir a la sostenibilidad ecológica. Por ejemplo, es mejor emplear harinas de pescado procedentes de las capturas de pesquerías sostenibles (con certificado MSC)[2].

El área empleada para las granjas acuícolas es altamente dependiente del tipo de explotación y de las circunstancias locales. En general, la necesidad de producir alimentos y recursos renovables pone más presión sobre el uso de la tierra. La disminución de la superficie utilizada en algunos sistemas de recirculación puede ser una contribución. Por otro lado, el empleo de estanques de tierra y zonas de humedales también pueden contribuir a la estabilización del clima local por el aumento de la evapotranspiración y proporcionan zonas de extraordinario valor ecológico.

El tema energético es especialmente importante en sistemas de recirculación, como en el caso de los Países Bajos (véase el capítulo Holanda). También en otros sistemas de acuicultura, es importante y posible reducir la cantidad de energía incrementando la eficiencia energética, por ejemplo mejorando el funcionamiento de las bombas. El objetivo es producir al menos la misma cantidad de peces con menos energía o más peces con la misma cantidad de energía.

*Mejorando la sostenibilidad económica*

La acuicultura es económicamente sostenible y viable si la explotación es rentable, los ingresos son fiables y los productos son aceptados por los consumidores. En muchos casos, la mejora de la sostenibilidad ambiental puede ser vinculada a la optimización de la sostenibilidad económica. Por ejemplo, el uso eficiente de los piensos y nutrientes o la reducción en el empleo de agua no sólo son positivos para el ambiente, también reducen los costes. Dependiendo de las leyes nacionales, la reducción de los efluentes residuales también puede ser una contribución para reducir los costes de producción y lo mismo es aplicable a todos los procesos en función de la energía. El tipo de distribución (local o regional) afecta directamente a los costes de transporte y parcialmente a los costes energéticos. La diversificación de la producción puede amortiguar las fluctuaciones del mercado. La policrianza, la producción de recursos

[2] Marine Stewardship Council. http://www.msc.org/

renovables, plantas de jardín o alevines de peces son ejemplos aplicados en los estudios de caso de SustainAqua. La trazabilidad en productos de alta calidad puede aumentar el precio obtenido y la confianza de los consumidores. Por último, pero no menos importante, el apoyo pleno a la sostenibilidad, más que una odiosa tarea, puede ser un argumento valioso de marketing para aumentar la aceptación de los consumidores.

Sin embargo, todos estos aspectos deben ser evaluados individualmente porque la disponibilidad de los recursos necesarios para la explotación (agua, suelo, nutrientes, energía) cambia mucho entre los diferentes países y regiones de Europa. Por ejemplo, cerca de una gran ciudad los sistemas de recirculación de alta intensidad pueden ser muy sostenibles, especialmente si se aprovecha el calor residual, mientras que en áreas rurales, como en la mayor parte de Hungría, podría ser económicamente mucho más sostenible un sistema extensivo de estanques de tierra porque el agua y el terreno están disponibles a precios baratos.

*Mejorando la sostenibilidad social*

La cuestión de la sostenibilidad social es también muy compleja. Incluye las oportunidades de empleo en el sector, las condiciones de los trabajadores (higiene, seguridad, formación) y también el público en general en relación a temas como ocio (espacios recreacionales), salud y cuestiones nutricionales. Otros aspectos importantes a considerar son el atractivo de la actividad para las nuevas generaciones o incluso la contribución de los sistemas acuícolas a la preservación de la cultura y tradiciones populares, como por ejemplo la piscicultura en Europa Oriental. Estos temas no han sido objeto de SustainAqua (que se ha concentrado más en las soluciones técnicas orientadas a mejorar la sostenibilidad económica y ambiental) aunque afecten indirectamente a la sostenibilidad social (garantizando el empleo, asegurando un entorno natural para usos recreativos, contribuyendo a la alimentación saludable con productos de alta calidad, etc.).

# 3. Tecnología y producción de los principales tipos de acuicultura continental en Europa

Hay muchas posibilidades de agrupar y definir los diversos tipos de producción en la acuicultura continental. Aunque haya muchas coincidencias y transiciones entre los diferentes sistemas, desde el punto de vista de la sostenibilidad, los métodos de producción clasificados en relación a la gestión del agua pueden ser la base más razonable para una descripción. Se pueden distinguir los métodos siguientes:

- Estanques de tierra (sin flujo de agua)
- Sistemas en circuito abierto (de flujo constante)
- Sistemas de recirculación SAR (en circuito cerrado)
- Crianza en jaulas

## *3.1. Estanques de tierra*

Se considera que la producción de peces continentales en estanques de tierra es la técnica de producción piscícola más antigua de Europa y se remonta a la época medieval. Los estanques se construyen en zonas donde se dispone de abundante agua y tierra no apta para la agricultura. Los humedales de Europa Central y Oriental son buenos ejemplos de ello. La producción europea en este tipo de estanques es aproximadamente 475.000 toneladas. Alrededor de la mitad de esta producción corresponde a la familia de los ciprínidos (carpa común, carpa plateada y carpa cabezona). Los principales países productores son la Federación Rusa, Polonia, República Checa, Alemania, Ucrania y Hungría.

Los estanques de peces típicos son recintos de tierra en los cuales los peces viven en un entorno natural -como en su propio ambiente- alimentándose de presas vivas que crecen en el propio estanque gracias a la luz solar y a los nutrientes disponibles en el agua. Para obtener mayores rendimientos, actualmente se introducen al inicio del ciclo los alevines y el agua junto a nutrientes (abono orgánico) y otros alimentos (cereales). En la mayor parte de los países, éste sistema semiestático (no hay flujo constante de agua) produce peces en régimen extensivo o "semi-intensivo" (con alimentación suplementaria) y sin empleo de productos químicos o terapéuticos. En consecuencia, el principal problema medioambiental es el uso de abonos orgánicos, lo que puede causar la eutrofización en las aguas naturales circundantes. El uso de fertilizantes orgánicos está regulado a nivel nacional. Los estanques extensivos suelen ser bastante amplios y por lo general están rodeados de cañas y cinturones de vegetación proporcionando importantes hábitats para la fauna. Jugando un importante papel en el turismo rural, algunas explotaciones han sido transformadas para su uso multifuncional y proporcionan otro tipo de servicios como áreas para recreación, mantenimiento de la biodiversidad y mejora en la gestión del agua.

*Figura 4: Explotación de estanques de tierra en Hungría (HAKI).*

### 3.2. Sistemas de circuito abierto con flujo constante

En los sistemas acuícolas de circuito abierto, el flujo constante de agua pasa a través de las instalaciones una sola vez para suministrar oxígeno a los peces y es descargada al ambiente con partículas en suspensión y residuos. Cuando hay más de una explotación en el mismo curso del río, es interés común que la calidad del efluente sea buena ya que pasa a ser el influente de la siguiente. Por esta razón el agua se toma del río, se distribuye a través de la explotación y se trata el efluente antes de ser liberado al cauce. Todo el agua es renovada en la explotación al menos una vez al día.

Este sistema está muy difundido para la crianza de trucha. En Europa la trucha fresca se puede encontrar y comprar en todas partes. Se comercializan alrededor de 220 000 toneladas de trucha de ración por año, de las cuales el 85% son producidas en la UE. Los principales países productores son Italia y Francia, seguidos por Dinamarca, Alemania y España. El único productor fuera de la UE es Turquía. Después de muchos años de aumento lento y constante, la producción de trucha de ración disminuyó ligeramente (menos del 0,6% aproximadamente por año) en el período 2000-2005, aunque los precios siguen siendo buenos. La trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) domina la producción europea de trucha (aproximadamente el 95% de la producción total) debido a su crecimiento y rendimiento productivo.

La mayoría de los estados miembros de la UE tienen piscifactorías de trucha cerca de los cauces de los ríos y emplean estanques de hormigón o jaulas flotantes en lagos. Otros abastecimientos de agua son los manantiales (pozos perforados) que exigen estaciones de bombeo. En algunos países se emplean suministros de agua caliente para producir peces a través de sistemas de flujo abierto. Se aprovecha el agua calentada de instalaciones industriales (tales como plantas generadoras de electricidad) o fuentes geotérmicas naturales lo que permite la crianza de nuevas especies (especialmente bagres africanos, anguila, esturión, perca y tilapia).

*Figura 5: Granja tradicional de trucha en Dinamarca. Foto: DTU-Aqua*

### 3.3. Sistemas de recirculación en circuito cerrado

Los sistemas acuícolas de recirculación (SAR) son instalaciones en tierra que tienen por objetivo reducir las necesidades de agua y las emisiones de nutrientes al medio ambiente. En ellas el agua se recicla y reutiliza constantemente gracias a tratamientos mecánicos y biológicos. Entre las principales ventajas destacan el ahorro de agua y energía, el riguroso control de la calidad del agua, su bajo impacto ambiental, los altos niveles de bioseguridad y la facilidad en el control de los residuos en comparación con otros sistemas de producción. Como inconvenientes hay que destacar sus elevados costes (inversión inicial, costes operativos), la necesidad de realizar una gestión de explotación muy cuidadosa (mano de obra altamente cualificada) y las dificultades en el tratamiento de enfermedades. Estos sistemas aún están poco implantados en Europa y son más importantes en Holanda y Dinamarca. Se utiliza principalmente para la crianza de bagre y anguila aunque este tipo de tecnología es aplicable a otras muchas especies.

La producción de anguila en la UE fue de alrededor de 11 000 toneladas/año hasta 2001 con un ligero descenso (8 500 toneladas/año) en 2002, y con tendencia a estabilizarse desde entonces. Sin embargo esta cifra esconde importantes cambios entre los principales productores. La producción italiana (la mayor de la UE) se encuentra en una constante tendencia a la baja desde finales de los 90 y la producción danesa también descendió después de 2001. Estas pérdidas se han visto parcialmente compensadas por un aumento en la producción holandesa. Sin embargo, debido a la incertidumbre de la oferta de juveniles, algunos anguilicultores han derivado su producción a otras especies o simplemente han abandonado el sector.

*Figura 6: Producción intensiva de tilapia en circuito cerrado Foto: FISHION AQUACULTURE B.V*

### *3.4. Crianza en jaulas*

El sistema de crianza en jaulas bien diseñado y gestionado también representan una posibilidad (aunque limitada) para la acuicultura continental. En algunos cuerpos de agua, la producción intensiva o extensiva de peces en jaulas puede estar en consonancia con el uso sostenible de los recursos naturales. Por ejemplo, la acuicultura de salvelino ártico (*Salvelinus alpinus*) es un negocio pequeño pero con éxito en Suecia actualmente y se espera que aumente considerablemente en los próximos años. Estas granjas se localizan principalmente en los lagos no explotados, embalses y represas de los ríos al norte del país. Las aguas son naturalmente pobres en nutrientes y después de la regulación del agua se han agotado siendo prácticamente estériles. La acuicultura del salvelino en estas aguas sería una acción restauradora porque el incremento en la cantidad de nutrientes serviría para llevar el medio ambiente acuático a su estado natural. En estos lagos se ha estimado que se requiere al menos una producción anual de 5 000 toneladas de salvelino para aumentar el nivel actual de fósforo, de 3 µg/l para el nivel estimado original de 10 µg/l.

# 4. Marco normativo y de gobernanza en la acuicultura continental europea

Es un hecho bien conocido que la acuicultura es uno de los sectores regulados en la Unión Europea. La producción de peces empleando los recursos muy limitados de las zonas costeras y los cauces de agua dulce, es un tema de interés público. No es de extrañar que todas las partes interesadas (la UE y los organismos gubernamentales nacionales, las organizaciones no gubernamentales y la propia industria) quieran controlar el sector. Por otro lado, es muy difícil que los acuicultores, interesados sólo en producir peces sanos sin destruir sus recursos naturales, puedan revisar la ingente cantidad de reglamentos, documentos y otras comunicaciones generadas en los pasados años.

En el proyecto SustainAqua los estudios de caso se llevaron a cabo para apoyar a los acuicultores a desarrollar su negocio, al tiempo que salvaguardan el agua dulce limpia que es su principal recurso. El objetivo de este capítulo es ofrecer una visión general acerca de los documentos más importantes relacionados con la acuicultura continental de la UE, las ONG y otras organizaciones. Este tema está más detallado en un estudio disponible en el sitio web del proyecto (www.sustainaqua.org) y en la herramienta de asesoramiento (wiki.sustainaqua.org)

Es evidente que en los Estados miembros de la UE los diferentes instrumentos jurídicos comunitarios son los que tienen mayor impacto en la regulación de la actividad acuícola. La Federación Europea de Productores de Acuicultura ha elaborado un excelente resumen de los diferentes tipos de documentos legislativos (fuente: www.profetpolicy.info):

- **Libro Verde:** los Libros Verdes son documentos publicados por la Comisión Europea para estimular la discusión sobre determinados temas a nivel europeo. Invitan a las partes interesadas (organismos o particulares) a participar en un proceso de consulta y debate sobre la base de las propuestas presentadas. Los libros verdes pueden dar origen a desarrollos legislativos que se esbozan en los Libros Blancos.
- **Libro Blanco:** Los Libros Blancos de la Comisión son documentos que contienen propuestas de acción comunitaria en un área específica. En algunos casos son la continuación de un Libro Verde que inició el proceso de consulta a nivel europeo. Cuando un Libro Blanco es acogido favorablemente por el Consejo, puede dar lugar a un programa de acción para la Unión en el ámbito tratado.
- **Documentos COM:** son propuestas que abarcan la legislación y otras comunicaciones de la Comisión al Consejo y/o las otras instituciones, y sus trabajos preparatorios.
- **Documentos SEC:** son documentos internos de representación de asociados con el proceso de toma de decisiones y el funcionamiento general de los servicios de la Comisión.
- **Decisión:** Las decisiones de la UE son obligatorias para las personas, empresas o Estados miembros mencionados en la misma. En general no es vinculante para el resto, como en el caso de un reglamento.
- **Directiva:** Las directivas deben ser transferidas a la legislación nacional a través de los Estados miembros vía parlamento y gobierno. Con los años, la UE ha proclamado muchas directivas de aplicación directa e incluso ha declarado que los países están obligados a pagar indemnización en caso de que no aplicar la directiva a tiempo. Estos documentos se suelen transponer en la legislación nacional por los parlamentos o, con mayor frecuencia, por los gobiernos a través de los actos delegados.
- **Recomendación:** Son decisiones no vinculantes que sólo instan a cumplir a los Estados miembros. Un Estado miembro no puede ser multado por el incumplimiento de las recomendaciones.
- **Reglamento:** Son decisiones de la UE que obligan directamente a todos los Estados miembros y a los ciudadanos en su conjunto. Mientras que las directivas deben ser "transformadas" por la legislación nacional, los reglamentos son directamente aplicables. Por lo tanto, está prohibido cambiar los reglamentos de la UE si se incluyen en las leyes nacionales.
- **Resolución:** La resolución es una declaración no vinculante, que define objetivos y hace afirmaciones políticas. Las resoluciones del Consejo Europeo establecen la dirección de las futuras iniciativas políticas y pueden ser utilizados por el Tribunal de la UE para interpretar las leyes. También pueden ser referidas como una forma de "derecho blando".
- **Tratado**: Es el acuerdo formal entre dos o más Estados en relación con la paz, alianza, comercio, u otras relaciones internacionales. También es el documento formal que contiene dicho acuerdo internacional.

Estas son las herramientas que apoyan la aplicación de las políticas de la UE y que funcionan como "pilares" de la misma. Hay muchas políticas comunes que influyen en la acuicultura continental, pero probablemente las más importantes son:

- Política Pesquera Común
- Políticas sobre cuestiones ambientales, principalmente las políticas de agua

## *4.1. Política Pesquera Común (PCC) y documentos relacionados*

La Política Pesquera Común (PPC) es el instrumento de la Unión Europea para la gestión de la pesca y la acuicultura. Fue creado para gestionar un recurso común y cumplir con la obligación establecida en los Tratados originales de la entonces Comunidad Europea.

La política pesquera común debería garantizar la explotación de los recursos acuáticos vivos que facilite unas condiciones económicas, ambientales y sociales. Con este fin, la Comunidad debería aplicar el criterio de precaución en la adopción de medidas destinadas a proteger y conservar los recursos acuáticos vivos, procurar su explotación sostenible y reducir al mínimo el impacto de las actividades pesqueras en los ecosistemas marinos. Sin embargo, el principal objetivo es la aplicación progresiva de un enfoque ecosistémico de la gestión pesquera. También contribuye al desarrollo de la acuicultura como sector económicamente viable y competitivo teniendo también en cuenta los intereses de los consumidores.

Se han adoptado medidas comunes acordadas en las siguientes áreas:

- **Conservación y limitación del impacto medioambiental sobre las pesquerías**- para proteger los recursos pesqueros mediante la regulación de la cantidad de peces extraídos del mar, permitiendo la reproducción de los juveniles y velando por que se respeten las medidas.
- **Estructuras y gestión de la flota** – para ayudar a los sectores pesquero y acuícola a adaptar sus equipos y organizaciones a las limitaciones impuestas por la escasez de recursos y mercado. Estas medidas se dirigen a establecer un equilibrio entre el esfuerzo pesquero y los recursos disponibles del lugar.
- **Mercados** - para mantener una organización común de mercados en los productos de la pesca y para equilibrar la oferta y la demanda en beneficio de los productores y los consumidores.
- **Relaciones exteriores** – para establecer acuerdos pesqueros de asociación y negociar regionalmente en el plano internacional con las organizaciones transnacionales para adoptar medidas comunes de conservación de las pesquerías de aguas profundas.

Desde 2007, la aplicación de la PPC es paralela a la política marítima integrada de la Unión Europea. El nombre del responsable de la Dirección General se convirtió en Dirección General de Asuntos Marítimos y Pesca (DG MARE).

Sin embargo, el foco principal de la PPC es la pesca de captura en los mares. La acuicultura ha adquirido un papel importante sólo en los últimos años. Las cuestiones relacionadas con la acuicultura en la actualidad se han convertido en una parte importante de las mencionadas áreas de actividad común. Como el principal órgano ejecutivo de la PPC, en 2002, la Dirección General de Pesca y Asuntos Marítimos y Pesca ha elaborado un documento COM [COM (2002) 511][3].sobre la **estrategia para el desarrollo sostenible de la acuicultura europea**. En 2007, la DG MARE ha iniciado un debate mutuo con el sector de la acuicultura para actualizar esta estrategia. El nuevo documento COM (2009) 162 sólo ha sido publicado en abril de 2009 y está disponible en todos los idiomas nacionales de la UE.

### 4.1.1. La estrategia de la Comisión para el desarrollo sostenible de la acuicultura europea

La estrategia de la Comisión para el desarrollo sostenible de la industria europea de la acuicultura tiene por objeto:

- Crear empleos seguros a largo plazo, en particular en zonas dependientes de la pesca;
- Asegurar que los consumidores puedan disponer de productos que son sanos, seguros y de buena calidad, así como fomentar la salud y el bienestar animal;
- Garantizar una industria respetuosa con el medio ambiente.

La estrategia señala la importancia de reducir los impactos ambientales negativos de la acuicultura mediante el desarrollo de un conjunto de normas y/o acuerdos voluntarios que eviten la degradación medioambiental. Además, la contribución positiva de algunas explotaciones acuícolas con el medio ambiente debe reconocerse y fomentarse, incluso mediante incentivos financieros públicos.

En cuanto a los conflictos entre la acuicultura y el medio ambiente, la estrategia señala las siguientes áreas:

- Mitigar el impacto de los residuos

[3] http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2002:0511:FIN:ES:PDF

- Gestionar la demanda de peces salvajes (juveniles) para el crecimiento
- Desarrollar instrumentos para hacer frente a los efectos de las fugas, especies exóticas y organismos modificados genéticamente
- Prevención integral de la contaminación y control
- Criterios y directrices específicas para las Evaluaciones de Impacto Ambiental de la acuicultura
- Reconocer y reforzar el impacto positivo de la acuicultura extensiva y la repoblación
- Encontrar soluciones a la depredación de especies salvajes protegidas

En general, se considera que la estrategia de 2002 sigue siendo válida y se apoya plenamente su visión general y objetivos aunque se han presentado varios argumentos para justificar la necesidad de una revisión. La comisión inició el proceso de consulta en 2007 para actualizar esta estrategia de la acuicultura. El documento recientemente publicado señala nuevos objetivos y subraya la importancia de algunos elementos de la anterior estrategia, como:

1. Crecimiento de la acuicultura respetuoso con el medio ambiente: La UE se ha comprometido a un alto nivel de protección del medio ambiente y la legislación comunitaria se basa en el principio de precaución. Las tecnologías "clásicas" para la depuración del agua mediante la eliminación de residuos y contaminantes están disponibles y el desarrollo de nuevas tecnologías para reducir los efluentes también es probable que sea significativo en los próximos años. El cumplimiento de la legislación de aguas de la Comunidad también es esencial para garantizar la calidad de agua que se requiere para producir alimentos de calidad, inocuos y saludables.
2. La domesticación de los animales: La crianza en las mejores condiciones, de buena salud y con adecuados piensos adaptados a las necesidades fisiológicas de los animales acuáticos son esenciales para un óptimo crecimiento y producción. Garantizando el bienestar de los peces también se contribuye a una mejor imagen para el sector de la acuicultura.
3. La igualdad de competencia en términos de espacio: El aumento de la competencia con la agricultura, la industria y el turismo por el espacio, representa un importante desafío para el desarrollo futuro o incluso el mantenimiento de la acuicultura continental y marina en las zonas costeras. La elección del emplazamiento es crucial y la planificación espacial (ordenación del territorio) tiene un papel clave que desempeñar en la prestación de orientaciones y datos fiables para la localización de una actividad económica.
4. Reducción de la carga administrativa: La reducción de las trabas burocráticas, especialmente para las pequeñas y medianas empresas es esencial para promover el desarrollo de la acuicultura en Europa.
5. Permitir al negocio acuícola hacer frente a las demandas del mercado: El sector de la acuicultura de la UE debería saber responder a las demandas de los consumidores, adaptándose a las necesidades cambiantes del mercado y ser capaz de interactuar en igualdad de condiciones con los demás actores de la cadena de comercialización. En consecuencia, las necesidades del sector de la acuicultura serán evaluadas y dirigidas, en particular en relación con las organizaciones de productores, entre profesionales, la información de los consumidores y la comercialización de instrumentos tales como el etiquetado de los alimentos acuáticos, en el marco de la futura reforma de la política de mercado de la pesca y de la acuicultura.

### 4.1.2. Reglamento del Fondo Europeo de la Pesca

Hasta 2006, el principal instrumento financiero que apoyaba la Política Pesquera Común era el Instrumento Financiero de Orientación de la Pesca (IFOP[4]). Para el período de planificación UE 2007-2013 se utilizará un nuevo instrumento financiero, el Fondo Europeo de la Pesca (FEP).

Durante el desarrollo del FEP, los debates con los Estados miembros y las partes interesadas sobre la propuesta de la Comisión dieron lugar a una serie de cambios, como por ejemplo, la propuesta inicial de limitar las ayudas a las PYMES y microempresas que operan en la acuicultura, procesado y comercialización. Ahora será posible la concesión de las ayudas a las PYMES y algunas grandes empresas, a condición de que las microempresas tengan prioridad. Además se podrán conceder nuevas ayudas para los acuicultores cuyas explotaciones piscícolas se encuentren en la red Natura 2000 de áreas protegidas. También será posible el apoyo a la pesca en aguas interiores, las organizaciones de productores y la compra de un primer buque de segunda mano para los jóvenes pescadores.

El FEP tendrá una vigencia de siete años, con un presupuesto total de alrededor de 3,8 mil millones de €. La financiación estará disponible para todos los sectores de la industria -pesca marina y continental, acuicultura, empresas, organizaciones de productores y sectores de transformación y comercialización-, así como zonas pesqueras. Corresponderá a los Estados miembros decidir cómo distribuir los fondos entre las

[4] Financial Instrument for Fisheries Guidance (FIFG)

diferentes prioridades establecidas, pero tendrán que preparar un Plan Estratégico Nacional como base del Programa Operativo.

Sobre el contenido del PEN:

- Descripción general del sector.
- Análisis DAFO del sector y su desarrollo.
- Objetivos y prioridades de los Estados miembros frente a la explotación sostenible.
- Desarrollo de la pesca y la acuicultura y con respecto a la PPC.
- Indicación de los recursos que deben movilizarse para llevar a cabo la estrategia nacional.
- Procedimiento para la elaboración, aplicación y supervisión del PEN.

## Apoyo financiero para los acuicultores

Por supuesto, las estrategias y las medidas previstas tienen que armonizarse con el Reglamento del Consejo de Fondo Europeo de Pesca (FEP). Estos documentos identifican los siguientes 5 ejes prioritarios:

1. Medidas para la adaptación de la flota pesquera comunitaria
2. Acuicultura, pesca interior, transformación y comercialización de productos pesqueros y acuícolas.
3. Medidas de interés común.
4. Desarrollo sostenible de las zonas de pesca.
5. Asistencia técnica.

Para los acuicultores que trabajan en un entorno continental las medidas más importantes se detallan en los ejes 2 y 3.

*Eje 2- Acuicultura, pesca interior, transformación y comercialización de productos pesqueros y acuícolas*

Para la financiación del sector acuícola, en el eje 2, se pueden elegir las siguientes medidas:

**Inversiones productivas en la acuicultura:** El FEP podrá apoyar inversiones para la construcción, ampliación, equipamiento y modernización de instalaciones de producción, en particular con miras a mejorar las condiciones de trabajo, la higiene, la salud humana o animal, la calidad del producto y para la reducción de consecuencias negativas o mejora de los efectos positivos en el medio ambiente. Las inversiones deberán contribuir a uno o más de los siguientes objetivos:

a. Diversificación hacia nuevas especies o producción de especies con buenas perspectivas de mercado.
b. Aplicación de métodos de acuicultura que reduzcan sustancialmente las consecuencias negativas o mejoren los efectos positivos sobre el medio ambiente en comparación con las prácticas normales en el sector de la acuicultura.
c. Apoyo a actividades tradicionales de acuicultura para preservar y desarrollar el tejido económico y social y el medio ambiente.
d. Apoyo para la compra de equipos para proteger las explotaciones de los depredadores salvajes.
e. Mejora de las condiciones laborales y de seguridad de los trabajadores de la acuicultura.

**Medidas hidroambientales:** El FEP podrá apoyar la concesión de compensaciones por el uso de métodos de producción acuícola que contribuyan a proteger y mejorar el medio ambiente y la conservación de la naturaleza.

Por ejemplo, las formas de explotación acuícola que incluyan la protección y mejora medioambiental, los recursos naturales, la diversidad genética y la gestión del paisaje pueden obtener apoyo dentro de esta medida. Aunque por el apoyo prestado, los beneficios ambientales de estos compromisos deberán demostrarse en una evaluación previa realizada por los órganos competentes designados.

La Comisión también quiere alentar a los acuicultores a participar en el sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales creado por el Reglamento (CE) n° 761/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de marzo de 2001 que permite la participación voluntaria de las organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS).

Sin embargo, existen aún muchos debates dentro de la industria sobre la acuicultura orgánica (ecológica) dentro del significado del Reglamento (CEE) nº 2092/91. La producción orgánica (ecológica) de peces puede ser apoyada por el FEP en estas medidas.

Debido a la dificultad de establecer una regulación de la acuicultura orgánica (estricta y cara), es muy importante que la "acuicultura sostenible", también pueda recibir compensaciones del FEP por la creación de valores ambientales. Por “"acuicultura sostenible" entendemos aquí el hecho de ser una actividad compatible con las limitaciones medioambientales específicas resultantes de la designación de zonas Natura 2000 de conformidad con la Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la

conservación de los hábitats naturales y de fauna y flora silvestres[5]. Con el fin de recibir una indemnización en virtud del presente artículo, los beneficiarios deberán comprometerse por un mínimo de cinco años con la adopción de los requisitos ambientales que van más allá de la mera aplicación de las buenas prácticas habituales.

**Medidas de salud pública:** Estas medidas se refieren principalmente a los productores de moluscos y su protección contra los impactos económicos de los afloramientos de algas nocivas.

**Medidas de sanidad animal:** El FEP podrá contribuir a la financiación del control y la erradicación de enfermedades en la acuicultura en los términos de la Decisión 90/424/CEE del Consejo, de 26 de junio de 1990, relativa a gastos en el sector veterinario.

Hay otras medidas en el eje 2 que no afectan directamente a los acuicultores continentales, sin embargo, en algunos casos, pueden estar también interesados.

**Pesca interior:** Medidas subvencionables de la ayuda.

- Ayudas para la pesca continental y pesca en el hielo, de acuerdo a disposiciones similares a las existentes en el actual IFOP.
- Ayuda a la reasignación de los barcos de navegación interior fuera de la pesca.
- Paralización temporal prevista en un acto jurídico comunitario.

**Transformación y comercialización:** Medidas subvencionables de la ayuda.

- Mejorar el trabajo, la salud, las condiciones de higiene y la calidad del producto.
- Reducir los impactos negativos sobre el medio ambiente.
- Mejorar el empleo de especies poco utilizadas, subproductos y residuos.
- Aplicar las nuevas tecnologías, desarrollar nuevos métodos de producción.
- Comercialización de productos (principalmente provenientes de los desembarques locales y de la acuicultura).
- La formación permanente.

*Eje 3 – Medidas de interés común*

En el eje 3, el FEP podrá apoyar medidas de interés común que no pueden ser normalmente asumidas por el sector privado y que contribuyan a los objetivos de la política pesquera común. Los promotores de estas medidas pueden ser los operadores privados, organizaciones que actúen en nombre de los productores o las organizaciones reconocidas, a condición de que sus acciones sean de interés común. Son medidas subvencionables:

- Acciones colectivas.
- Protección y desarrollo de la fauna y la flora acuática.
- Puertos de pesca, refugios y lugares de desembarque.
- Desarrollo de nuevos mercados y campañas de promoción.
- Los proyectos piloto llevados a cabo por un agente económico, una asociación comercial reconocida o cualquier otro organismo competente designado a tal efecto por el Estado miembro, en colaboración con un organismo científico o técnico.
- Modificación de los buques pesqueros con vistas a la reasignación

Acciones colectivas relacionadas con la acuicultura pueden ser por ejemplo:

- Mejora de las condiciones de trabajo y seguridad.
- Transparencia de los mercados.
- Mejora de la calidad y la inocuidad de los alimentos.
- Desarrollo, reestructuración o mejora de instalaciones acuícolas.
- Desarrollo de nuevos métodos de formación.
- Promoción de la cooperación entre científicos y operadores.
- Promoción de la igualdad de oportunidades.
- Creación y reestructuración de las organizaciones de productores y aplicación de sus planes.
- Estudios de viabilidad relacionados con la promoción de asociaciones con terceros países.

[5] En España el mejor ejemplo es la empresa PIMSA (Pesquerías Isla Mayor S.A.) localizada en Parque Entorno de Doñana (www.vetalapalma.es)

### *4.2. Políticas ambientales con gran impacto en el desarrollo de la acuicultura*

Que la UE tenga una política de medio ambiente no es novedad. El programa actual de acción medioambiental con vigencia hasta 2012, es el sexto en la serie. Se basa en 30 años de actividad y ya ha proporcionado una serie de beneficios (aire y agua más limpios, la expansión de los hábitats naturales protegidos, mejoras en la gestión de los residuos y en la consideración inicial de las implicaciones ambientales de las decisiones de planificación, y productos más ecológicos). Sin embargo, los desafíos siguen siendo enormes.

El sexto programa de acción medioambiental identifica cuatro prioridades:

- Cambio climático.
- Naturaleza y biodiversidad.
- Medio ambiente, salud y calidad de vida.
- Recursos naturales y residuos.

Desde el punto de vista del acuicultor, las acciones en el campo de conservación de la naturaleza y la protección de los recursos naturales (como el agua) son las más importantes.

#### 4.2.1. Políticas de conservación de la naturaleza: Directivas Hábitat y Aves, Natura 2000

La política de conservación de la naturaleza de la UE se basa en dos elementos principales de la legislación, la Directiva de Aves y la Directiva Hábitats. Sus prioridades son la creación de la red ecológica europea (de zonas especiales de conservación) denominada Natura 2000, e integrar la protección de la naturaleza en otras políticas de la UE, tales como la agricultura, el desarrollo regional y el transporte.

La Red Natura 2000 existe desde 1992 cuando se adoptó la Directiva Hábitats, que, junto con la Directiva sobre las aves, constituye la piedra angular de la política de conservación de la naturaleza en Europa. Es parte de la respuesta de Europa a la conservación de la biodiversidad mundial en consonancia con las obligaciones internacionales en virtud del Convenio sobre la Diversidad Biológica.

El objetivo de la Red Natura 2000 es la protección y gestión de hábitats y especies vulnerables a través de su área de distribución natural en Europa, independientemente de las fronteras políticas o nacionales. Sin embargo, Natura 2000 es mucho más que un sistema de reservas naturales estrictas donde todas las actividades humanas son sistemáticamente excluidas. Adopta un enfoque diferente que reconoce que el hombre es una parte integral de la naturaleza y los dos funcionan mejor en asociación con otros. De hecho, muchos espacios Natura 2000 son valiosos precisamente por la forma en que se han gestionado hasta ahora y serán importantes para garantizar que este tipo de actividades (tales como la agricultura extensiva) puedan continuar en el futuro.

Asociando activamente diferentes usuarios de la tierra en la gestión de los espacios Natura 2000 es posible garantizar que se mantengan hábitats seminaturales y especies vulnerables que dependen de una gestión positiva.

La reciente reforma de la Política Agrícola Común ha disociado pagos de la producción y los ha reemplazado por un pago único por explotación que se basa en buenas condiciones agrarias y medioambientales. Natura 2000 también se incorporó a la política pesquera común y los acuicultores serán apoyados para cumplir los requisitos de la gestión en espacios Natura 2000.

La red Natura 2000 se compone de Zonas Especiales de Conservación (ZEC) designadas para uno o más de los 231 tipos de hábitats amenazados y 900 especies que figuran en los anexos de la Directiva de Hábitats. También incluye Zonas de Protección Especial (ZPE) clasificadas en la Directiva sobre las aves con alrededor de 200 especies de aves amenazadas y humedales de importancia internacional.

Se seleccionan los emplazamientos en tres etapas:

1. La primera etapa implica una evaluación científica en el ámbito nacional. Cada Estado miembro identifica lugares importantes para las especies y hábitats presentes en su territorio sobre la base de criterios científicos. Estas listas nacionales son enviadas formalmente a la Comisión Europea.
2. La segunda fase implica la selección de lugares de importancia comunitaria a partir de las listas nacionales de acuerdo con una de las siete regiones biogeográficas de Europa. Esto lo hace la Comisión Europea en estrecha colaboración con Natura 2000, que apoya el principio del desarrollo sostenible. Su objetivo no es detener las actividades económicas en su conjunto, sino establecer los parámetros por los que éstas pueden tener lugar al mismo tiempo que se salvaguarda la biodiversidad de Europa en colaboración con los Estados miembros y expertos científicos.
3. Una vez que los lugares son seleccionados con arreglo a la fase anterior, se convierten en parte de la Red Natura 2000. A continuación, los Estados miembros tienen hasta 6 años para designar Zonas Especiales de Conservación (ZEC) y, en caso necesario, introducir las medidas de gestión positiva para mantener o restablecer los hábitats y las especies a un estado de conservación favorable.

La Directiva exige que, dentro de espacios Natura 2000, se eviten las actividades perjudiciales que podrían perturbar la especie o deteriorar el hábitat para el cual ha sido designada. Deberán adoptarse medidas positivas en caso necesario, para mantener y restaurar los hábitats y las especies a un "estado de conservación favorable" en su área de distribución natural.

Corresponde a los Estados miembros decidir cómo pueden lograr la conservación del espacio:

- Medidas legales (por ejemplo, hacer una reserva natural).
- Medidas contractuales (la firma de acuerdos de gestión con el propietario del terreno).
- Medidas administrativas (proporcionando los fondos necesarios para administrar el sitio).

### 4.2.2. Directiva Marco del Agua y la acuicultura continental

El 23 de octubre de 2000 fue aprobada definitivamente la "Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo que establece el "marco para la acción comunitaria en el ámbito de la política de aguas" (también llamada Directiva Marco del Agua o abreviadamente DMA)[6]. La Directiva Marco del Agua (DMA) extiende el campo de la protección del agua a todos los tipos de aguas y establece como objetivos claros que debe alcanzarse un "buen estado" para todas las aguas europeas en 2015 y que el uso del agua sea sostenible en toda Europa. Este nuevo sistema global es muy oportuno, ya que los recursos hídricos europeos se enfrentan a crecientes presiones.

La aplicación de la Directiva Marco del Agua plantea una serie de desafíos técnicos compartidos por los Estados miembros, la Comisión, los países candidatos y los países del este europeo, así como por los interesados y las ONG. Además, el entendimiento y el enfoque común son cruciales para el éxito y la aplicación efectiva de la Directiva, porque muchas de las cuencas fluviales europeas son internacionales y cruzan fronteras administrativas y territoriales.

La Comisión presentó una propuesta de Directiva Marco del Agua con los siguientes objetivos fundamentales:

- Ampliar el alcance de la protección del agua a todas las aguas, las aguas, superficiales y subterráneas.
- Lograr un "buen estado" para todas las aguas en un plazo determinado.
- La gestión del agua basada en cuencas hidrográficas.
- "Enfoque combinado" de los valores límite de emisión y normas de calidad.
- Conseguir precios correctos.
- Alcanzar una mayor y más estrecha participación ciudadana.
- Simplificar la legislación.

El mejor modelo para un sistema único de gestión del agua es la cuenca hidrográfica -unidades naturales geográficas e hidrológicas - en lugar de fronteras políticas o administrativas. Las iniciativas adoptadas por los Estados interesados en las cuencas fluviales del Mosa, Escalda y Rin han servido como ejemplos positivos de este enfoque de cooperación conjunta y la fijación de objetivos a través de las fronteras de los Estados miembros o, en el caso del Rin, incluso más allá del territorio de la UE. Si bien varios Estados miembros ya tienen un enfoque de cuenca hidrográfica, en la actualidad no ocurre en todas partes. Para cada demarcación hidrográfica - algunas de las cuales atraviesan las fronteras nacionales – hay que establecer un "plan hidrológico de cuenca" y actualizarlo cada seis años, lo que proporcionará el marco para la coordinación de los requisitos mencionados anteriormente.

Con el fin de abordar los desafíos en una forma cooperativa y coordinada, los Estados miembros, Noruega y la Comisión acordaron una Estrategia Común de Aplicación (ECA) de la Directiva Marco del Agua sólo cinco meses después de la entrada en vigor de la Directiva. La ECA es actualizada periódicamente por los Estados miembros y para el período 2007-2009 las siguientes prioridades fueron consideradas las más importantes por la Administración del Agua: "DMA y Agricultura", "DMA e hidromorfología", "Objetivos ambientales, las exenciones y las cuestiones económicas", "La escasez de agua y sequía" y "Vigilancia química y biológica". Por otra parte, puede imaginarse que los asuntos relacionados con el cambio climático se centrarán en las opciones y las oportunidades previstas por la política marco de las aguas de la Unión Europea para su adaptación a los posibles impactos del cambio climático. Será necesario cooperar estrechamente con otras actividades de la ECA con el fin de vincular y coordinar los trabajos relacionados con el cambio climático.

Los objetivos ambientales se definen en el artículo 4, fundamental en la Directiva Marco del Agua (DMA). El objetivo a largo plazo es la gestión sostenible del agua basada en un alto nivel de protección del medio ambiente acuático. El artículo 4.1 de la DMA define el objetivo general a alcanzar en todas las aguas

[6] WFD= Water Framework Directive

superficiales y subterráneas, es decir, su buen estado para el año 2015, e introduce el principio de evitar un mayor deterioro de la situación. A continuación se detallan una serie de exenciones a los objetivos generales que permitan objetivos menos estrictos, la ampliación del plazo más allá del 2015, o la ejecución de nuevos proyectos, a condición de que se cumplan una serie de condiciones.

El ejercicio de intercalibración es un elemento clave a la hora de hacer el objetivo ambiental operativo de una forma armonizada en toda la UE. El sistema de clasificación de la DMA para la calidad del agua incluye cinco categorías (muy buena, buena, moderada, deficiente y mala). El objetivo general de la DMA es conseguir "buen estado" para todas las aguas superficiales para el año 2015. "Buen estado" significa tanto el “buen estado ecológico” como “buen estado químico".

Se han elaborado numerosos documentos de orientación e informes técnicos para ayudar a las partes interesadas a aplicar la DMA. Los documentos de orientación están destinados a proporcionar un enfoque metodológico general, pero deben adaptarse a circunstancias específicas de cada Estado miembro de la UE. Todos estos documentos y otros producidos por el proceso de la estrategia común de aplicación (ECA) se pueden encontrar en la biblioteca DMA-CIRCA (http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/iep/index_en.htm).

# 5. Calidad y diversificación- Oportunidades de Mercado para los productos y subproductos de la acuicultura

Un criterio muy importante para ganar cuotas en un mercado de creciente competencia es demostrar la excelencia de la calidad del producto relacionada a la carne y a las preferencias de los consumidores, cada vez más interesados en los procesos productivos y los ingredientes empleados en la elaboración de los piensos. Las autoridades y los reglamentos de la UE también han puesto mayor atención a la seguridad alimentaria y la trazabilidad de la producción “de la piscifactoría al plato”. La mayoría de las cadenas de supermercados han introducido normas muy estrictas sobre los productos pequeros debido a sus propios intereses comerciales y para satisfacer las necesidades de los consumidores al tiempo que cumplen con los requisitos normativos. Para vender el pescado a través de este importante canal de mercado, los productos deben tener estándares de calidad extremadamente altos.

Por otra parte, el cambio de entorno económico y social crea nuevos mercados para los subproductos de la acuicultura continental y los acuicultores deben encontrar formas innovadoras de utilizarlos de manera más eficiente. La acuicultura europea podría aumentar su sostenibilidad económica y mejorar su competitividad en el mercado internacional, especialmente con las importaciones de bajo costo de Asia, en la medida en la que se tenga acceso a otros mercados alternativos de crecimiento rápido para los subproductos unido al principal mercado de productos pesqueros de alta calidad.

Uno de los principales objetivos de SustainAqua ha sido analizar la influencia de los diferentes sistemas de cría y patrones de alimentación sobre la calidad del pescado, e investigar las aplicaciones y mercados potenciales de los diferentes subproductos.

En el estudio de caso Polaco, se evaluó el impacto de tres diferentes sistemas de crianza en estanques y regímenes de alimentación en la calidad de la carpa común. El potencial de mercado de los subproductos cosméticos y el auge de las industrias bioenergéticas se ha analizado en relación a las plantas y frutas tropicales cultivadas en "Tropenhaus' (Suiza) y a la construcción de humedales (Hungría)

## *5.1. Calidad del producto- El caso Polonia*

El término "pescado de calidad" es un complejo conjunto de características influenciadas por numerosos factores. Incluye el aspecto externo (color), el valor nutritivo (composición de la parte comestible), las características organolépticas (gusto, sabor, olor, textura), la frescura y la seguridad alimentaria (la inclusión de componentes tóxicos, metales pesados, productos químicos utilizados en las prácticas de acuicultura y sus metabolitos, patógenos humanos, etc.).

En el marco de SustainAqua, el principal objetivo ha sido averiguar la influencia de los diferentes sistemas de crianza y la alimentación en la calidad y el sabor de la carpa, mediante pruebas de consumo, perfil sensorial con paneles de expertos, y análisis químicos de proteína, grasa y ácidos grasos. Los análisis respondieron estas dos cuestiones:

- ¿Existen diferencias de calidad y sabor en la carpa empleando regímenes de monocrianza o policrianza (diferente aprovechamiento de los nichos y eficiencia en la utilización de nutrientes)?
- ¿Existen diferencias en el sabor y la calidad si la carpa se alimenta de cereales (maíz y trigo) o con alimentos naturales?

La investigación se centró en la carpa común (*Cyprinus carpio*), que es la principal especie criada en Polonia con sistemas tradicionales. Se analizaron las siguientes muestras de peces (según su procedencia):

1. **Monocrianza** de carpa común **alimentada con cereal.**
2. **Policrianza** de carpa común **sin alimentación suplementaria** (zooplancton natural exclusivamente).
3. **Monocrianza** de carpa común **alimentada de forma natural.**

Además, y debido a que actualmente hay ciertos prejuicios en los consumidores relacionados al mal sabor de algunas especies con precios bajos (aprox. 1 € / kg), también se analizaron muestras de carpa cabezona (*Hypophthalmichthys nobilis*) en régimen de policrianza con alimentación natural con el objetivo de demostrar su alta calidad y sabor para mejorar su aceptación en el mercado.

Los resultados muestran que la carpa con alimentación natural tiene bastante menor contenido graso que las alimentadas con grano. Se observaron diferencias significativas en su composición y contenido de ácidos grasos. La carpa alimentada naturalmente presentó mayor proporción de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) de tipo w-3 y w-6 que se considera que tienen efectos positivos sobre la salud humana. También en lo que respecta a la aceptación del consumidor, la carpa con alimentación natural fue mejor evaluada, debido a su frescura, neutralidad, olor no demasiado agrio y gusto no enmohecido. No se observaron diferencias significativas entre la carpa criada en régimen de monocrianza y policrianza en cualquier análisis.

Se puede concluir que el sistema de alimentación tiene una mayor importancia sobre la calidad sensorial y química que el sistema de crianza. La dieta es el principal factor que controla el contenido graso, la composición de ácidos grasos y las características organolépticas. Por lo tanto, el hecho de criar a los animales en régimen de monocrianza o policrianza no parece tener una fuerte influencia sobre la calidad del pescado.

Además, en relación a sus posibilidades de comercialización, los resultados del estudio realizado con muestras de carpa cabezona (*Hypophthalmichthys nobilis*) muestran una evaluación positiva en términos de calidad sensorial/aceptación de los consumidores y composición química (llegando a los mismos valores que la carpa común).

### *5.2. Cultivos de humedales para la industria bioenergética- El caso Hungría*

El potencial de producción de biomasa para el sector bioenergético en auge es ingente. Los subproductos lignocelulósicos de las actividades acuícolas ofrecen enormes posibilidades para la producción de etanol combustible, calor o electricidad. La combinación del tratamiento de aguas residuales de la acuicultura y la producción de bioenergía es un enfoque innovador en la Unión Europea. Podría servir para diversos fines con enormes ventajas:

1. Los acuicultores se pueden beneficiar de dos formas al mismo tiempo. Por un lado ahorrar los costes de tratamiento de aguas residuales y por otro comercializar un nuevo producto para obtener más ingresos.
2. Para satisfacer las próximas demandas masivas de biomasa en la UE, todas las áreas posibles para el cultivo bioenergético deben ser utilizadas, incluyendo las instalaciones acuícolas.

*Figura 7: Mimbreral cubierto de agua después de su plantación en el humedal construido (Foto: AKVAPARK)*

## Potenciales

En el marco de SustainAqua se analizaron específicamente diversos tipos de humedales como carrizales (*Phragmites australis*), espadañales (*Typha latifolia / angustifolia*), cañaverales (*Arundo donax*) y mimbrerales (*Salix viminalis*) determinando su composición y contenido en relación a su potencial uso como biomasa para fines bioenergéticos, producción de astillas o pellets para la calefacción, generación de electricidad o para la producción de bioetanol como biocarburante celulósico para el transporte (ver la Tabla 2).

| | |
|---|---|
| **Contenido en agua** | - Factor fundamental que determina la cantidad de calor obtenido por combustión<br>- Cuanto más alto sea al contenido de agua en la planta, menor es el contenido de energía (a mayor contenido de agua, menor valor energético) |
| **Valor combustible** | - Cantidad de energía liberada en forma de calor cuando se quema 1 kg de madera (materia) |
| **Polisacáridos de la pared celular** | - Las paredes celulares de las plantas contienen principalmente tres diferentes tipos de polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina.<br>- La celulosa y hemicelulosa contienen largas cadenas de azúcares que pueden ser convertidas en combustibles para el transporte como el bioetanol.<br>- Conocer la fracción única de azúcares (polisacáridos) es importante para evaluar el potencial inicial de los cultivos para la producción de biocarburantes |

*Tabla 2: Análisis SustainAqua para determinar el potencial bioenergético de los cultivos de humedales*

Los resultados de estos análisis demuestran claramente el potencial de aplicación para la industria bioenergética. Las cantidades de polisacáridos de la pared celular muestran las oportunidades para la producción de bioetanol celulósico a partir de estos cultivos, especialmente de *Arundo donax* y *Phragmites australis*. El valor calórico o combustible mostró resultados especialmente prometedores con los espadañales. Otros experimentos internacionales han probado el gran potencial de los cuatro humedales testados.
Sin embargo, es necesario tener en cuenta que el principal objetivo de un humedal cultivado en una explotación acuícola es el tratamiento de aguas residuales y no tanto la utilización de esta biomasa como subproducto. Por ello, el tratamiento de aguas residuales será siempre prioritario frente a la producción de bioenergía. Esto puede derivar en diversos factores que limitan el uso eficiente y rentable de la producción bioenergética:

- El emplazamiento de los humedales está condicionado por la ubicación de la piscifactoría y, por tanto, no siempre reúne las condiciones óptimas para la producción bioenergética.
- El tiempo de cosecha es importante para obtener una calidad óptima de combustión (la mejor es en la primavera).
- Los ciclos de recolección de 2 ó 3 años podrían ser más apropiados.

Se necesita investigar al detalle las condiciones óptimas en las que el tratamiento de las aguas residuales y la producción de cultivos energéticos pueden ser combinados de la forma más eficiente posible para alcanzar ambos objetivos.

## Oportunidades de Mercado

Actualmente las condiciones para el desarrollo de biomasa con fines bioenergéticos son muy favorables. La UE tiene ambiciosos objetivos para aumentar la participación de la biomasa en la composición energética europea y esto ha creado una enorme demanda de recursos en la próxima década. También es una oportunidad única para que los acuicultores puedan obtener importantes ingresos adicionales utilizando los subproductos de su granja para la próspera industria bioenergética con una importante demanda.

El sauce mimbre (*Salix viminalis*) ya se utiliza para la producción de virutas de madera para calefacción y generación de electricidad en los llamadas plantaciones de monte bajo con ciclo corto (SRC)[7], que proporcionan información útil sobre el diseño de las zonas de cultivo de humedales para sus aplicaciones en acuicultura. Los parámetros de rentabilidad sugieren un tamaño mínimo de 1 Ha con buena accesibilidad para las máquinas cosechadoras y una producción mínima de 8-11 Tm de materia seca/ha/ año.

Hoy en día el sector bioenergético sólo comienza a desarrollarse y despegar, aunque se espera que ocurran mejoras en el futuro próximo en relación al aprovechamiento de las otras tres plantas herbáceas del estudio de caso de Hungría (carrizo común *Phragmites australis*, espadaña *Typha spp.* y la caña gigante *Arundo donax*). Por lo tanto, mientras que el desarrollo tecno-económico se orienta hacia el mercado bioenergético (biomasa) en Europa y se deberán conseguir avances en los próximos 3-5 años, se deberá emplear el mismo tiempo para optimizar las condiciones para la producción de biomasa combinadas con las actividades acuícolas, sin olvidar que el principal objetivo es el tratamiento de las aguas y la retención de nutrientes.

[7] SRC = Short Rotation Coppice

### *5.3. Plantas acuáticas y frutas tropicales para la industria cosmética – El caso Suiza*

Las plantas acuáticas y las frutas tropicales tienen gran potencial para ser utilizadas como materias primas renovables en la industria cosmética. La oportunidad de estos co-productos acuícolas se encuentra en la venta de su origen orgánico; el concepto holístico podría ser el único punto de venta para estos productos. Las PYME en particular podrían estar muy interesadas en desarrollar conjuntamente nuevos productos, tales como cremas de papaya o guayaba.

## Potenciales

En el marco de SustainAqua, se analizaron muestras de lenteja de agua (*Lemna sp*.)[8], jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), guayaba (*Psidium sp*.), y papaya (*Carica papaya*). Para las frutas tropicales, los análisis se centraron en las de media y baja calidad que no se pueden vender a los mercados como producto de primera clase. Fueron evaluados ingredientes conocidos por su concentración (ver Tabla 3) al no ser posible buscar nuevos ingredientes y analizar la totalidad de la composición química:

| | |
|---|---|
| **Pectina** | - La lenteja de agua es rica en una pectina apio galacturónica específica (lemnano).<br>- Extraordinarias características en comparación con la pectina de manzana.<br>- Se puede emplear para el tratamiento de los síntomas de envejecimiento cutáneo e inflamatorio de la piel. |
| **Carotenoides, licopeno[9]** | - La guayaba y papaya son ricas en sustancias bioactivas.<br>- ß-caroteno y licopeno son conocidos por su efecto positivo sobre la salud humana. |
| **Polifenoles[10]** | - Las propiedades antioxidantes de la guayaba son atribuidas a su contenido en polifenoles.<br>- El jacinto de agua, con su contenido en polifenoles, puede proteger la piel contra los efectos nocivos de los metales pesados y mejorar la respiración celular.<br>- El jacinto de agua también podría ser adecuado para fitodepuración, ya que es capaz de asimilar metales y tóxicos de aguas residuales. |

*Tabla 3: Análisis SustainAqua para determinar el potencial industrial de las plantas acuáticas y frutas tropicales*

Los resultados de estos análisis muestran que los subproductos acuícolas del caso de estudio Suizo Tropenhaus no contienen mayores concentraciones conocidas de una sustancia activa en comparación con otras plantas. Sin embargo, el enfoque holístico y ecológico asociado a su origen (orgánico y producido de forma sostenible) podría representar un valor añadido para la utilización de los co-productos acuícolas en el sector cosmético. Esa estrategia de venta diferenciadora podría ser beneficiosa en particular para las pequeñas o medianas empresas (PYME).

## Oportunidades de Mercado

La evolución actual del mercado cosmético y en particular, el de los cosméticos naturales, es bastante favorable para el empleo de los subproductos acuícolas:

- *Fuerte aumento del crecimiento del mercado (hasta el 20% en la rama de los cosméticos naturales)*

  Las ventas mundiales de cosméticos orgánicos están aumentando los ingresos a cifras que se aproximan a 5.000 millones de € en 2006. Europa es un importante motor de crecimiento con tasas mayores al 20% que alcanzan 1.100 millones de € de ventas. Alemania (seguida de Austria y Suiza) es el país que lidera este segmento de mercado llegando a 650 millones de € de ventas en 2006. Se ha previsto que la cuota de mercado de los cosméticos orgánicos crezca del actual 6% al 10% en 2012. Sin embargo, los mercados franceses tienen un crecimiento más rápido, con tasas de crecimiento del 40% en 2005.
- *Dominio de las PYMES muy innovadoras.*

[8] La lenteja de agua también se puede considerar un subproducto de los humedales del estudio de caso húngaro y del sistema en cascada polaco

[9] El **licopeno** es un pigmento vegetal, soluble en grasas, que aporta el color rojo característico a los tomates, sandías y en menor cantidad a otras frutas y verduras. Pertenece a la familia de los carotenoides como el β-caroteno, sustancias que no sintetiza el cuerpo humano, sino los vegetales y algunos microorganismos, debiéndolo tomar en la alimentación como micronutriente. El código alimentario asignado por la Unión Europea a esta sustancia es **E-160d**. El licopeno posee propiedades antioxidantes, y actúa protegiendo a las células humanas del estrés oxidativo, producido por la acción de los radicales libres, que son uno de los principales responsables de las enfermedades cardiovasculares, del cáncer y del envejecimiento. Además, actúa modulando las moléculas responsables de la regulación del ciclo celular y produciendo una regresión de ciertas lesiones cancerosas.(Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Licopeno)

[10] Los **polifenoles** son un grupo de sustancias químicas encontradas en plantas y caracterizadas por la presencia de más de un grupo fenol por molécula. Las principales fuentes de polifenoles son bayas, té, cerveza, uvas/vino, aceite de oliva, chocolate/coco, nueces, maníes, granadas, yerba mate, y otras frutas y vegetales. Los niveles más elevados de polifenoles se encuentran generalmente en la cáscara de las frutas. Los polifenoles fueron durante un breve período de tiempo conocidos como vitamina P. Las investigaciones indican que los polifenoles pueden tener capacidad antioxidante con potenciales beneficios para la salud. Podrían reducir el riesgo de contraer enfermedades cardiovasculares y cáncer. (Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Polifenol)

En Europa, la oferta está muy fragmentada y dominada por pequeñas y medianas empresas con más de 400 PYME productoras de cosméticos naturales.

- *Alta velocidad de Desarrollo de Nuevos Productos (DNP[11]) que es característica clave.*

  La industria cosmética se caracteriza por la innovación y las altas tasas de desarrollo de productos. La innovación es esencial para mejorar el rendimiento, la seguridad y el impacto medioambiental de los productos. Las empresas están experimentando con ingredientes naturales, alejándose de productos químicos sintéticos.

- *Posicionamiento del producto: El éxito de la comercialización proviene de la clara diferenciación de los productos de la competencia.*

  Un factor crítico de éxito para los cosméticos naturales es el posicionamiento del producto. Los ganadores en el mercado son las empresas con éxito que puedan diferenciar sus productos de los competidores, tanto naturales como convencionales.

[11] NPD = New Products Development

# 6. Tratamiento de las aguas residuales de sistemas intensivos de acuicultura mediante humedales y estanques extensivos – Estudio de caso en Hungría

## *6.1. Humedales artificiales como método sostenible para el tratamiento de efluentes acuícolas y la producción de cultivos con valor (Granja de bagre africano)*

### 6.1.1. Introducción – Descripción general de la innovación

La obtención y el mantenimiento de una buena calidad del agua es uno de los factores clave para la salud y la vida y, por tanto, un objetivo destacado de las normativas nacionales y europeas así como de las ONG. El vertido de efluentes causa la eutrofización y el deterioro de los ecosistemas receptores. Además, en Hungría se aplican elevadas tasas a la liberación de vertidos[12]. Estos argumentos fuerzan a los productores a encontrar métodos de tratamiento eficaces y rentables.

Los humedales construidos artificialmente han sido redescubiertos en las últimas décadas como método eficaz para el tratamiento de aguas residuales. En los ecosistemas de humedal, la concentración de contaminantes disminuye con los procesos naturales de purificación con plantas acuáticas que son capaces de asimilarlos[13]. El vertido de sólidos en suspensión se sedimenta y se transforma en nutrientes solubles que se utilizan a través de los organismos de los humedales.

Con la combinación de diferentes tipos de humedales (una laguna de estabilización, un estanque de peces y otro de macrófitas) se puede mejorar la eficacia en la eliminación de nutrientes[14]. Además, con la integración de especies con valor (peces y vegetales) estos nutrientes se pueden convertir en productos comercializables. La crianza de peces en estanques permite reutilizar una cierta cantidad del agua de vertido puesto que los nutrientes se asimilan en la carne y el nivel de oxígeno disuelto necesario garantiza las condiciones adecuadas para los procesos aeróbicos. En el estanque de macrófitas, algunas especies toleran el nivel de agua que se aplica para asimilar una cantidad considerable de nutrientes destinados a producir biomasa con fines energéticos.

### 6.1.2. Principios del estudio de caso

El módulo ACS[15] se encuentra localizado en el sistema de estanques experimentales del Instituto de Investigación de Pesca, Acuicultura e Irrigación (HAKI) en Szarvas, Hungría. Consta de dos subsistemas a escala piloto ("A" y "B" con 1.1 Ha y 0.4 ha respectivamente) para tratar los efluentes de una granja intensiva de bagre africano (*Clarias gariepinus)* que funciona en circuito abierto.

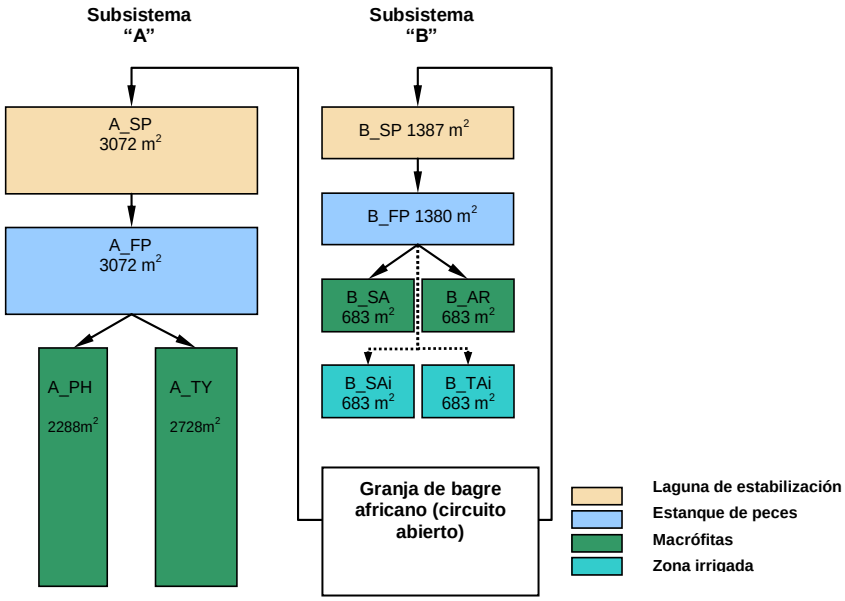



*Figura 8 : Esquema del diseño del módulo ACS del estudio de caso húngaro*

Cada subsistema fue construido combinando 3 tipos de unidades (laguna de estabilización, estanque de peces y producción de macrófitas). Los estanques se llenaron con agua dulce almacenada procedente de la cercana cuenca del río Körös al inicio del período de operación (mayo en 2007 y febrero en 2008).

[12]Semejante a los cánones de vertido que se aplican en la legislación española según la *Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, art 105:* Los vertidos al dominio público hidráulico estarán gravados con una tasa destinada al estudio, control, protección y mejora del medio receptor de cada cuenca hidrográfica, que se denominará *canon de control de vertidos.*

[13] El efecto depurador del jacinto de agua *(Eichhornia crassipes)* le permite asimilar grandes cantidades nitrógeno y fósforo, además de metales pesados como manganeso, cromo, cobre, zinc y plomo. Reduce también microorganismos patógenos y su sistema radicular es un excelente medio filtrante para minimizar los sólidos suspendidos.

[14] Eliminación de nutrientes del medio también significa su retención en los organismos que lo asimilan

[15] ACS= African Catfish System

El efluente de la piscifactoría de bagres africanos se canalizó hasta el estanque aireado de estabilización dotado con un aireador de palas y entrada de agua limpia. El agua de este estanque pasa a la unidad de peces en la cual se retienen parte de los nutrientes en los animales. Éste efluente fue canalizado hacia 4 humedales artificiales con agua superficial plantados con carrizo (*Phragmites australis*), espadaña (*Typha latifolia y T. angustifolia*), sauce mimbre (*Salix viminalis*), caña común (*Arundo donax*) y el tamariz de primavera (*Tamarix tetrandra*) (ver Tabla 4). El esquema de este módulo se muestra en la Figura 8.

En 2008 se conectaron a este subsistema "B" otros dos campos de regadío en los cuales se mantuvo el nivel del agua por debajo de la superficie y se examinó la capacidad de retención de sales de sodio y energía en el sauce mimbre y tamariz de primavera.

Se aplicaron los siguientes principios:

- Tiempo de retención: El tiempo de retención hidráulica fue de 18 días en cada humedal.
- Profundidad del agua: El promedio de profundidad de agua en las lagunas de estabilización y estanques de peces fue de 1.2 m y de 0.5 m en los estanques de macrófitas.
- Composición de los lotes: Los peces fueron colocados en los estanques entre abril y mayo en régimen de policrianza a una densidad de 900 kg/ha, siendo 35% carpa común (*Cyprinus carpio*), 60% *carpa plateada* (*Hypophthalmichthys molitrix*) y 5% de carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idella*). La composición fue elegida para lograr el doble objetivo de tratamiento de agua y utilización eficiente de los nutrientes.
- Alimentación: Totalmente natural sin aportes suplementarios.
- Despesca: Los peces fueron recogidos en noviembre, el agua se drenó totalmente y se mantuvo el fondo seco en invierno (noviembre-febrero)

| Unidad | Área | Profundidad | Especies | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| A_SP | 3 072 $m^2$ | 1.2 m | Lenteja de agua (*Lemna* sp.) | Retirada con frecuencia |
| A_FP | 3 072 $m^2$ | 1.2 m | Policrianza de carpas | Loteado en abril<br>Despescado en noviembre |
| A_PH | 2 288 $m^2$ | 0.5 m | Carrizo (*Phragmites australis*), lenteja de agua | Cosechado en noviembre |
| A_TY | 2 728 $m^2$ | 0.5 m | Espadaña (*Typha latifolia*, *T. angustifolia*) | Cosechada en noviembre |
| B_SP | 1 387 $m^2$ | 1.2 m | Lenteja de agua (*Lemna* sp.) | Retirada con frecuencia |
| B_FP | 1 380 $m^2$ | 1.2 m | Policrianza de carpas | Loteado en abril<br>Despescado en noviembre |
| B_SA | 683 $m^2$ | 0.5 m | Sauce mimbre (*Salix viminalis*), espadaña (*Typha* sp.) | Plantado en 2006, crecimiento insuficiente del mimbre e invasión de espadaña |
| B_AR | 683 $m^2$ | 0.5 m | Caña común (*Arundo donax*), espadaña (*Typha* sp.) | Plantado en 2006, crecimiento insuficiente de la caña e invasión de espadaña |
| B_SAi | 683 $m^2$ | no aplicable | Sauce mimbre (*Salix viminalis*) | Plantado in 2007, regado con agua de superficie del estanque de peces (B_FP) |
| B_TAi | 683 $m^2$ | no aplicable | Tamariz de primavera (*Tamarix tetrandra*) | Plantado in 2007, regado con agua de superficie del estanque de peces (B_FP) |

*Tabla 4: Principales características de las unidades experimentales.*

### 6.1.3. Evaluación de los indicadores de sostenibilidad seleccionados en SustainAqua

#### Aguas de abastecimiento y efluentes

El abastecimiento de agua (entrada) se ha introducido en el sistema experimental a partir de dos fuentes:

- Efluentes procedentes de la granja intensiva de pez gato (agua de tratamiento).
- Agua dulce del río Körös para llenar los estanques y suministrar oxígeno y algas a las lagunas de estabilización durante las operaciones de manejo (agua de "refresco").

Los estanques se llenaron inicialmente con agua dulce de la cercana cuenca del río Körös. La mayoría del agua del río se utilizó para llenar los estanques (13 829 $m^3$ en 2007; 11 173 $m^3$ en 2008) aunque se añadieron 10 037 $m^3$ en 2007 y 17 089 $m^3$ en 2008 durante las operaciones de manejo para estabilizar los

estanques. El promedio de consumo diario de agua fue de 65.6 $m^3$ y 69.5 $m^3$ en 2007 y 2008, respectivamente. El volumen diario teórico fue calculado conociendo el nivel del estanque porque el agua de refresco no entró en el sistema de forma rutinaria (solo en caso de niveles desfavorables de oxígeno). También se calculó el consumo específico de agua de refresco para el sistema de tratamiento, encontrando que para cada 1 $m^3$ de efluente se utilizaron entre 0.159-0.274 $m^3$ durante las operaciones de manejo y en conjunto (con el primer llenado) 0.279-0.453 $m^{3.}$

La salida de agua del sistema se asegura en la compuerta de los estanques de macrófitas. Durante el tiempo de retención hidráulica, el volumen de agua en el interior de los estanques disminuyó por efecto de la evaporación, evotranspiración y pérdidas por fugas. Por ello, el volumen de salida de agua fue más bajo, entre 55-57%, del volumen total de entrada de agua al sistema.

## Eficiencia en la utilización de nutrientes

El nitrógeno total detectado a la salida del sistema fue de 162 kg durante las operaciones de manejo en 2007, lo cual corresponde a un vertido de 1.05 kg/día del sistema de tratamiento de agua. En el efluente (agua de salida), se detectaron cantidades menores al 10% de las encontradas en el agua de entrada al sistema. El fósforo total liberado fue de 44.9 kg y el vertido diario fue de 0.29 kg, comprobando que las cantidades de fósforo en la salida fueron 27% menores que las detectadas en la entrada. El contenido de carbono de las muestras de agua se calculó como la mitad de la cantidad de sólidos suspendidos volátiles. El total de carbono liberado fue de 3 262 kg durante las operaciones de manejo que corresponde a 21.1 kg/día de vertido. En la salida de agua, se detectaron concentraciones menores al 8% del total de carbono orgánico en la entrada (Tabla 5).

| | **N** | | | **P** | | | **C** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Unidad** | **Entrada** | **Salida** | **Eliminación** | **Entrada** | **Salida** | **Eliminación** | **Entrada** | **Salida** | **Eliminación** |
| | kg | kg | % | kg | kg | % | kg | kg | % |
| A_ST | 1 167 | 722 | 38.1 | 117 | 95.1 | 18.7 | 1 930 | 1 307 | 32.2 |
| A_FI | 722 | 404 | 27.2 (44.0) | 95.1 | 69.0 | 22.3 (27.4) | 1 307 | 1 022 | 14.8 (21.9) |
| A_PH | 207 | *77.4* | 11.1 (62.6) | 35.6 | *20.5* | 12.9 (42.4) | 526 | 325 | 10.4 (38.2) |
| A_TY | 196 | 46.5 | 12.8 (76.3) | 33.4 | 15.1 | 15.6 (54.8) | 495 | 279 | 11.2 (43.6) |
| **A_Total** | **1 167** | **124** | **89.4** | **117** | **35.6** | **69.6** | **1 930** | **605** | **68.7** |
| B_ST | 512 | 235 | 54.1 | 50.0 | 31.9 | 36.2 | 813 | 561 | 31.0 |
| B_FI | 235 | 114 | 23.6 (51.5) | 31.9 | 18.8 | 26.1 (41.0) | 561 | 374 | 23.0 (33.4) |
| B_SA | 56.4 | 21.1 | 6.90 (62.6) | 9.30 | 5.13 | 8.36 (44.9) | 188 | 108 | 9.82 (42.5) |
| B_AR | 58.1 | 17.0 | 8.03 (70.8) | 9.55 | 4.13 | 10.8 (56.7) | 186 | 79.4 | 13.1 (57.3) |
| **B_Total** | **512** | **38.1** | **92.6** | **50.0** | **9.26** | **81.5** | **813** | **187** | **77.0** |
| **Total** | **1 679** | **162** | **90.3** | **167** | **44.9** | **73.1** | **2 743** | **792** | **71.1** |

*Tabla 5: Entrada de nutrientes, salida y eliminación en las unidades de estanques del sistema ACS en 2007 (entre paréntesis, cálculo de la eliminación para las diferentes entradas de agua).*

El vertido total de nitrógeno fue de 116 kg durante todo el periodo de manejo en 2008 correspondiendo un vertido de 0.48 kg/día del sistema general de tratamiento. En la salida, las concentraciones detectadas fueron menores del 6% a las encontradas en la entrada. La producción total de fósforo fue de 37.1 kg y el vertido diario de 0.15 kg. En la salida del agua, las concentraciones detectadas fueron menores al 16% de la cantidad en la entrada. El carbono orgánico total en la salida del sistema fue de 4 812 kg durante el periodo de manejo, correspondiendo a un vertido de 19.7 kg/día. Las concentraciones detectadas en la salida fueron menores al 5% del total encontrado en la entrada al sistema (Tabla 6). Los vertidos de nitrógeno y fósforo a la salida fueron considerablemente menores en 2008 que en 2007, especialmente cuando se consideran los vertidos diarios (50% menores en 2008 aproximadamente). Los vertidos diarios de carbono orgánico fueron semejantes en ambos años.

Una parte de los nutrientes en el módulo ACS fue asimilada por los peces y las plantas como subproductos con valor. El porcentaje de la entrada de nutrientes que fue retenido por los peces fue similar en ambos años correspondiendo a 1%, 1.8%, y 2.3-3.5% de nitrógeno, fósforo y el carbono orgánico respectivamente. Las plantas asimilaron entre 3.7-4.0% 8.5-9.2% del nitrógeno y fósforo introducidos en el sistema (Tabla 7).

| Unidad | N | | | P | | | C | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Entrada** | **Salida** | **Eliminación** | **Entrada** | **Salida** | **Eliminación** | **Entrada** | **Salida** | **Eliminación** |
| | kg | kg | % | kg | kg | % | kg | kg | % |
| A_ST | 1 352 | 865 | 36.0 | 152 | 95.9 | 37.0 | 2 646 | 1 304 | 50.7 |
| A_FI | 865 | 376 | 36.1 (56.5) | 95.9 | 48.0 | 31.5 (49.9) | 1 304 | 1 143 | 6.07 (12.3) |
| A_PH | 184 | 41.9 | 10.5 (77.3) | 23.7 | 15.5 | 5.36 (34.4) | 562 | 161 | 15.2 (71.4) |
| A_TY | 198 | 37.1 | 11.9 (81.2) | 23.3 | 14.7 | 5.66 (36.9) | 522 | 166 | 13.4 (68.1) |
| **A_Total** | **1 352** | **79.0** | **94.2** | **152** | **30.2** | **80.1** | **2 646** | **327** | **87.6** |
| B_ST | 717 | 361 | 49.6 | 78.9 | 40.4 | 48.7 | 1 351 | 554 | 59.0 |
| B_FI | 361 | 184 | 24.7 (49.0) | 40.4 | 19.3 | 26.7 (52.2) | 554 | 503 | 3.78 (9.22) |
| B_SA | 88.3 | 17.3 | 9.90 (80.4) | 9.21 | 2.96 | 7.93 (67.9) | 238 | 68.3 | 12.5 (71.3) |
| B_AR | 99.0 | 19.5 | 11.1 (80.3) | 9.78 | 3.97 | 7.36 (59.4) | 257 | 80.1 | 13.1 (68.8) |
| **B_Total** | **717** | **36.8** | **94.9** | **78.9** | **6.93** | **91.2** | **1 351** | **148** | **89.0** |
| **Total** | **2 069** | **116** | **94.4** | **231** | **37.1** | **83.9** | **3 997** | **475** | **88.1** |

*Tabla 6: Entrada de nutrientes, salida y eliminación en las unidades de estanques del sistema ACS en 2008 (entre paréntesis, cálculo de la eliminación para las diferentes entradas de agua).*

| **Nutrientes** | | **Unidad** | **2007** | | | **2008** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **N** | **P** | **C** | **N** | **P** | **C** |
| Entrada | | kg | 1 679 | 167 | 2 743 | 2 069 | 231 | 3 997 |
| Salida | Agua | % | 9.7 | 27 | 29 | 5.6 | 16 | 4.3 |
| | Agua en la despesca | % | 10 | 17 | 20 | 5.9 | 9.2 | 7.5 |
| | Peces | % | 1.0 | 1.8 | 3.5 | 0.99 | 1.7 | 2.3 |
| | Plantas | % | 4.0 | 9.2 | n.c.* | 3.7 | 8.5 | n.c.* |

*no calculado

*Tabla 7: Salida de nutrientes y retención en los productos secundarios.*

## Eficiencia energética

Durante el periodo operativo del sistema experimental ACS, se utilizó la energía eléctrica para bombear las aguas residuales de la piscifactoría a las lagunas de estabilización (una bomba de potencia de 3.1 kW) y aireadores (2 piezas con una potencia de 0.75 kW) para mezclar y airear el agua del estanque. El consumo de energía eléctrica de las bombas y aireadores fue 16 221 y 16 997 kWh en 2007 y 2008, respectivamente. El consumo de energía de bombeo podría ser eliminado si el efluente a tratar pudiera ser introducido en la laguna por gravedad. El consumo específico de energía calculado para el volumen de efluentes tratados fue 0.257 kWh/m$^3$ en 2007 y 0.273 kWh/m$^3$ en 2008. Además se emplearon aproximadamente 48 l de combustible (es decir, 487 kWh) para cosechar y transportar la biomasa vegetal. El valor combustible total de la biomasa cosechada-obtenida fue de 81 728 MJ correspondientes a 22 702 kWh en 2007 y 359 207 MJ equivalentes a 99 780 kWh en 2008. El balance energético del sistema experimental ha sido positivo y se ha calculado que se produjeron cerca de 6 000 kWh en 2007 y 82 296 kWh en 2008 (Tabla 8).

| | **2007** | | **2008** | |
|---|---|---|---|---|
| | **kWh** | **MJ** | **kWh** | **MJ** |
| Consumo de energía eléctrica | 16 221 | 58 396 | 16 997 | 61 189 |
| Bombeo del efluente | 10 714 | 38 570 | 9 077 | 32 677 |
| Aireación | 5 508 | 19 829 | 7,920 | 28 512 |
| Consumo de fuel | 487 | 1 754 | 487 | 1 754 |
| Valor combustible de las plantas | 22 702 | 81 728 | 99 780 | 359 207 |
| **Balance** | **5 994** | **21 578** | **82 296** | **296 263** |

*Tabla 8: Balance energético del modulo ACS*

En el sistema de tratamiento de efluentes se cultivaron plantas como subproductos con valor, dado que pueden ser utilizadas como combustible o fuente de energía renovable. Las plantas fueron cosechadas en los estanques de macrófitas en diciembre de 2007, y la biomasa total fue de 8 320 kg.

La biomasa de macrófitas se estimó en 40 900 kg en 2008. La espadaña mostró la tasa de crecimiento más alta y la tasa más baja se encontró para la plantación de sauce mimbre. En los estanques de carrizo y sauce mimbre se produjo un fuerte crecimiento espontáneo de espadaña que impidió el desarrollo de las

especies plantadas. El carrizo tuvo el mayor valor combustible con un promedio de 11 372 J/g. El sauce mimbre tuvo un valor de 9 699 J/g. La espadaña y la caña común mostraron valores combustibles relativamente bajos de 9 214 J/g y 8 611 J/g, respectivamente.

Dentro de las estaciones de otoño, invierno y primavera, el valor calórico casi se duplica en la caña y aumenta en un 45%en la espadaña, mientras que el contenido de agua disminuye. Estos resultados indican que marzo y abril es el mejor momento del año para la cosecha de los cultivos de humedales para obtener mayor valor calórico porque el contenido de agua es más bajo en ese período y, en consecuencia, el poder calorífico es relativamente alto.

### Productividad de la mano de obra

Las operaciones de cultivo del humedal, actividades diarias de mantenimiento, cosecha y despesca requieren aproximadamente 64, 176, 216 y 32 horas trabajo/operario, respectivamente. El total correspondiente al tratamiento de efluentes equivale a 488 h en todo el ciclo productivo o su equivalente 0,00778 horas/$m^3$ de efluente (0,4468 min/$m^3$).

## 6.1.4. Factores de éxito y limitaciones

El modulo ACS ha proporcionado resultados significativos desde el punto de vista ambiental y económico:

- **Reutilización y retención de nutrientes**: La aplicación del sistema de tratamiento analizado disminuyó la cantidad de los vertidos de nutrientes de la acuicultura intensiva hasta 1 300 kg N/ha, 130 kg de P/ha y 7 500 kg DQO/ha durante todo el período de manejo (entre febrero- noviembre) de 2008.
- **Producción de peces**: El promedio de producción de peces alimentados de forma natural es de 1 458 kg/ha.
- **Producción de biomasa vegetal:** En el sistema se produjeron 40 900 kg de biomasa vegetal como potencial fuente de energía renovable. El ahorro de emisiones de $CO_2$ compensando la quema de combustibles fósiles y gas sería de 11 250 kg anuales.
- **Balance energético positivo:** Se ha comprobado que la energía producida por los humedales durante el periodo de manejo del sistema es mayor que la equivalente consumida para desarrollar las operaciones de plantación cosecha y mantenimiento.
- La eliminación de nutrientes de los efluentes de agua conduce a la **reducción de la tasas de vertido** y ayuda a evitar las sanciones ambientales.
- **Tecnología de muy bajo coste** si se compara con otras de tratamiento de aguas residuales.
- Los subproductos comercializables generan **ingresos adicionales.**

Sin embargo, la aplicación del método de tratamiento plantea algunas limitaciones:

- Las condiciones climáticas de Europa Central y Oriental limitan la operación continua de los humedales construidos en relación con el mismo nivel de vertidos en invierno. A bajas temperaturas (menos de 15 º C), se recomienda reducir el vertido de efluentes disminuyendo la concentración (filtrando los sólidos en suspensión) o aumentando el volumen de agua (diluyendo con agua almacenada).
- El flujo de agua superficial suministrado de forma continua en los humedales aseguró condiciones favorables para el carrizo y la espadaña. Sin embargo, este sistema de suministro de agua y la capa de suelo relativamente delgada no son óptimas para el crecimiento del sauce mimbre y la caña común. Los suelos húmedos (no inundados) con una profunda capa fértil proporcionan las condiciones favorables para el cultivo de estas especies.
- El éxito en la construcción y las operaciones de manejo se basa en la planificación detallada y el control continuo de la calidad del agua en las unidades y del nivel de oxígeno disuelto en los estanques de peces, porque la sobrecarga del sistema puede causar graves perturbaciones en el equilibrio natural de los estanques funcionando como ecosistemas.

## 6.1.5. Beneficios de la aplicación

La legislación medioambiental obliga a los productores a reducir al mínimo el vertido de nutrientes y contaminantes y a usar de forma sostenible los métodos de purificación. La combinación del sistema de humedales es un método de tratamiento adecuado capaz de satisfacer las normas ambientales. Su construcción y costos de operación son inferiores a los de las tecnologías de tratamiento convencional. Con el valor medio de los parámetros de calidad de agua obtenidos en los experimentos, se ha calculado que este método supone un ahorro de 34.500,00 € (9.7 millones de HUF) en el pago de los tasas de vertido en una explotación de bagre africano. Además, el ingreso adicional generado por la producción de espadaña y pescado equivale a 4.2 millones de HUF (15.000,00 €) mientras que los costes totales de operación están por debajo de 4.6 millones de HUF (17.000,00 €).

Para no desaprovechar la oportunidad de mejorar la eficiencia económica utilizando los nutrientes, las unidades de producción se pueden utilizar para especies ornamentales con mayor valor (p.ej. peces y plantas ornamentales).

Los métodos de tratamiento naturales requieren una baja cantidad de energía no renovable, sin embargo, son sistemas de cultivo intensivo. Basándose en los resultados experimentales y teniendo en cuenta las consideraciones climáticas y económicas del sistema de humedal, una unidad de 12 hectáreas (ha) sería capaz de tratar el 100% de los efluentes de una granja de bagre africano de circuito abierto con una capacidad de 300 Tm de peces/año.

## *6.2. Del estudio de caso a la explotación: ¿Cómo tratar los efluentes de una granja intensiva de bagres?*

### 6.2.1. Descripción de la piscifactoría

Los resultados del estudio de caso ACS se extrapolaron a una granja ya existente con una capacidad total de producción de 300 toneladas (Tm) anuales. El bagre africano (*Clarias gariepinus*) se produce en una explotación intensiva con tanques situados al aire libre y agua de origen geotérmico. El volumen total de agua en los tanques es de 1 200 $m^3$ en un área de 3 690 $m^2$. El promedio del índice de conversión hasta tamaño de mercado es 1.2 kg pienso/kg de pescado. Así pues, al criar 1 Tm de bagre africano, se convierten en biomasa de peces 24 kg de nitrógeno (N) y 3.9 kg de fósforo (P), y 52 kg de N y 9.8 kg de P se descargan como vertido efluente. Esta agua se canaliza a un lago de herradura causando eutrofización y deterioro del ecosistema natural. Además, según la reciente legislación húngara sobre medio ambiente, los vertidos están gravados con una tasa sobre la base de la producción neta de nutrientes en masa, y los productores tienen la obligación de aplicar una tecnología de tratamiento sostenible.

### 6.2.2. Mecanismo de tratamiento de los humedales

En los ecosistemas de los humedales, el contenido de contaminantes se ve disminuido por los procesos naturales. Los humedales construidos artificialmente son tecnologías sostenibles porque:

- Son eficaces en la eliminación de contaminantes.
- Son necesarias mínimas cantidades de energía fósil y productos químicos.
- Los gastos de construcción, operación y mantenimiento son considerablemente más bajos que otros sistemas de tratamiento convencionales.
- Se adaptan bien al entorno natural y aportan valor estético al paisaje, con mayor aceptación por parte de la sociedad.
- La creación de hábitats de humedales contribuye a la preservación de especies raras y al mantenimiento de la diversidad biológica.

Combinando diferentes tipos de humedales (balsas de estabilización, estanques de peces y macrófitas) se puede mejorar la eficiencia en la eliminación de nutrientes y además, integrando especies con valor, los nutrientes se transforman en subproductos comercializables. En la aplicación de humedales de inundación (capa superficial de agua en circuito abierto con flujo constante) es esencial considerar los siguientes factores:

- Demandan mucho terreno;
- Las condiciones climáticas influyen en la eficiencia del tratamiento.

### 6.2.3. Parámetros de planificación

#### Características del efluente

El efluente de agua de la piscifactoría de bagre africano se caracteriza por un alto contenido de sólidos disueltos totales en el agua geotérmica usada y por la alta demanda química de oxígeno (DQO). El nitrógeno total se compone de aproximadamente 60% de amonio total (TAN)[16] y 40% de nitrógeno orgánico; otras formas de nitrógeno se encuentran en cantidades insignificantes. El fósforo total contiene casi el 50% de ortofosfato ($PO_4^{3-}$) y los sólidos suspendidos volátiles representan el 90% del total de sólidos suspendidos. Sobre la base de las concentraciones medias, la producción anual total de nitrógeno equivale a 13 Tm, el fósforo ascendió a 1.3 Tm, y 87 Tm de DQO por año (Tabla 9)

[16] TAN = Total Ammonium Nitrogen. Corresponde al total de ambas formas, ionizada ( $NH_4^+$ ) y no ionizada ($NH_3$)

| Parámetros | $C_{Efluente}$ | STD | Vertido |
|---|---|---|---|
| | mg/l | | Kg/día |
| Sólidos disueltos totales | 714 | 62.5 | 857 |
| Demanda química de oxígeno ( DQO) | 200 | 89.0 | 239 |
| Amonio –N ( TAN) | 18.7 | 5.84 | 22.4 |
| Nitrógeno orgánico | 11.6 | 11.8 | 13.9 |
| Total N | 29.7 | 11.4 | 35.6 |
| Ortofosfato P | 1.37 | 1.07 | 1.64 |
| Total P | 2.90 | 0.92 | 3.48 |
| Sólidos suspendidos volátiles | 114 | 57.6 | 137 |

*Tabla 9: Valores medios de concentración en el efluente y el cálculo de los parámetros de vertido diario (n = 38) (STD: desviación estándar)*

## Retención de nutrientes

Basándose en los datos del experimento realizado en 2008, en el que se comprobó que el vertido es dependiente de la temperatura, se calculó la capacidad de retención para intervalos de 5ºC. La eliminación de nitrógeno mostró la sensibilidad más alta, y la eliminación de DQO también mejoró cuando se aumenta la temperatura del agua. La retención de fósforo (P) y la eliminación de sólidos suspendidos volátiles (SSV) fueron más eficientes sólo en el rango de temperatura más alta (Tabla 10). Durante la planificación del sistema, se debe considerar la menor eficacia de eliminación y se recomienda que el dimensionamiento de la superficie de los diferentes tipos de humedales se haga en unidades paralelas, que pueden estar conectadas o separadas en función de la necesidad.

| Intervalo de temperatura del agua | Eliminación N | Eliminación P | Eliminación SSV | Eliminación DQO |
|---|---|---|---|---|
| | kg/ha/día | | | |
| 10-15 ºC | 2.96 | 0.36 | 19.48 | 18.99 |
| 15-20 ºC | 5.71 | 0.37 | 18.68 | 30.92 |
| 20-25 ºC | 7.41 | 0.75 | 37.66 | 44.46 |

*Tabla 10: Eliminación específica de los sistemas de humedal a diferentes intervalos de temperatura*

La posibilidad de añadir agua de refresco durante la operación, especialmente en el caso de la balsa de estabilización y estanque de peces, es un principio importante del proceso de tratamiento. Los canales de suministro y evacuación del sistema tienen que ser planificados y construidos pensando en la independencia del vaciado y llenado cuando sea necesario.

## Composición de los lotes de peces

Se eligió el régimen de policrianza de carpa para los estanques de peces porque pueden reutilizar directamente una determinada cantidad de nutrientes e indirectamente más a través de la cadena trófica. La carpa común (*Cyprinus carpio*), como animal bentófago (que se alimenta en el fondo), agita el sedimento facilitando que los nutrientes y la materia orgánica se distribuyan en la columna de agua incrementando en consecuencia la producción primaria y el alimento disponible para los filtradores. La carpa plateada (*Hypophthalmichthys molitrix*) tolera mayores densidades y, como especie planctívora (consume fitoplancton y zooplancton en grandes cantidades), también puede filtrar los restos de pienso presentes en el efluente. En los estanques eutróficos e hipertróficos[17], la lenteja de agua (*Lemna spp*.) crece espontáneamente y puede llegar a cubrir toda la superficie interfiriendo con la producción primaria de algas. Por ello, la carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idella*) que se alimenta de macrófitas controla el crecimiento en los estanques. Además, los juveniles de carpa común pueden prevenir el crecimiento excesivo del zooplancton.

En el desarrollo de los experimentos fueron probadas diversas densidades de población. Los mejores rendimientos netos para la carpa común y carpa plateada fueron encontrados a una densidad de población de 1 000 kg/ha y una composición de población del 35% (común): 50% (plateada): 15% (herbívora). El peso inicial de los animales (es decir, su edad en el momento de establecer los lotes) también influye en los rendimientos. Los animales de 1 año de edad crecen más rápidamente que los de mayor tamaño aunque las carpas de 2 años de edad resuspenden el sedimento con mayor eficacia[18].

[17] Con exceso de nutrientes
[18] En relación a la efectividad para remoción del sedimento, importa más el tamaño (>500 gr) que la “edad” del animal. En nuestras condiciones climáticas se pueden alcanzar 300 g sin pasar invernada en un año, con 2 años rondan el kg y con tres años los 2 kg aproximadamente.

### 6.2.4. Factores críticos de manejo

**Condiciones climáticas:** los sistemas naturales de tratamiento de agua funcionan adecuadamente de abril a octubre en Europa Central y Oriental, es decir a temperaturas de 15-30 ºC. Sin embargo, la producción de peces en la piscifactoría opera continuamente (durante todo el año) porque se abastece de agua geotérmica. En invierno, es característico que la eliminación de los nutrientes y especialmente nitrógeno se reduzca en los humedales. Por ello, es necesario reducir la cantidad de vertido a temperaturas más bajas y emplear mayor cantidad de superficie. La filtración mecánica también podría disminuir la carga de nutrientes de los compuestos disueltos.

**Las poblaciones de peces:** En los ecosistemas de estanque se requieren medidas adecuadas de gestión para mantener los organismos que en él se desarrollan. Los peces son sensibles a bajos niveles de oxígeno (<1.5-2.0 mg/l) y al aumento de la concentración de amonio no ionizado (> 0.3-0.4 mg/l). Cuando la radiación solar es obstaculizada permanentemente por el clima (días nublados o lluvia), el $O_2$ producido por fotosíntesis se reduce y en consecuencia el $O_2$ disuelto en el agua disminuye. El incremento de los niveles de amonio puede ser causado por la sobrecarga de los estanques, especialmente a bajas temperaturas cuando se suprime la actividad de las bacterias nitrificantes. Cuando los niveles de $O_2$ disuelto se encuentran por debajo de los óptimos, es necesario suplir el déficit por aireación o con agua de refresco que además contribuye a reducir los niveles de amonio no ionizado. El control regular (diario) de las concentraciones de $O_2$ y amoníaco y la consideración del factor clima pueden impedir el peligroso deterioro de la calidad del agua.

**Afloramientos planctónicos:** Cuando hay un afloramiento excesivo de algas (fitoplancton) se puede producir en los estanques un crecimiento excesivo del zooplancton que además se alimenta filtrando los sólidos en suspensión. Sin embargo, ésta importante biomasa reduce la concentración de oxígeno del agua. La reproducción desfavorable del zooplancton puede ser prevenida colocando en los lotes peces de menor edad (juveniles, que se alimentan de las fases tempranas) o por filtración. No se observaron floraciones de cianobacterias en las unidades de tratamiento.

**Lentejas de agua:** En las aguas estancadas pueden aparecer diferentes especies de lenteja de agua (*Lemna spp*.) que, en condiciones óptimas, se reproducen en abundancia. Si llegan a cubrir la superficie del estanque, dificultan el crecimiento del fitoplancton y de la actividad fotosintética en la columna de agua, lo que deriva en condiciones anaeróbicas. Puesto que los procesos aeróbicos son los preferidos en los sistemas de tratamiento, se recomienda eliminar la lenteja de agua de todas las unidades. La mejor solución para el control de la lenteja de agua en los estanques de peces es introducir carpa herbívora que se alimenta de ella, y por lo tanto, se transforma en biomasa y se mejora el rendimiento. En los estanques de macrófitas también es recomendable la extracción manual de lenteja de agua para aumentar la superficie de agua no cubierta.

**Acumulación:** Se observó moderada acumulación de lodo en la zona de entrada de los efluentes a la laguna de estabilización. La eliminación de los lodos acumulados puede ser necesaria a largo plazo (15-20 años).

### 6.2.5. Diseño del sistema de humedales propuesto

Sobre la base de los resultados obtenidos y el cálculo del vertido diario de una piscifactoría intensiva con 300 Tm/año de capacidad, se recomienda un sistema de 12 hectáreas de humedales. El tamaño y la estructura del sistema se han diseñado con el fin de garantizar la seguridad en el tratamiento durante los meses de invierno y para mejorar la calidad del agua a la salida. La construcción de los estanques en unidades paralelas puede aumentar la flexibilidad del sistema porque podría ser necesario utilizar un área mayor en invierno que en verano para cumplir con los límites de vertido (ver Figura 9).

Estudiando la participación de los diferentes tipos de humedales en la eliminación de nutrientes, la proporción recomendada para la balsa de estabilización: peces: macrófitas es la combinación 3.5:2:1. Por lo tanto, la propuesta de sistema de humedales se compone de:

- Tres balsas de estabilización de 2.2 hectáreas.
- Un estanque de peces de 3.7 hectáreas.
- Un estanque de macrófitas de 1.8 hectáreas.

En el estanque de peces, la composición recomendada para obtener mayor rendimiento con el lote de carpas en régimen de policrianza es 35%: 50%: 15% (carpa común de 2 años: carpa plateada de 1 año: carpa herbívora) a una densidad de 1 000 kg/ha y con un peso de 50-300 g/unidad. Estos lotes se pueden completar con otras especies de carpas (por ejemplo ornamentales) en una densidad de población similar.

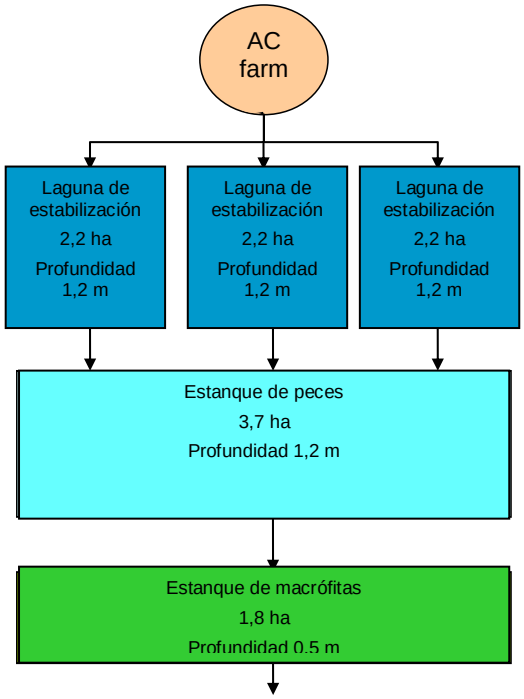



*Figura 9: Estructura del sistema de humedal propuesto para el tratamiento de agua de una granja de bagre de 300 Tm/año de capacidad*

Al comienzo del ciclo productivo, los estanques se llenan con agua del río no contaminada. El uso de lagunas de estabilización en paralelo permite gestionar el vaciado y llenado de forma alternativa. De acuerdo con nuestras previsiones, una laguna de estabilización no estará operativa durante los meses cálidos (de abril a septiembre) y el relleno de esta unidad puede comenzar antes o al mismo tiempo que el drenaje y llenado de las otras dos unidades de estabilización. Durante las operaciones de vaciado y llenado, el tratamiento de las aguas residuales puede funcionar en el estanque lleno. El estanque de peces se despesca a finales de octubre o principios de noviembre. Después de la despesca, puede continuar la entrada de agua de los estanques de estabilización. Se recomienda cosechar las macrófitas a principios de primavera, en marzo, cuando el contenido de agua de la planta es más bajo. Es razonable mantener el nivel de agua en los estanques muy reducido durante la cosecha. Se supone que el humedal propuesto puede eliminar de los efluentes de la piscifactoría en un año alrededor de 1 000-1 100 kg de fósforo, 7 000-8 000 kg de nitrógeno inorgánico, y 70 000-80 000 kg DQO (70-80 Tm).

El cálculo realizado con los valores medios obtenidos para los parámetros de calidad del agua de los experimentos, daría lugar a un ahorro de 34.543,00 € en concepto de reducción de las tasas de vertido para la piscifactoría de bagre africano. Los ingresos adicionales provienen de la producción de peces y biomasa vegetal (carrizo, espadaña) para su uso como biocarburantes. De acuerdo con nuestros cálculos, el periodo de amortización de la inversión es de 8 años mientras que la inversión neta del valor actual (tasa de descuento 5%) suma 102.175,00 € después de 15 años de operación. Otros cálculos se enumeran en la Tabla 11. En el análisis de coste beneficio se asume que la energía, coste de combustible y valor de mercado de la espadaña se incrementan con una tasa del 6% anual. La inflación de los salarios se fija en el modelo hasta el 3%, mientras que el aumento de los precios de juveniles de peces se calcula al 2% anual

| **Análisis de coste beneficio** | ***2009*** | ***2010*** | ***2011*** | ***2012*** | ***2013*** | ***2014*** | ***2015*** | ***2016*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Coste de inversión (tierras, estanques, bombas, aireadores) | *228571* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| Coste de juveniles | *0* | *4 029* | *4 109* | *4 191* | *4 275* | *4 361* | *4 448* | *4 537* |
| Coste de fuel (250 litros/año) | *89* | *268* | *284* | *301* | *319* | *338* | *358* | *380* |
| Electricidad (35,040 kWh/año) | *0* | *4 505* | *4 775* | *5 062* | *5 366* | *5 688* | *6 029* | *6 391* |
| Mano de obra (2,800 horas/ año) | *1 429* | *7 500* | *7 725* | *7 957* | *8 195* | *8 441* | *8 695* | *8 955* |
| Retorno de la biomasa (2.9 €/GJ) | *0* | *3 082* | *3 267* | *3 463* | *3 671* | *3 891* | *4 125* | *4 372* |
| Retorno de la producción de peces | *0* | *11 986* | *12 225* | *12 470* | *12 719* | *12 974* | *13 233* | *13 498* |
| Ahorro de canon de vertido | *0* | *34 543* | *34 543* | *34 543* | *34 543* | *34 543* | *34 543* | *34 543* |
| Beneficio | *-230 089* | *33 309* | *33 142* | *32 965* | *32 778* | *32 580* | *32 371* | *32 150* |
| Tasa de descuento (r=5%) | *-230 089* | *31 723* | *30 061* | *28 476* | *26 966* | *25 527* | *24 156* | *22 848* |
| Valor neto | *-230 089* | *-198 366* | *-168 306* | *-139 829* | *-112 863* | *-87 336* | *-63 180* | *-40 332* |

| Año | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Coste de inversión (tierras, estanques, bombas, aireadores) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Coste de juveniles | 4 628 | 4 720 | 4 815 | 4 911 | 5 009 | 5 109 | 5 211 | 5 316 |
| Coste de fuel (250 litros/año) | 403 | 427 | 453 | 480 | 508 | 539 | 571 | 606 |
| Electricidad (35,040 kWh/año) | 6 774 | 7 181 | 7 611 | 8 068 | 8 552 | 9 065 | 9 609 | 10 186 |
| Mano de obra (2,800 horas/ año) | 9 224 | 9 501 | 9 786 | 10 079 | 10 382 | 10 693 | 11 014 | 11 344 |
| Retorno de la biomasa (2.9 €/GJ) | 4 634 | 4 912 | 5 207 | 5 520 | 5 851 | 6 202 | 6 574 | 6 968 |
| Retorno de la producción de peces | 13 768 | 14 043 | 14 324 | 14 611 | 14 903 | 15 201 | 15 505 | 15 815 |
| Ahorro de canon de vertido | 34 543 | 34 543 | 34 543 | 34 543 | 34 543 | 34 543 | 34 543 | 34 543 |
| Beneficio | 31 917 | 31 670 | 31 410 | 31 135 | 30 845 | 30 539 | 30 216 | 29 875 |
| Tasa de descuento (r=5%) | 21 602 | 20 415 | 19 283 | 18 204 | 17 176 | 16 195 | 15 261 | 14 370 |
| Valor neto | -18 729 | 1 686 | 20 969 | 39 173 | 56 348 | 72 544 | 87 805 | 102 175 |

*Tabla 11: Análisis de coste beneficio del sistema de humedales propuesto de 12 ha CBA (en miles de HUF, 1 EURO=275 HUF)*

## *6.3. Combinación de la acuicultura intensiva y extensiva para el uso sostenible del agua y los nutrientes (módulo intensivo-extensivo)*

### 6.3.1. Introducción – Descripción general de la innovación.

En el desarrollo de las tecnologías de producción de peces respetuosas con el medioambiente, parece que una solución obvia radica en integrar la acuicultura intensiva en los sistemas de estanques. El principio de este método consiste en tratar los efluentes de agua enriquecida con nutrientes (orgánicos e inorgánicos) de la acuicultura intensiva de peces en un estanque extensivo. En él, una parte de los nutrientes se utiliza a través de diversos procesos de producción biológica y la otra parte se fija en los sedimentos del estanque. El agua tratada o purificada se recicla a la producción intensiva. La combinación de ambos sistemas de producción contribuye a la sostenibilidad ecológica y a la producción de peces comercializables.

La acuicultura basada en el perifiton es una tecnología tradicional que aumenta la producción de alimentos naturales en el estanque y por tanto incrementa la producción de peces. La mejor utilización de los nutrientes en los sistemas acuícolas tiene por objeto disminuir el vertido en las aguas naturales. La producción es mayor en los estanques que disponen de sustratos para el crecimiento del perifiton que aquellos que carecen de sustrato. Las nuevas producciones (primaria y secundaria bentónica), fomentadas por la presencia de sustrato artificial, soportan una nueva cadena trófica, parte de la cual termina como biomasa en los peces. El perifiton consumido mecánicamente por el ramoneo en una capa bidimensional es más eficiente que la filtración de las algas plantónicas en un medio tridimensional. Si las algas en el estanque pueden crecer en sustratos, más especies de peces serán capaces de aprovecharlas, obteniendo mayor eficiencia en la utilización de la producción primaria. La aplicación del perifiton en un estanque extensivo construido para tratamiento de aguas residuales también puede mejorar la capacidad de depuración de los propios estanques.

El objetivo general del estudio de caso "sistema intensivo-extensivo" (IES)[19] es ayudar a los productores tradicionales de carpa a utilizar el agua de manera más eficiente mediante la producción de especies de valor en su reservorio o estanques usados de forma extensiva para diversificar su producción e incrementar el rendimiento económico.

El principio de la investigación sobre el módulo IES se basa en el vínculo de los métodos de producción intensivo y extensivo con las diferentes especies que ocupan nichos distintos en la cadena trófica en un único sistema integrado, de modo que se puedan reciclar los nutrientes vertidos. Esto redunda en una mayor eficiencia de utilización de nutrientes y la reducción de los vertidos al medio, al mismo tiempo que se aumenta la producción por unidad de agua.

El propósito de la tarea fue desarrollar un nuevo método para la producción de peces depredadores en el estanque aumentando la utilización de nutrientes. Los objetivos innovadores del módulo IES fueron:

- Aumentar la capacidad de producción.

[19] IES = Intensive-Extensive System

- Diversificar las especies cultivadas.
- Reciclar los nutrientes en el sistema de producción.

Con estos objetivos el trabajo de investigación se centró en:

- Evaluar el potencial de reutilización de los nutrientes en el sistema combinado.
- Investigar los diferentes elementos biotecnológicos (por ejemplo, aplicación del perifiton, crianza de almejas de río) sobre la producción adicional de peces y la calidad del agua.
- Evaluar el balance de nutrientes del sistema experimental.

### 6.3.2. Principios del módulo

Los experimentos de módulo IES se llevaron a cabo en tres estanques (área 310 $m^2$, y una profundidad de 1 m cada uno). Estos estanques se utilizaron como unidades extensivas en las cuales se colocó una jaula (10 $m^3$ de volumen) como unidad intensiva en cada estanque (Figura 10). Los estanques se llenaron con agua del río una semana antes de establecer los lotes de peces. El nivel de agua se mantuvo suministrando agua del río con regularidad. Para proporcionar suficiente concentración de oxígeno y mantener la circulación del agua entre las unidades de intensivo y extensivo, se mantuvo funcionando un aireador de palas (0.5 kW).

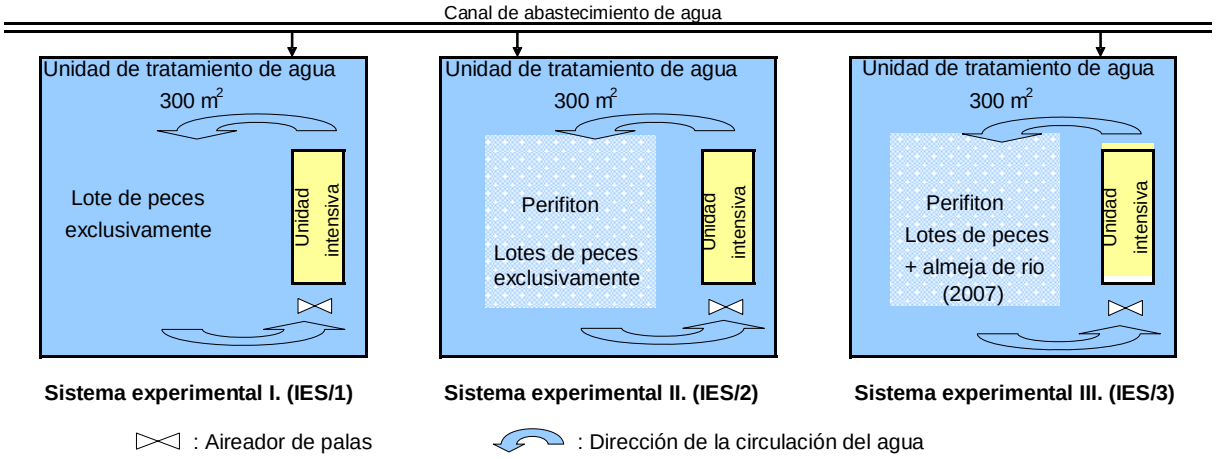



*Figura 10 : Esquema del sistema experimental*

Todos los estanques fueron sometidos al mismo régimen de alimentación y almacenamiento de peces (lotes). Se suministraron piensos granulados diariamente (45% de proteína bruta, razón C:N 6) a las jaulas intensivas utilizando un alimentador automático, pero no se suministró alimentación alguna al resto del estanque. El diseño de los estanques extensivos fue la única diferencia entre ambos sistemas para analizar el efecto del perifiton y almacenamiento de moluscos en la calidad del agua, la producción de peces y la utilización de nutrientes. El promedio de vertido derivado de la alimentación fue de 0.5 y 1.2 g $N/m^2$/día en 2007 y 2008 respectivamente. La única fuente de nutrientes del sistema fue la aportación de alimento a los peces de la unidad intensiva. La superficie adicional para el desarrollo del perifiton fue igual a 0, 100 y 200% (es decir, 0, 1 y 2 $m^2$ de superficie de perifiton/$m^2$ estanque) de la superficie del estanque.

| Año | Nitrógeno | | Fósforo | | Carbón orgánico | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *Media* | *Máximo* | *Media* | *Máximo* | *Media* | *Máximo* |
| **2007** | 0.51 | 0.72 | 0.08 | 0.12 | 3.1 | 4.4 |
| **2008** | 1.2 | 1.8 | 0.19 | 0.28 | 7.3 | 10.6 |

*Tabla 12: Vertido diario de alimentación en el IES*

| | IES/1 | IES/2 | IES/3 |
|---|---|---|---|
| **Media de vertido diario 0.5 g $N/m^2$/día (2007)** | Sin perifiton | PA 1 $m^2/m^2$ | PA 1 $m^2/m^2$ + lotes de almeja de río |
| **Media de vertido diario 1.2 g $N/m^2$/día (2008)** | Sin perifiton | PA 1 $m^2/m^2$ | PA 2 $m^2/m^2$ |

PA: Área de perifiton

*Tabla 13: Configuración experimental del módulo IES*

### Manejo del sistema en 2007

En las unidades intensivas se criaron bagres europeos (*Silurus glanis* L.) dispuestos en lotes de 100 kg (biomasa inicial, densidad 10 Kg/m$^3$) y alimentados con pienso granulado. En las unidades extensivas se dispusieron animales de carpa común (*Cyprinus carpio* L.) y tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus* L.) a una densidad inicial de 60 kg (tasa de estabulación 1:1) que se mantuvieron sin ningún tipo de alimentación artificial. La almeja de río (*Anodonta cygnea* L.) se dispuso en la tercera unidad a una densidad de 1 ind/m$^2$ (tamaño 109 ± 69 g /ind). Los moluscos fueron colocados en bolsas de red de plástico suspendidas 10 cm por encima del fondo del estanque. Se dispusieron 30 bolsas en la tercera unidad del IES (IES/3), cada una con 10 individuos. En dos tratamientos (IES/2 y IES/3) la productividad de la unidad extensiva fue reforzada por perifiton desarrollado en sustratos artificiales y sin sustrato en la configuración control (IES/1). Se utilizaron ramas de sauce como sustrato para el crecimiento de perifiton que añade una superficie efectiva de unos 300 m$^2$ por cada estanque, aproximadamente la superficie de todo el estanque. Sin embargo, la superficie de las ramas ha ido disminuyendo continuamente durante las operaciones de manejo y al final de la temporada se estimó que equivalía a sólo 70 m$^{2.}$ El sistema experimental estuvo operativo durante 22 semanas, del 10 de mayo al 11 de octubre de 2007.

### Manejo del sistema en 2008

En el segundo año, la densidad de población inicial se duplicó en las jaulas intensivas (20 kg/m$^3$) con lo que la media de vertido diario aumentó a 1.2 gN/m$^2$/día. Para operar con seguridad, la unidad intensiva se loteó con bagre africano (*Clarias gariepinus* L.) por tratarse de una especie más robusta y resistente que su homóloga europea. La configuración experimental del IES/3 se cambió en 2008 eliminando los moluscos e incrementando la superficie de sustrato para perifiton a 600 m$^2$ (2m$^2$ de superficie de perifiton/m$^2$ estanque).La razón para eliminar los moluscos se debe a la elevada mortalidad observada en el primer año (en consecuencia, la acumulación de nutrientes en la biomasa de los moluscos no fue tan alta como se esperaba). Además, el problema parasitario que se produjo en la unidad experimental durante el primer año causó también una alta mortalidad en los peces de la unidad intensiva. Para mantener un área constante para el crecimiento del perifiton, durante el segundo año se utilizó sustrato artificial plástico en lugar de las ramas de sauce. Las operaciones de manejo duraron 14 semanas desde el 21 de mayo al 10 septiembre de 2008.

| Año | Unidad | IES/1 | IES/2 | IES/3 |
|---|---|---|---|---|
| 2007 | Unidad intensiva | 3,173 | 5,747 | 2,747 |
| | Unidad extensiva | 3,619 | 2,078 | 4,044 |
| | **Sistema global** | **6,792** | **7,825** | **7,083** |
| 2008 | Unidad intensiva | 13,221 | 12,788 | 12,811 |
| | Unidad extensiva | 2,789 | 5,048 | 2,718 |
| | **Sistema global** | **16,010** | **17,837** | **15,529** |

*Tabla 14: Producción de peces neta en el módulo (kg/ha)*

En ambos años, el rendimiento neto de peces de todo el sistema (unidad de intensivo y extensivo juntas) fue mayor en los estanques, donde el área perifiton fue del 100% de la superficie del estanque.

## 6.3.3. Evaluación de los indicadores de Sostenibilidad seleccionados en SustainAqua

### Eficiencia energética

La energía eléctrica se utiliza únicamente para mezclar y airear el agua de cada estanque experimental por medio de aireadores de palas (0.5 kW de potencia) durante las operaciones de manejo. Del consumo total de energía, la mayor parte corresponde a la eléctrica, el combustible representó apenas el 2-3%. El consumo diario de energía fue de 12.2 y 12.4 kWh, en 2007 y 2008 respectivamente. Los resultados se resumen en la Tabla 15. El consumo específico de energía fue mucho mayor en 2007 (primer año de investigación) debido a la baja producción de peces (atribuida a la mortalidad por parasitosis). La eficiencia energética se ha mejorado por la producción adicional de peces en la unidad extensiva con 35% y 21% en 2007 y 2008 respectivamente.

| | | IES/1 | IES/2 | IES/3 |
|---|---|---|---|---|
| 2007 | Energía empleada | 1857 | 1857 | 1857 |
| | EC unidad intensiva (kWh/kg) | 18.8 | 10.4 | 21.6 |
| | EC sistema global (kWh/kg) | 8.76 | 7.61 | 8.40 |
| 2008 | Energía empleada | 1384 | 1384 | 1384 |
| | EC unidad intensiva(kWh/kg) | 3.35 | 3.47 | 3.46 |
| | EC sistema global (kWh/kg) | 2.76 | 2.48 | 2.85 |

EC: Consumo de energía por kg de pescado producido (kWh/kg producción)

*Tabla 15 : Consumo energético en el módulo IES (kWh)*

## Aguas de abastecimiento y efluentes

Los estanques se llenaron con agua dulce del cercano río Körös. La evaporación y la filtración se compensaron con regularidad en los estanques extensivos durante el período experimental. No se liberaron efluentes al medio ambiente durante el período operativo, el agua se drenó únicamente en el momento de la despesca.

| | | IES/1 | IES/2 | IES/3 |
|---|---|---|---|---|
| 2007 | Entrada de agua | 735 | 518 | 848 |
| | Salida de agua | 248 | 242 | 225 |
| | Consumo ($m^3$/kg pez) | 3.5 | 2.1 | 3.8 |
| 2008 | Entrada de agua | 956 | 890 | 850 |
| | Salida de agua | 245 | 256 | 260 |
| | Consumo ($m^3$/kg pez) | 1.9 | 1.6 | 1.8 |

WC: Consumo de agua por kg pescado producido (entrada/kg pez)

*Tabla 16 : Balance hídrico del modulo IES ($m^3$)*

## Utilización de nutrientes

El aporte total de nutrientes al sistema (lotes de peces, agua y pienso) y las salidas (despesca y agua de drenaje) se resumen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 17. La principal fuente de nutrientes al sistema fue la alimentación de los peces en la unidad intensiva que representó el 80% del aporte total de nitrógeno, 75% del fósforo y el 85% de carbono. La retención de nutrientes fue de 6 300 kg/ha de carbono orgánico, 1 000 kg/ha de nitrógeno y 180 kg/ha de fósforo en 2008. El vertido de nutrientes fue mayor que en el año anterior. Los porcentajes de nutrientes retenidos en relación al total aportado representaron en media el 65 y el 57% del nitrógeno, el 66 y el 58% del fósforo y el 75 y el 64% del carbono orgánico en 2007 y 2008 respectivamente. La combinación de sistemas es capaz de procesar 1.400 kg/ha del nitrógeno con origen en la alimentación de los peces.

| | | IES/1 | | | IES/2 | | | IES/3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *N* | *P* | *C* | *N* | *P* | *C* | *N* | *P* | *C* |
| 2007 | Entrada (kg/ha) | 930 | 160 | 5400 | 930 | 150 | 5400 | 950 | 160 | 5500 |
| | Salida (kg/ha) | 330 | 55 | 1200 | 350 | 59 | 1600 | 310 | 55 | 1300 |
| | Retención (%) | 65 | 65 | 78 | 63 | 67 | 72 | 67 | 65 | 76 |
| 2008 | Entrada (kg/ha) | 1790 | 310 | 9700 | 1800 | 320 | 9700 | 1800 | 310 | 9700 |
| | Salida (kg/ha) | 760 | 130 | 3100 | 840 | 140 | 3900 | 720 | 130 | 3200 |
| | Retención (%) | 58 | 60 | 67 | 53 | 55 | 59 | 60 | 60 | 67 |

*Tabla 17: Balance parcial de nutrientes en el modulo IES*

La utilización de nutrientes en la producción de peces en el IES (expresada en porcentaje de nutrientes introducido por la alimentación en la unidad intensiva) se presenta en la Tabla 18. La combinación de sistemas mejoró la utilización de proteínas en un 26%; con el perifiton esta relación se incrementó hasta el 40% en 2008. La utilización total de nutrientes por los peces fue más alta cuando el área de perifiton correspondió al 100% de la superficie del estanque en los dos años de experimentación y se redujo en el caso de doblar el área destinada al crecimiento del perifiton. Esto indica que el ratio de 100% perifiton era suficiente para utilizar los metabolitos del vertido de alimentación de 1.8 g N/$m^2$/día. El índice de conversión promedio (FCR) fue de 3.3 y 1.6 en la unidad intensiva en 2007 y 2008. Con la producción combinada en ambos sistemas, el FCR se ha mejorado en un 51% y 44% (a 1.6 y 0.9), debido a la producción adicional de peces de la unidad extensiva.

| | | PA 0% | | | PA 100% | | | PA 100%+SF (2007), PA 200% (2008) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *N* | *P* | *C* | *N* | *P* | *C* | *N* | *P* | *C* |
| 2007 | Intensivo | 8.5 | 7.8 | 5.6 | 17 | 17 | 11 | 6.4 | 5.6 | 4.1 |
| | Extensivo | 11 | 13 | 7.8 | 6.5 | 6.9 | 4.2 | 13 | 17 | 9.2 |
| | **Total** | **20** | **21** | **13** | **24** | **24** | **16** | **19** | **24** | **13** |
| 2008 | Intensivo | 23 | 23 | 16 | 22 | 22 | 15 | 22 | 22 | 15 |
| | Extensivo | 6.1 | 3.3 | 4.4 | 10 | 8.9 | 7.3 | 5.9 | 3.3 | 4.2 |
| | **Total** | **29** | **26** | **20** | **33** | **31** | **22** | **28** | **25** | **19** |

PA: Área de perifiton SF: Almeja de río

*Tabla 18 : Acumulación de nutrientes en la biomasa de peces expresado como porcentaje de entrada de alimento (%)*

De los estanques experimentales fueron vertidos al medio durante las operaciones de manejo entre 2.6-8.3 g de nitrógeno, 0.20-0.53 g de fósforo y 9-46 g de carbono orgánico por kg de biomasa producida. No hubo efecto de la aplicación del perifiton y alimentación en el contenido de nutrientes en el efluente. Sólo la

concentración de nitrógeno fue menor en el caso de la relación 200% de superficie de perifiton (IES/3 en 2008).

| | IES/1 | | | IES/2 | | | IES/3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *N* | *P* | *C* | *N* | *P* | *C* | *N* | *P* | *C* |
| 2007 | 8.3 | 0.48 | 9.2 | 5.1 | 0.48 | 30 | 5.1 | 0.32 | 25 |
| 2008 | 4.2 | 0.20 | 16 | 5.8 | 0.53 | 46 | 2.6 | 0.27 | 20 |

*Tabla 19: Descarga de nutrientes de la producción de peces en el módulo IES (g/kg producción neta)*

En el funcionamiento de los sistemas de tratamiento de agua, además de la absorción de nutrientes por parte de las algas y la descomposición bacteriana, el consumo de los organismos heterótrofos y los procesos de desnitrificación juegan un papel importante. Por lo tanto, el control de los niveles de oxígeno para asegurar condiciones aeróbicas mediante aireación artificial es muy importante para la eficiencia en la eliminación de nutrientes durante el tratamiento.

La combinación experimental a escala piloto de la unidad intensiva de producción de peces con el estanque extensivo ha probado la aplicabilidad de estos sistemas. El sistema combinado podría procesar una parte significativa de los excedentes de nutrientes originados en la unidad intensiva. El máximo de nutrientes reutilizados por la producción extensiva en el estanque representó el 13% del nitrógeno, el 17% del fósforo y el 9% del carbono orgánico.

La eficiencia de la unidad extensiva se ha mejorado con el desarrollo del perifiton en sustratos artificiales porque puede proporcionar alimento para los peces. El contenido de materia seca de perifiton desarrollado en diferentes capas fue significativamente mayor en las muestras que fueron recogidas en la parte superior que en aquellas tomadas en la parte inferior[20]. Cuando se compararon los valores medios anuales de materia seca de perifiton, no se encontraron diferencias significativas entre los dos estanques. Sin embargo, las altas cantidades de perifiton consumidas por los peces tuvieron como resultado un incremento de la biomasa de peces producida en la unidad extensiva. Siguiendo la evolución de los cambios cuantitativos y cualitativos en el perifiton tenemos un conocimiento más detallado sobre el funcionamiento del sistema, el ciclo de nutrientes y flujo de energía en el ecosistema y las posibilidades de aumentar su eficiencia que se pueden aplicar a las operaciones de manejo y al desarrollo de la tecnología.

Investigaciones sobre el balance de nutrientes del sistema han demostrado que el tamaño adecuado de la unidad extensiva podría tratar los efluentes de la piscicultura intensiva de manera eficiente y hacer posible la reutilización de agua para la producción intensiva de peces.

### Productividad de la mano de obra y sostenibilidad económica

Para el manejo del sistema y la producción de peces se emplearon 31.3 y 37.3 horas de trabajo en cada unidad experimental. Por lo tanto, el consumo medio de mano de obra fue 0.13-0.15 y 0.07-0.08 horas/kg de pescado neto producido en 2007 y 2008 respectivamente.

Como en los dos años de funcionamiento se ha probado que el mejor rendimiento se obtiene en el subsistema IES/2, se puede afirmar que el empleo de 1 $m^2$ de superficie artificial de perifiton por cada $m^2$ de superficie del estanque conduce a la mayor viabilidad económica. Los resultados muestran que la crianza de pez gato africano (2008) es más viable que la de bagre europeo (2007).

## 6.3.4. Factores de éxito y limitaciones

Los resultados demostraron que la combinación de ambos sistemas de producción (intensivo-extensivo) es un instrumento eficaz para reducir la contaminación ambiental de la piscicultura intensiva y para aumentar la producción de peces en extensivo como co-producto.

La eficiencia de la unidad extensiva puede ser mejorada mediante el desarrollo de perifiton en sustratos artificiales. La producción combinada de peces mejoró la utilización de proteínas en un 26%, con la aplicación de perifiton, esta relación puede ser incrementada hasta el 40%. Este sustrato fija comunidades que proporcionan una nueva red alimentaria, y una parte se recupera como biomasa de peces. La calidad del agua era adecuada para el crecimiento de los peces.

En general, la producción de peces es aproximadamente 1 Tm/ha en los estanques tradicionales, pero en sistemas combinados se puede aumentar hasta 20 Tm/ha. Sin embargo, la descarga de nutrientes en los estanques tradicionales de peces es muy pequeña debido a la mejora de la eficiencia de utilización.

## 6.3.5. Beneficios de la aplicación

[20] Esto es normal probablemente por dos razones. Primero porque en la capa superior hay mayor penetración de la luz y, en consecuencia, mayor abundancia de algas. Segundo porque la carpa y la tilapia ramonean principalmente en el fondo.

La combinación de la acuicultura intensiva y extensiva aprovecha las ventajas de ambos sistemas (crianza tradicional de carpas en estanques extensivos y los sistemas intensivos). Las especies predadoras de mayor valor en el mercado se pueden producir en las unidades intensivas del sistema y su integración en un estanque extensivo (como unidad de tratamiento) tiene como resultado un descenso en la descarga de nutrientes al ambiente y un incremento en la recuperación de nutrientes como biomasa de pescado. La crianza intensiva se puede realizar en jaulas o en tanques flotantes que se ubican en el estanque extensivo.

De esta forma, los peces carnívoros pueden ser gestionados en condiciones controladas y alimentados con dietas artificiales. Los piensos no consumidos y los residuos metabólicos se utilizan en la parte extensiva para aumentar la producción de peces. Cuando se compara la eficiencia de utilización (alrededor de 20-25% en la mayoría de los sistemas de crianza intensiva), ésta podría incrementarse hasta un máximo del 30-35% en los sistemas integrados, resultando menores las descargas de nutrientes a los cursos de agua. La aplicación del sistema combinado de producción de peces intensivo-extensivo puede contribuir al mejor uso de los recursos hídricos y a la sostenibilidad de la acuicultura. Los resultados del estudio de caso han probado que ésta combinación de sistemas incrementa la eficiencia de utilización de los nutrientes y la producción de peces. Los indicadores de sostenibilidad más importantes se han resumido en la Tabla 20.

| | IES/1 | IES/2 | IES/3 |
|---|---|---|---|
| ***Consumo de energía (kWh/kg)*** | | | |
| Unidad intensiva | 3.4 | 3.5 | 3.5 |
| **Sistema global** | **2.8** | **2.5** | **2.9** |
| ***Consumo de agua ($m^3$/kg)*** | | | |
| Entrada de agua | 1.8 | 1.6 | 1.6 |
| Descarga de efluente | 0.5 | 0.4 | 0.5 |
| ***Vertido de nutrientes por Kg producido (g/kg)*** | | | |
| **N** | 4.2 | 5.8 | 2.6 |
| **P** | 0.20 | 0.53 | 0.27 |
| **C** | 16 | 46 | 20 |
| ***Reutilización de nutrientes por la producción adicional de peces (% de la entada)*** | | | |
| **N** | 6.0% | 10% | 5.8% |
| **P** | 3.2% | 8.6% | 3.2% |
| **C** | 4.3% | 7.2% | 4.1% |

*Tabla 20: Indicadores de sostenibilidad en el módulo IES en 2008*

## *6.4. Del estudio de caso a la explotación: Diseño de un sistema combinado teórico*

### 6.4.1. Tecnología general

La tecnología aplicada del IES es muy simple, una unidad compartimentalizada de producción intensiva se coloca en el interior de un estanque extensivo tradicional. Jaulas o tanques flotantes pueden utilizarse como unidad de explotación intensiva con una estrecha interacción con el estanque de peces que, de esta forma, opera como un filtro biológico capaz de tratar los residuos.

La producción de peces en el estanque extensivo se puede mejorar proporcionando una superficie adicional para aumentar la producción de perifiton. Basándose en estos resultados la producción adicional de peces en la unidad extensiva fue mayor cuando la superficie de perifiton equivale al 100% del área del estanque. La clave de la gestión segura del sistema es el equilibrio entre los vertidos de nutrientes de la unidad intensiva y la capacidad de tratamiento del estanque extensivo. El tamaño apropiado de éste puede mantener una adecuada calidad de agua para la producción de peces y minimizar la descarga de vertidos. Los aireadores de pala contribuyen facilitando la circulación de agua entre ambas unidades manteniendo el óptimo nivel de oxígeno. El estanque funciona como un sistema cerrado, no hay agua de descarga de efluentes al medio ambiente durante el período de crianza y el agua se drena desde los estanques de peces sólo en la despesca. Las pérdidas por evaporación y filtración deben ser compensadas regularmente. La evaporación es mayor en un estanque continuamente aireado que en el sistema tradicional; la tasa de compensación podría llegar al 150% del volumen total al año.

| **Ventajas** | **Inconvenientes** |
|---|---|
| Tecnología simple de baja inversión y costes operacionales | Las condiciones de producción son poco controlables (variaciones de temperatura) |
| Mejora la eficiencia de utilización de nutrientes y el beneficio adicional deriva de la producción adicional | La calidad del agua se afecta primariamente por los procesos biológicos naturales |
| Bajos niveles de vertido de nutrientes al medio | Periodo de crecimiento limitado (de abril a octubre) |
| Baja demanda energética para la producción de peces | El almacenamiento en invierno debe ser resuelto |
| Escaso consumo de agua comparado con otras prácticas de estanques | |
| La producción concentrada reduce las pérdidas por predadores | |

*Tabla 21: Pros y contras de la aplicación del módulo IES*

### 6.4.2. Parámetros de planificación

El **aporte máximo de alimento** al sistema es 1.8 gN/m$^2$/día (que corresponde a un pienso para peces con 11.2 g de proteína bruta o 2 kg del lote de peces de la unidad intensiva).

La **composición del lote de peces**: En el estanque extensivo se aconseja producir en régimen de policrianza basado en la carpa común como especie omnívora bentófaga junto con filtradores (tilapia, carpa plateada). En el caso de optar por la monocrianza de carpa, es conveniente mezclar individuos de varias edades (uno y dos años).

El **rendimiento neto** de la producción de peces es aproximadamente 18 Tm/ha si se estimula la producción de perifiton (13 Tm/ha de la unidad intensiva y 5 Tm/ha de la unidad extensiva) y 16 Tm/ha de superficie, sin proporcionar soporte para el perifiton (13 y 3 Tm/ha de la producción intensiva y extensiva respectivamente). El área adicional recomendada para el desarrollo del perifiton equivale a cerca de 100% de la superficie del estanque.

Los resultados demostraron que la eficiencia de la unidad extensiva puede ser mejorada con el desarrollo de perifiton en sustratos artificiales. El sistema combinado de producción de peces ha tenido como resultado un aumento del 25% en la utilización de las proteínas en relación a la unidad intensiva, con la aplicación del perifiton este coeficiente puede ser incrementado en un 40%.

La **demanda de oxígeno** del sistema de producción es superior a la de los estanques tradicionales debido a la unidad intensiva (alta carga de nutrientes y mayor densidad de peces). La tasa global de respiración (1,5 g$O_2$/m$^2$/h) se cubre con la producción fotosintética de oxigeno realizada por las algas durante el día, pero es necesario suministrar oxígeno de forma artificial durante la noche. Los aireadores de pala se utilizaron para este fin manteniendo además la circulación del agua en el experimento. Según nuestros cálculos, un aireador de palas de 1 kW de potencia tiene suficiente capacidad para mantener el nivel de oxígeno en un estanque 1500-2000 m$^2$ durante la noche. Durante el día - sobre todo en horas de sol - la principal función de la aireación es mantener la adecuada circulación de agua entre ambas partes del sistema y eliminar los residuos de la unidad intensiva. La mezcla es importante para garantizar que las algas unicelulares se mantengan en suspensión en la columna de agua a fin de aumentar la producción primaria. La velocidad adecuada de circulación de agua es entre 5-10 cm/s.

### 6.4.3. Factores críticos de operación

El principal riesgo operativo es la inestabilidad de la eficiencia de depuración resultado de las impredecibles fluctuaciones en la biomasa fitoplanctónica y en la composición de especies del estanque de tratamiento.

Por ello es crucial controlar los factores prácticos más importantes del sistema (**mezcla** homogénea del agua en el estanque de tratamiento y mantenimiento de los adecuados niveles de oxígeno) para satisfacer la demanda de oxígeno de los peces y los procesos de nitrificación y descomposición.

El nivel crítico de **oxígeno** es de 4 mg/l. También es importante evitar el desarrollo de condiciones anóxicas permanentes en cualquier lugar del sistema. El **nitrógeno amoniacal total** (TAN) y la concentración de **nitrito** deben ser inferiores a 0.5 mg/l. Altos niveles de amoniaco indican insuficiencia de nitrificación o la sobrecarga del sistema[21]. Por ello se debe proceder reduciendo la alimentación (menor aporte de nutrientes) y aumentando la aireación (favoreciendo los procesos oxidativos) hasta que los niveles de amonio y nitrito se reducen a concentraciones tolerables.

Con el fin de **evitar la acumulación de nutrientes en el fondo del estanque** es necesario airear y drenar periódicamente los sedimentos. Se recomienda mantener el estanque seco en invierno ya que la mineralización del carbono orgánico y el nitrógeno tienen lugar en esta temporada, además la falta de agua reduce al mínimo la aparición de parásitos y otros agentes infecciosos.

El **nivel de alimentación** tiene que ser adaptado a las fluctuaciones de temperatura, al igual que cualquier sistema productivo.

### 6.4.4. Diseño de una granja teórica con capacidad de producir 80 Tm/año

A continuación se describe una piscifactoría teórica (Figura 11) dimensionada para producir 50 Tm de peces predadores y 30 Tm de carpa común, que se puede considerar una pequeña explotación familiar con un beneficio esperado de 22.000,00 € (6.2 millones de HUF)

Basándonos en los resultados experimentales y teniendo en cuenta consideraciones económicas, sugerimos un sistema combinado de 2.5 ha consistente en 2 estanques extensivos (1.25 ha) albergando cada uno 4 jaulas como unidades intensivas para la crianza de predadores (densidad inicial: 20 kg/m$^3$, FCR: 1.5). En cada estanque extensivo se aconseja criar carpa común sin aporte alimentario (densidad inicial: 6

[21] El sistema se sobrecarga cuando es incapaz de asimilar (transformar) los nutrientes, es decir, cuando las bacterias nitrificantes no oxidan convenientemente el amonio a nitrito (Nitrosomonas) y este a nitrato (Nitrobacter). La insuficiencia de nitrificación se puede producir por dos causas, falta de oxígeno (condiciones anóxicas reductoras) o bajas temperaturas.

Tm/ha) colocando sustrato artificial para aumentar la producción de perifiton (10000 $m^2$ sustrato/ha). El agua se distribuirá con 4 aireadores de paleta en cada estanque (2-2 kW).

El cálculo de costos de inversión incluye la adquisición de 3.5 hectáreas de tierra (5.000,00 €, 1.4 millones HUF), la construcción de dos estanques extensivos de 1.5 hectáreas (54.000,00 €, 15 millones HUF) con 800 $m^3$ de jaulas (3.000,00 €, 0.8 millones HUF*) el sustrato artificial para producción de perifiton y la creación a partir de activos (2.000,00 €, 0.6 millones HUF). Otros cálculos se enumeran en la Tabla 23. En el análisis se supone que los precios son constantes. El retorno de la inversión ocurre al cuarto año mientras que el valor neto de la inversión actual (con una tasa de descuento anual del 10% asciende a 74.000,00 € (20.7 millones HUF) después de 10 años de funcionamiento.

| | **Unidad intensiva** | **Unidad extensiva** | **Módulo combinado** |
|---|---|---|---|
| ***Lotes*** | | | |
| Total (Tm) | 16 | 15 | 31 |
| Unidades | 2 Tm/jaula (100$m^2$) | 7.5 Tm/estanque (1.25ha) | |
| ha (Tm/ha) | 6.4 | 6 | 12.4 |
| Índice de conversión (FCR) | 1.5 | - | 1.0 |
| Alimento consumido | 51 Tm | - | 51 Tm |
| ***Despesca*** | | | |
| Total (Tm) | 50 | 27.5 | 77.5 |
| Unidades | 6.25 Tm/jaula (100$m^2$) | 15 Tm/estanque (1.25ha) | |
| ha (Tm/ha) | 20 | 13.75 | 31 |
| Rendimiento neto | | | |
| Total (Tm) | 34 | 12.5 | 46.5 |
| ha (Tm/ha) | 13.6 | 5 | 18.6 |

*Tabla 22: Lotes y despesca de la granja teórica*

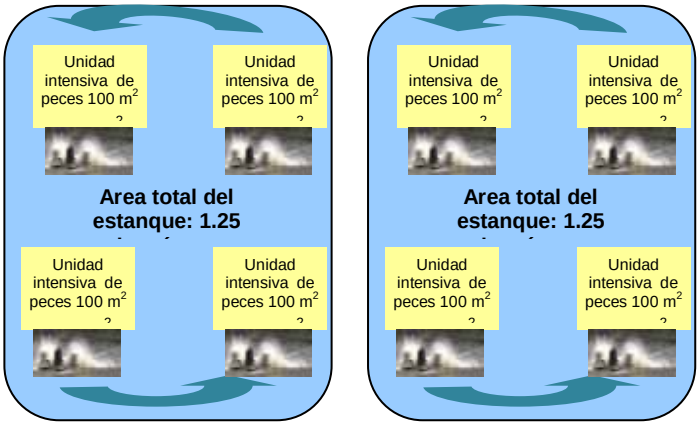



*Figura 11: Esquema de la granja teórica*

| | **0. año** | **1. año** | **2. año** | **3. año** | **4. año** | **5. año** | **6. año** | **7. año** | **8. año** | **9. año** | **10. año** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Inversión | 67 857 | | | | | | | | | | |
| Valor residual en 10 años | | | | | | | | | | | 17 857 |
| Costes alimentación | | 36 643 | 36 643 | 36 643 | 36 643 | 36 643 | 36 643 | 36 643 | 36 643 | 36 643 | 36 643 |
| Costes de alevines | | 62 857 | 62 857 | 62 857 | 62 857 | 62 857 | 62 857 | 62 857 | 62 857 | 62 857 | 62 857 |
| Mano de obra | | 7 857 | 7 857 | 7 857 | 7 857 | 7 857 | 7 857 | 7 857 | 7 857 | 7 857 | 7 857 |
| Costes de energía | | 6 714 | 6 714 | 6 714 | 6 714 | 6 714 | 6 714 | 6 714 | 6 714 | 6 714 | 6 714 |
| **Costes totales** | | 114 071 | 114 071 | 114 071 | 114 071 | 114 071 | 114 071 | 114 071 | 114 071 | 114 071 | 114 071 |
| **Retorno total** | | 136 071 | 136 071 | 136 071 | 136 071 | 136 071 | 136 071 | 136 071 | 136 071 | 136 071 | 136 071 |
| **Balance (cash-flow)** | -67 857 | 22 000 | 22 000 | 22 000 | 22 000 | 22 000 | 22 000 | 22 000 | 22 000 | 22 000 | 39 857 |
| **Tasa de descuento (r=10%)** | -67 857 | 20 000 | 18 182 | 16 529 | 15 026 | 13 660 | 12 418 | 11 289 | 10 263 | 9 330 | 15 367 |
| **Descuento acumulativo** | -67 857 | -47 857 | -29 675 | -13 146 | 1 880 | 15 540 | 27 959 | 39 248 | 49 511 | 58 841 | 74 208 |

*Tabla 23: Análisis coste beneficio de la granja teórica (miles HUF*), 1 EURO=280 HUF*

# 7. Mejora de la productividad natural en estanques extensivos – Estudio de caso en Polonia

## *7.1. Nuevas especies y métodos de producción de peces en estanques: Módulo Policrianza*

### 7.1.1. Descripción general del estudio de caso

En Polonia, la mayoría de las granjas acuícolas con estanques funcionan con carpa común en régimen de monocrianza. Otras especies de peces producidas junto a la carpa común, tienen bajo valor de mercado debido a la escasez de la demanda. Por lo tanto, la escasa diversificación de la producción no permite compensar las pérdidas económicas causadas por la disminución de la demanda. Además, la monocrianza de carpa no es un sistema efectivo en términos de utilización de nutrientes. Con el fin de mejorar la rentabilidad de las explotaciones de carpa y reducir su impacto medioambiental, se busca producir en un nuevo régimen de policrianza.

La introducción de nuevas especies de peces podría incrementar la diversidad de los productos en las explotaciones ayudando a competir mejor con otros acuicultores que suministran especies más demandadas por los clientes. Debido a la naturaleza de la cría de carpas en estanques, la solución más razonable es introducir un sustituto de los peces herbívoros o ciprínidos planctófagos. La literatura de investigación y las observaciones prácticas señalaron a la espátula americana (*Polyodon spathula*) como una de las posibles especies susceptibles de ser introducidas. La espátula es un pez acipenseriforme que vive naturalmente en ríos de corriente lenta de las zonas templadas de América del Norte. A diferencia de otros esturiones, la espátula se alimenta a lo largo de su vida exclusivamente de plancton y alcanza hasta 2 m de longitud. Como animal filtrador, y debido a su rápida tasa de crecimiento, parece ser un excelente sustituto de la carpa cabezona (*Aristichthys nobilis).* Es apreciada por el sabor de su carne y por sus huevos. Esta especie fue introducida en Polonia en los años 80, aunque hasta la fecha no se ha popularizado su consumo. Además del potencial beneficio económico, la presencia de filtradores en los estanques incrementa la dinámica de los nutrientes y la retención de N y P en la biomasa de los peces disminuyendo su acumulación en el medio ambiente.

### 7.1.2. Principios del módulo

La tecnología desarrollada en el marco del módulo policrianza aporta nuevas posibilidades a los acuicultores que producen en piscifactorías tradicionales con estanques del tipo de los utilizados para la carpa. La tecnología propuesta implica la introducción de la espátula en los estanques como sustituto de la carpa cabezona. Se describe la composición de la población en régimen de policrianza junto a la producción esperada y los resultados económicos, así como las observaciones prácticas sobre las técnicas de producción de la espátula. La tecnología no requiere costos de inversión, excepto la adquisición de nuevos lotes de peces.

#### Composición de lotes

Dos poblaciones de crianza “estándar” (monocrianza de carpa común y policrianza tradicional) han sido comparadas con otras dos experimentales incluyendo esturión y espátula. Los lotes se diseñaron para asegurar que cada nicho[22] de alimentación (bentófagos, filtradores y herbívoros) tenía la misma biomasa. Estas configuraciones de lotes (diferentes poblaciones de peces) se probaron por duplicado. Los peces fueron introducidos en los estanques a finales de abril y se mantuvieron durante 5 meses.

#### Estanques

La espátula se introdujo en los estanques tipo carpa durante dos experimentos estacionales desarrollados a escala piloto. Todos los experimentos se llevaron a cabo en un complejo de estanques de tierra experimentales situados en el sur de Polonia (18 ° 45'E, 49 ° 53'N). Los estanques tienen 1 500 $m^2$ cada uno y la profundidad media es de 1 m, por lo que su volumen equivale a 1 500 $m^3$. Los estanques se pueden drenar completamente y se abastecen con agua del río Vístula.

[22] En ecología, un **nicho** es un término que describe la posición relacional de una especie o población en un ecosistema o el espacio concreto que ocupa en el ecosistema. En otras palabras, cuando hablamos de nicho ecológico, nos referimos a la "ocupación" o a la función que desempeña cierto individuo dentro de una comunidad. Es el hábitat compartido por varias especies (http://es.wikipedia.org/wiki/Nicho_ecol%C3%B3gico)

| Especies | Monocrianza | | Policrianza tenca | | Policrianza carpa | | Policrianza esturión | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Unidades | (kg/ha) | (g) | (kg/ha) | (g) | (kg/ha) | (g) | (kg/ha) | (g) |
| Carpa herbívora *(Ctenopharyngodon idella)* | - | - | 30 | 500 | 30 | 500 | 30 | 500 |
| Carpa plateada *(Hypophthalmichthys molitrix)* | - | - | 60 | 500 | 60 | 500 | 60 | 500 |
| Carpa cabezona *(Aristichthys nobilis)* | - | - | 72 | 100 | - | - | - | - |
| Espátula *(Polyodon spathula)* | - | - | - | - | 72 | 500 | 72 | 500 |
| Tenca *(Tinca tinca)* | - | - | 45 | 250 | - | - | - | - |
| Carpa común *(Cyprinus carpio)* | 150 | 250 | 105 | 250 | 150 | 250 | - | - |
| Esturión *(Acipenser baerii)* | - | - | - | - | - | - | 150 | 250 |

*Tabla 24 : Diseño de la composición de lotes investigados en el módulo policrianza (biomasa inicial y valor medio del peso individual)*

### Fertilización

Los estanques fueron fertilizados con urea (46% N) y superfosfato (20% P) semanalmente. La intensidad de fertilización fue de 147 kgN/ha y 25 kgP/ha por temporada.

## 7.1.3. Evaluación de los indicadores de sostenibilidad seleccionados en SustainAqua

### Producción de peces

En todos los tratamientos probados en el módulo "Policrianza", los lotes que mostraron mayor ganancia de biomasa total incluyeron espátula y carpa común. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 25. El incremento de biomasa de la espátula fue aproximadamente 30% mayor que el de la carpa, mientras que la ganancia de peso en esta especie fue semejante en régimen de monocrianza y policrianza. La mayoría de la producción correspondió a la espátula en los tratamientos policrianza (carpa y esturión, ver Tabla 25). La baja producción de carpa en el lote policrianza con tenca, fue debida a la alta mortalidad observada como consecuencia de un brote de KHV[23]. Sin embargo, la ganancia de peso de la carpa cabezona en este tratamiento alcanzó solo el 53% del incremento de biomasa de la espátula.

El valor estimado del incremento de biomasa observado en todos los tratamientos se presenta en la Tabla 25. El valor medio de los precios minoristas en Polonia que se ha tenido en cuenta para este cálculo se presenta en la Tabla 26. Asumiendo que los precios considerados son correctos, el valor de la espátula producida en una temporada sería aproximadamente tres veces superior al obtenido para las otras especies en régimen de policrianza.

| Especies | Monocrianza | | Policrianza tenca | | Policrianza carpa | | Policrianza esturión | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Unidades | (kg/ha) | (%) | (kg/ha) | (%) | (kg/ha) | (%) | (kg/ha) | (%) |
| Carpa herbívora | - | - | 85 | 95 | 100 | 100 | 91 | 100 |
| Carpa plateada | - | - | 65 | 65 | 99 | 70 | 91 | 70 |
| Carpa cabezona | - | - | 280 | 83 | - | - | - | - |
| Espátula | - | - | - | - | 567 | 65 | 488 | 67 |
| Tenca | - | - | 24 | 87 | - | - | - | - |
| Carpa común | 438 | 95 | 49 | 37 | 426 | 65 | - | - |
| Esturión | - | - | - | - | - | - | 102 | 89 |

*Tabla 25: Incremento de biomasa y tasa de supervivencia en los diferentes tratamientos estudiados en el módulo*

[23] KHV = Koi Herpes Virus

| Especies | Precio (PLN/kg) | Precio (€/kg) |
|---|---|---|
| Carpa común | 10,04 | 2,23 |
| Tenca | 13,30 | 2,95 |
| Esturión | 26,87 | 5,97 |
| Carpa plateada | 8,43 | 1,87 |
| Carpa cabezona | 8,43 | 1,87 |
| Espátula* | 26,87 | 5,97 |
| Carpa herbívora | 9,00 | 2,00 |

* Valores estimados sobre la base de otros esturiones (no hay datos reales disponibles)

*Tabla 26:. Valores medios de precio de mercado minorista en Polonia para las especies usadas en el módulo policrianza*

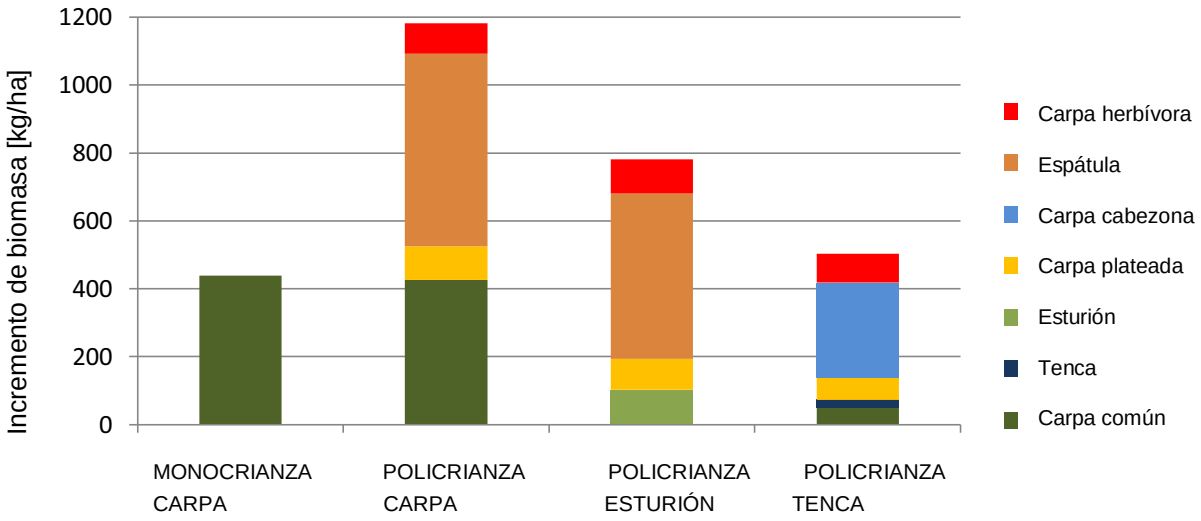



*Figura 12: Incremento medio de biomasa observado en los lotes estudiados*

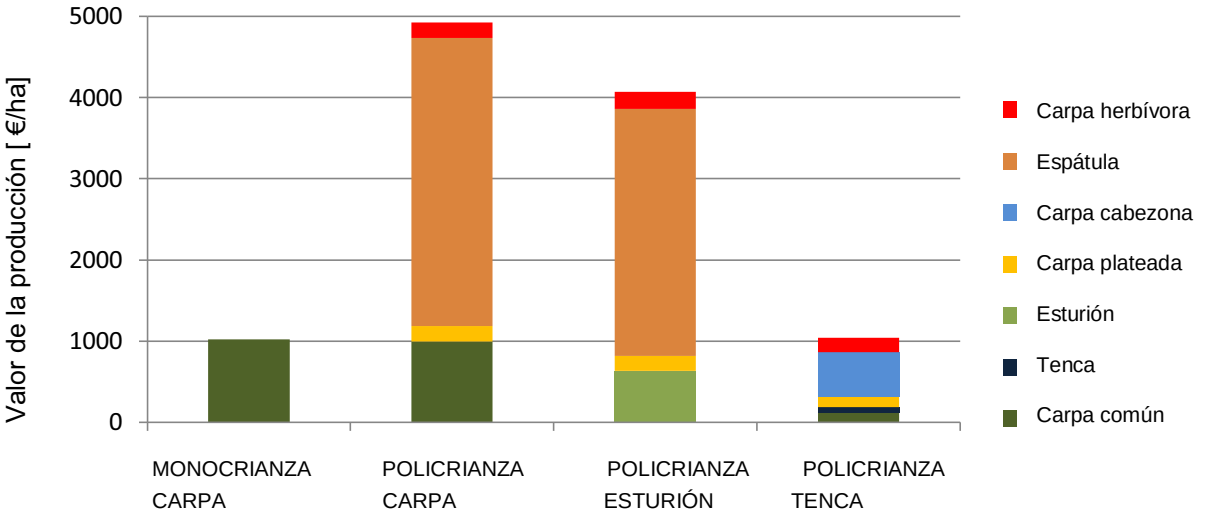



*Figura 13: Valor medio del incremento de biomasa durante la temporada del estudio*

Los ejemplares de espátula obtenidos al inicio del proyecto se mantuvieron en condiciones extensivas en estanques tipo carpa sin aporte suplementario de alimento (plancton exclusivamente). El peso individual obtenido al cabo de 10, 18 y 30 meses se presenta en la Figura 14..

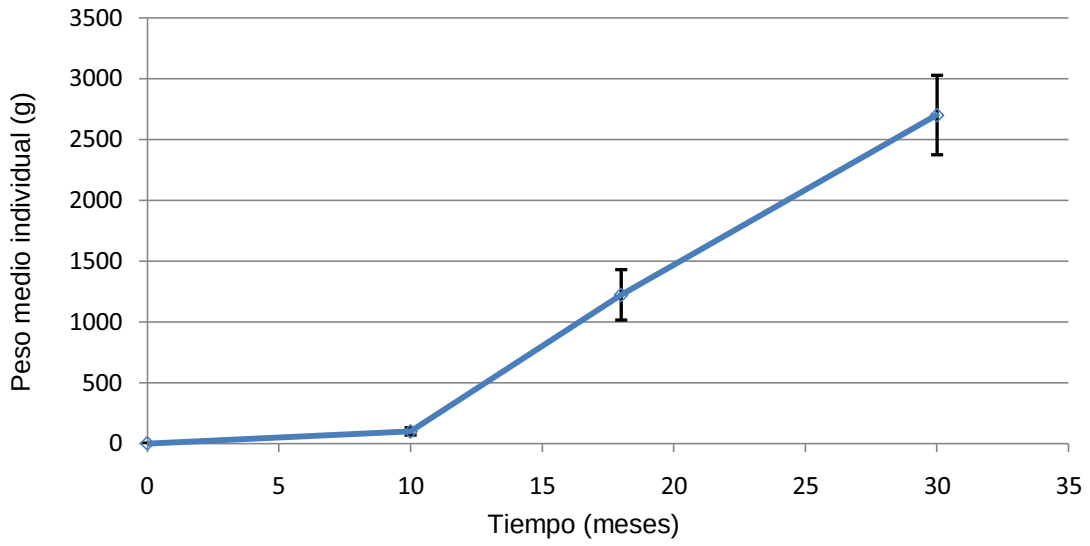



*Figura 14: Valor medio (±SD) del peso individual de las espátulas en tres años consecutivos.*

## Producción primaria

El mayor valor medio de la producción primaria neta de plancton (0.349 $mgO_2$ /L • h) se ha registrado en los estanques de policrianza con carpa común y espátula y ha sido 53% mayor comparado con la monocrianza de carpa. Esta diferencia es debida a la modificación del espectro del plancton causada por los patrones de alimentación de la espátula (principalmente zooplancton) que modifica cualitativamente la composición. El ramoneo selectivo del zooplancton favorece el crecimiento de las algas autotróficas y, por lo tanto, la producción primaria neta en el agua. Por el contrario, en el estanque de policrianza con esturión, se observó una producción primaria un 24% menor que la obtenida en la policrianza de carpa, que se relaciona a la menor eficiencia en la resuspensión del sedimento.

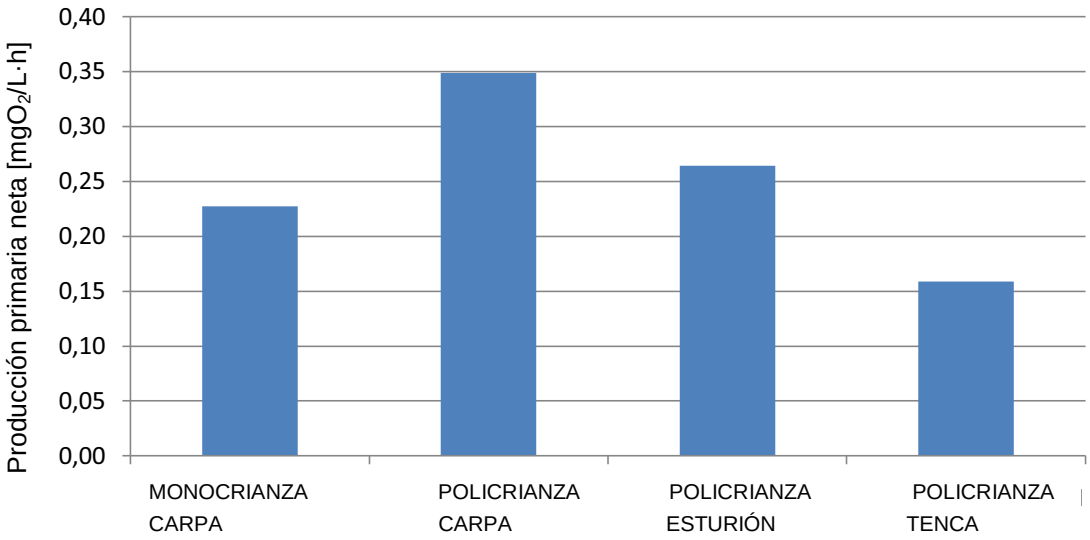



*Figura 15: Valor medio de la producción primaria neta en los estanques durante la temporada de estudio.*

## Eficiencia energética

La demanda de energía en los estanques está relacionada con el transporte y el manejo de los peces. La demanda de energía es específica de cada explotación y depende en gran medida del tamaño de la granja, la construcción del estanque y el equipo utilizado. Estos factores influyen en la demanda de energía mucho

más que la tecnología de producción aplicada. Por lo tanto, la eficiencia energética en el sistema de producción de estanques investigado no se calculó[24].

### Utilización del agua

La crianza extensiva de carpa implica el uso de grandes volúmenes de agua que se recoge durante el llenado de los estanques en la primavera. El abastecimiento de agua (entrada) expresado en litros/kg de producto llega a ser cientos de veces más alta que en el caso de la producción intensiva de peces. Sin embargo, el agua utilizada en los sistemas de estanque no está relacionada con la producción de peces exclusivamente. Las grandes masas de agua (complejo de estanques) son elementos importantes del medio que contribuyen a la retención de agua del sistema y al ciclo del agua.

Todos los estanques utilizados en este módulo pertenecen al mismo complejo y están situados unos junto a los otros, por tanto, sometidos a idénticas condiciones climáticas. Además todos ellos recibieron el mismo régimen de abastecimiento y drenaje. Por esta razón, los cálculos que se presentan a continuación se hicieron para todo el complejo de estanques y, no para cada uno individualmente. Las diferencias observadas entre los tratamientos resultantes son consecuencia del incremento en peso.

### Entrada de agua: l/kg producto

Los mejores resultados se han obtenido en la policrianza de carpa que demandó 8.4 $m^3$/kg de pescado producido. Se trata de una importante mejora en comparación con la monocrianza estándar en la cual la demanda de agua por kg de producto puede ser algo más del triple.

| | $m^3$/kg |
|---|---|
| MONOCRIANZA CARPA | 26.5 |
| POLICRIANZA CARPA | 8.4 |
| POLICRIANZA ESTURIÓN | 15.4 |
| POLICRIANZA TENCA | 19.9 |

*Tabla 27: Entrada de agua expresada en volumen $m^3$/kg producido*

### Salida de agua: l/kg producto

En general, el agua que sale de un sistema de estanques es igual al volumen que entra y que se despesca. Sin embargo, durante las lluvias de la temporada de producción, si se compensan las pérdidas causadas por la filtración y la evapotranspiración, el desbordamiento contribuirá a la salida total de agua. En tal caso, el agua que se pierde en el estanque se parece en su composición (contenido en nutrientes) a la del propio estanque más que al agua de lluvia. Para los cálculos de la salida de agua, se ha tenido en cuenta el volumen total del sistema investigado y los datos de precipitaciones. Dependiendo de cada lote, se han obtenido valores entre 13.81 – 43.65 $m^3$/kg del producto bruto.

| | $m^3$/kg |
|---|---|
| MONOCRIANZA CARPA | 43.65 |
| POLICRIANZA CARPA | 13.8 |
| POLICRIANZA ESTURIÓN | 25.4 |
| POLICRIANZA TENCA | 32.8 |

*Tabla 28: Salida de agua expresada en volumen $m^3$/kg producido*

### Eficiencia en la utilización de nutrientes

En este módulo de investigación se han identificado varias fuentes principales de nutrientes:

- Fertilizantes (urea y superfosfato): principal fuente suministrada al sistema en términos de cantidad de N y P.
- Agua de abastecimiento: El agua del río utilizada para llenar los estanques contenía nutrientes recibidos de sistema de drenaje de la cuenca. La cantidad de nutrientes es escasa pero no es despreciable. Para el cálculo sólo se utilizó el volumen del estanque.
- Depósitos: En los sedimentos del fondo hay una gran cantidad de nutrientes acumulados que se encuentran bio-disponibles. Constituyen la principal fuente de N, y en particular el P, se presenta en gran cantidad en los abonos minerales que se encuentran en los sedimentos después de las operaciones de manejo. Sin embargo, el análisis cuantitativo de P y N realizado en los sedimentos del fondo de todos los estanques investigados en este módulo, antes y después de la temporada de producción, no reveló cambios importantes en su concentración. El incremento de la cantidad de estos compuestos se estimó en +0.84% y +0.45% en el caso de N y P respectivamente. Esto supone un incremento de 1.57 kgP/ha en comparación con los 26.9 kgP/ha añadidos como abono, y 19.35 kgN/ha, frente a los 159 kgN/ha de la misma fuente. Por lo tanto, el aporte de los sedimentos del fondo se ha despreciado en los cálculos.

[24] El gasto energético para el manejo de un estanque de monocrianza es el mismo que el de su manejo en policrianza. No hay diferencias en relación al régimen productivo en sí, aunque depende del método empleado en cada granja.

- Precipitaciones y escorrentías: Son fuentes externas e incontroladas de nutrientes. En el caso del módulo investigado, el volumen de escorrentía es despreciable en relación a las lluvias. Sin embargo, las precipitaciones también se omitieron en el cálculo puesto que su contenido en N y P es prácticamente nulo.
- Fijación de nitrógeno: las bacterias y algunas algas cianofíceas pueden asimilar el nitrógeno molecular en compuestos orgánicos enriqueciendo el ecosistema con nitrógeno biodisponible. Sin embargo, la importancia de este proceso es mayor en aguas cálidas. En virtud de las condiciones climáticas investigadas su efecto es insignificante en comparación con la fertilización. Por ello, la fijación de nitrógeno también se ha omitido en los cálculos.

Los cálculos de la eficiencia de utilización de nutrientes se basan en los introducidos con los abonos y el agua utilizada para el llenado de los tanques como única fuente de N y P. La mayor eficiencia se ha observado en el lote de policrianza de carpa con valores de 20,9% y 10,8% de N y P respectivamente**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. En el caso del nitrógeno, se han despreciado la fijación del $N_2$ y la volatilización del mismo causada por desnitrificación.

| | NITRÓGENO | | | FÓSFORO | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***ENTRADA*** | ***RETENCIÓN*** | | ***ENTRADA*** | ***RETENCIÓN*** | |
| | | ***kg/ha*** | ***%*** | | ***kg/ha*** | ***%*** |
| MONOCRIANZA CARPA | 159.1 | 10.6 | 6.6 | 30.9 | 1.1 | 3.4 |
| POLICRIANZA CARPA | 159.1 | 33.3 | 20.9 | 30.9 | 3.3 | 10.8 |
| POLICRIANZA ESTURIÓN | 159.1 | 18.1 | 11.4 | 30.9 | 1.8 | 5.9 |
| POLICRIANZA TENCA | 159.1 | 14.0 | 8.8 | 30.9 | 1.4 | 4.6 |

*Tabla 29: Retención de nitrógeno y fósforo en la biomasa de peces*

La única fuente externa de carbono en el sistema de estanques es la urea. No obstante, la cantidad de C introducido con el abono así como el carbono orgánico y el $CO_2$ introducido en el sistema con las escorrentías o el suministro de agua se ha considerado irrelevante. Por lo tanto, se asume que todo el carbono orgánico presente en el sistema se deriva de la producción primaria. El $CO_2$ atmosférico transferido al agua es la principal fuente de carbono orgánico en la biomasa que se desarrolla en un estanque. Las vías de asimilación del carbono orgánico son muy complejas y varían en la temporada de producción. La cantidad de carbono orgánico en un cuerpo de agua puede ser calculada (sobre la base del DQO).

## Salida de nutrientes

En un sistema de estanques bien mantenido no se libera agua durante el periodo productivo para evitar la indeseada pérdida de nutrientes. Esto también es aplicable a los estanques extensivos como los utilizados en el módulo investigado. Durante la temporada de producción, la pérdida de nutrientes es atribuible a los procesos de filtración. Sin embargo, este caso es muy específico y constituye sólo una pequeña fracción del total de nutrientes liberados. La mayoría de los nutrientes se pierden al drenar los estanques en el momento de la despesca. La cantidad de nutrientes liberados al medio (descargados del sistema) se ha estimado asumiendo que la cantidad iguala a la concentración detectada en el agua antes de la despesca multiplicada por el volumen del estanque.

| | Salida de nutrientes | |
|---|---|---|
| | ***kgN/kg producto*** | ***kgP/kg producto*** |
| MONOCRIANZA CARPA | 0,39 | 0,079 |
| POLICRIANZA CARPA | 0,1 | 0,023 |
| POLICRIANZA ESTURIÓN | 0,22 | 0,045 |
| POLICRIANZA TENCA | 0,29 | 0,059 |

*Tabla30: Pérdidas de nutrientes a través del agua de salida por kg de pescado producido*

Las diferencias en los valores registrados entre lotes se relacionan con la biomasa de peces observada en el momento de la despesca (incremento en peso), al igual que en el caso de la demanda de agua. La concentración de nutrientes es un factor con influencia muy escasa en las diferencias observadas. En este caso, sólo se han estimado las pérdidas de nitrógeno y fósforo.

## Incremento de mano de obra

Básicamente, la tecnología propuesta (introducción de la espátula) no cambia las técnicas y equipos que participan en la producción de peces. Sin embargo, las observaciones realizadas durante la despesca de los estanques experimentales utilizados para el módulo sugieren que se necesita incrementar la mano de obra necesaria para la despesca, sobre todo para la clasificación. La recolección de los peces en los estanques

de policrianza requiere aproximadamente 10% más de tiempo de trabajo en comparación con los estanques de monocrianza. El valor de la mano de obra dependerá en gran medida de las instalaciones y equipos utilizados así como del número de operarios y la experiencia (destreza) personal. El tamaño de los estanques y su número también desempeñará un papel importante.

### 7.1.4. Factores de éxito y limitaciones

Los principales logros y resultados de los experimentos realizados en el marco del módulo Policrianza son:

- Introducción de la espátula americana en los estanques con carpa en régimen de policrianza.
- La espátula, introducida de forma sostenible como sustituto de la carpa cabezona en estanques extensivos, permite incrementar la biomasa de peces.
- Su potencial valor en el mercado puede incrementar la rentabilidad de la explotación proporcionando un producto de alta calidad.
- La presencia de especies filtradoras aumenta la dinámica de los nutrientes en los estanques y la retención de N y P en la biomasa de peces, en consecuencia hay menores pérdidas al ambiente.

No obstante, la producción de espátula presenta numerosas limitaciones:

- Alto precio de los alevines, sobre 8 € con un año de edad (~ 100 g) y numerosos problemas para su reproducción artificial en cautividad.
- Limitaciones relacionadas con las técnicas de producción:
  - Las espátulas jóvenes son presa fácil para las aves. Los estanques deben ser cubiertos con redes
  - Es una especie muy sensible que exige ser manipulada con cuidado excepcional (alta mortalidad en la despesca)
  - Durante la clasificación y selección se necesita espacio adicional y flujo de agua para evitar la asfixia
  - La legislación de la UE limita la introducción de especies exóticas en la acuicultura, por lo tanto la producción de espátula en distintos países de la UE pueden encontrar serias dificultades. No obstante, si en el futuro hubiera un incremento en la demanda de estos productos en la UE, es probable que se permita el desarrollo de tecnologías para la producción de especies foráneas (incluyendo espátula) en una forma ambientalmente segura.
- Cuestiones relacionadas con el mercado:
  - La espátula no es una especie conocida en el mercado de pescado de la UE
  - La demanda es desconocida y sus precios a nivel minorista son inciertos
  - Hay información escasa sobre sus posibilidades de transformación y calidad.

Las cuestiones mencionadas anteriormente requieren más investigación.

### 7.1.5. Beneficios de la aplicación

La introducción de la espátula, como sustituto de herbívoros y ciprínidos planctófagos es deseable para mejorar la rentabilidad de las explotaciones. Debido a su rápida tasa de crecimiento y al potencial valor de su carne y huevos parece ser un excelente sustituto de carpa cabezona pues proporciona más incremento de biomasa con un valor de mercado mucho mayor que otras especies de peces filtradoras. La introducción de nuevas especies aumentaría la diversidad en el abastecimiento y permitiría competir con otros productores de pescado mediante el suministro de productos acuícolas más demandados por los clientes.

## *7.2. Conclusiones y recomendaciones prácticas para la producción de espátula en estanques de policrianza*

### 7.2.1. Crecimiento de la espátula

En estos experimentos se ha observado el crecimiento de la espátula en estanques del tipo carpa. La masa corporal (peso) y la mortalidad se han registrado durante 24 meses hasta su despesca. El peso medio inicial de individuos con ~ 10 meses de edad fue de aproximadamente 90 g y se incrementó hasta 2 700 g (2.7kg) durante las dos temporadas de cría. Muestras de peces fueron sacrificados para evaluar el contenido intestinal antes de la invernada en 2008. A diferencia de la carpa común, la espátula presentó el intestino lleno de plancton, lo cual indica que su periodo de alimentación es más largo. Por ello, la espátula no pierde tanto peso durante la invernada a diferencia de la carpa común.

### 7.2.2. Mortalidad de la espátula

En 24 meses (dos temporadas de estudio), el promedio de mortalidad acumulada de la espátula alcanzó casi el 50%. La tasa de supervivencia registrada es comparable a la observada en la carpa común. Sin embargo, debido al valor económico de la espátula, el impacto es más grave en términos del rendimiento económico de la piscifactoría. Por lo tanto, este puede ser uno de los principales inconvenientes de la introducción de la espátula en los estanques.

Observaciones realizadas durante la despesca, la temporada de crecimiento y la invernada se tradujeron en algunas conclusiones prácticas para reducir las pérdidas relacionadas a la mortalidad de la espátula en condiciones reales de producción:

- Los trabajadores, que suelen estar bien entrenados para manipular la carpa, deben poner mayor cuidado al manipular esta especie que es mucho menos resistente. Por ello hay que adoptar medidas excepcionales de precaución, especialmente en la selección y clasificación.
- La captura y el periodo de hacinamiento son momentos críticos del proceso. La boca (rostrum) y los opérculos de la espátula tienden a liarse con las redes de cerco utilizadas para la despesca. Se recomienda usar redes con tamaño de malla adecuado.
- El hacinamiento prolongado con otras especies en la red de cerco puede provocar la asfixia de la espátula. Esto es especialmente importante si se rompe la cadena de transporte.
- Después de la despesca, los animales se han de mantener con abundante agua limpia al objeto de limpiar las agallas que se obstruyen con los sedimentos del fondo. Se ha observado que la espátula tarda en recuperarse mucho más tiempo que la carpa común o la carpa cabezona. Además, se requiere suficiente amplitud para que pueda nadar libremente, ya que no utiliza el opérculo para proporcionar flujo de agua a través de las agallas. Por lo tanto, debe prestarse especial atención al proceso de lavado de la agalla.
- Debido a la forma alargada del rostrum, la espátula no encaja en la mayoría de las sacaderas manuales. Hay que evitar la laceración del cuerpo y las agallas usando redes de tamaño adecuado
- Los juveniles de la espátula son presa fácil de aves piscívoras. Por lo tanto, los estanques con espátulas de hasta 300-500 g tienen que ser protegidos contra con redes o cadenas montadas por encima del estanque.

### 7.2.3. Rendimiento ecológico

La presencia de peces filtradores aumenta la producción primaria del ecosistema estanque. Debido a que las poblaciones de peces abarcan especies que cubren todos los nichos alimentarios y no se solapan entre sí, la producción en régimen de policrianza al menos duplica (cuando no triplica) la observada en monocrianza. La influencia de las diferentes poblaciones de peces se observó también en el caso de los parámetros físico-químicos del agua relacionados con la producción de organismos planctónicos (transparencia y concentración de clorofila). Al mismo tiempo, la concentración media de oxígeno disuelto en los estanques de monocrianza fue menor y más fluctuante que la observada en los otros tratamientos. La presencia de filtradores reduce la abundancia de zooplancton y, por ende, el riesgo de su crecimiento incontrolado por el ramoneo excesivo de las algas autotróficas responsables de la producción de oxígeno, es decir, la producción primaria.

El comportamiento alimentario de la carpa común causa una eficiente resuspensión de los sedimentos del fondo y, por tanto, un mejor intercambio de nutrientes con el agua.

Como no hay otros productos obtenidos a partir de este sistema, sólo la biomasa de peces es responsable de las diferencias observadas entre tratamientos. Los derivados metabólicos y otros compuestos biogénicos son depositados en su gran mayoría en los sedimentos del fondo. Por ello durante la despesca pueden ser liberados (por resuspensión mecánica) al ambiente y finalmente contribuir a la eutrofización de las aguas naturales. La mejora en la utilización de nutrientes por la gestión del estanque en régimen de policrianza no elimina este fenómeno aunque si lo reduce.

### 7.2.4. Rendimiento económico

La introducción de la espátula en los estanques tradicionales es una posible solución para la mejorar la rentabilidad de las explotaciones de carpa. Como la carne de la espátula es similar a la de otros esturiones, se puede suponer que será igualmente apreciada por los consumidores si se les informa adecuadamente. Además si se le permite madurar, puede proporcionar huevos de elevado valor (caviar).

La prueba de policrianza con lotes de espátula, carpa común, carpa plateada y carpa herbívora sin alimentación suplementaria y mantenidos en los estanques que reciben sólo fertilizantes agrícolas es capaz de producir biomasa de peces similar a la obtenida con carpa común en monocrianza con alimentación

suplementaria de cereales (maíz y trigo). La eliminación de los costes de alimentación unida al aumento de valor del pescado producido, abre nuevas expectativas frente a la producción en régimen de monocrianza.

La dimensión económica de la policrianza también debe tener en cuenta la mayor cantidad de mano de obra especialmente en relación con la despesca. Es preciso emplear mayor número de horas debido a la necesidad de clasificar el pescado. Además, puede ser necesario emplear parte de las instalaciones y nuevo equipo para la despesca, manejo, transporte y almacenamiento de la espátula.

### 7.2.5. Lotes recomendados

Con base en los resultados obtenidos durante la investigación, se puede recomendar introducir la espátula en los lotes de peces para policrianza. Las siguientes recomendaciones se refieren a las poblaciones (lotes) de peces que se producen de forma semi-extensiva en estanques tradicionales (tipo carpa), con fondo de tierra, sin alimentación suplementaria y fertilizados con abonos agrícolas. Se pueden utilizar animales de diferentes edades de todas las especies aunque se deben cumplir algunos requisitos:

| **Especies** | **Incremento de biomasa estimado** | **Peso final individual deseado** | **Peso inicial** | **Densidad** |
|---|---|---|---|---|
| | *[kg/ha]* | *[kg/ind]* | *[kg/ind]* | *[ind/ha]* |
| Carpa común | 400 | 0.3 | 0.05 | 1 600 |
| | 400 | 1.2 | 0.2 | 400 |
| Espátula | 600 | 1 | 0.1 | 667 |
| | 600 | 2 | 1 | 600 |
| | 600 | 3 | 2 | 600 |
| Carpa plateada | 70 | 1.5 | 0.5 | 70 |
| | 70 | 0.5 | 0.1 | 175 |
| Carpa herbívora | 100 | 1.5 | 0.5 | 100 |
| | 100 | 0.5 | 0.1 | 250 |

*Tabla 31: Ejemplo de diseño del módulo policrianza (composición de lotes)*

- La eficaz resuspensión de los sedimentos del fondo para proporcionar una adecuada concentración de nutrientes en la columna de agua (y su posterior reciclaje en la cadena trófica) requiere una biomasa suficientemente alta de bentófagos con cierto peso individual. La carpa común solo es favorable durante el segundo o tercer periodo productivo[25].
- La densidad de población o carga (kg/m$^3$) se calculará de acuerdo con la intensidad de fertilización planificada y la fertilidad natural del estanque. El incremento de peso estimado para la carpa común en un estanque fertilizado con 40 kgP/ha y 240 kgN/ha por temporada es de 450 kg/ha.
- La densidad de población y peso deben calcularse de acuerdo con el peso final deseado[26]. Normas similares, incluyendo la categoría de edad (peso inicial), se aplican a otros ciprínidos.
- Se puede esperar un incremento de biomasa de alrededor de 600 kg/ha y un peso medio individual de 1750 y 3500 g después de la segunda y la tercera temporada de producción respectivamente. La densidad de población se presenta en la Tabla 31 con base al ritmo de crecimiento registrado durante el experimento realizado. Los valores indicados no determinan la máxima tasa de crecimiento de la espátula en virtud de las condiciones de producción.

En la Tabla 31 se presenta un ejemplo de diseño de los lotes de peces sobre la base de estas recomendaciones.

### 7.2.6. Principales limitaciones para la introducción de espátula

Aunque hay muchos aspectos positivos relacionados con la introducción de la espátula, también hay algunas limitaciones:

- En Polonia actualmente, la espátula no se reproduce a escala comercial. Todo el material disponible se importa como huevos fecundados o alevines y ésta es la principal razón de su elevado precio que oscila alrededor de 8 € por cada 100 g de pescado. Sin embargo, se ha informado recientemente de algunos avances en piscifactorías polacas. Se espera que en el momento en que se pueda reproducir artificialmente, los costes bajen de forma significativa. Dentro de la UE, el éxito de la reproducción de espátula ya ha sido reportado en la República Checa y Rumanía.

[25] Las condiciones climáticas de Hungría- Polonia condicionan tasas de crecimiento bastante lento que no se dan en España. No es tan importante la “edad” como que el animal tenga suficiente envergadura y vigor para remover el sedimento. En Mallorca, los animales de un año llegan a 300 g sin pasar invernada, con 2 años rondan el kg y con tres años los 2 kg aproximadamente.

[26] Para planificar el peso medio final deseado hay que tener en cuenta que el ritmo de crecimiento varía con la edad. Animales más pequeños crecen más deprisa que los de mayor edad. Además, como existe competencia por el alimento, a misma ganancia de peso de la población, tendremos animales el doble de grandes si ajustamos el lote con la mitad de individuos.

- Limitaciones relacionadas con las técnicas de producción: La introducción de nuevas especies también demanda nuevas técnicas relacionadas principalmente con el manejo de los peces y la capacitación del personal. Las principales recomendaciones se enumeran en los capítulos anteriores.
- La espátula es una especie alóctona en Europa. La legislación de la UE limita la introducción de nuevas especies en la acuicultura. Por lo tanto, la producción de espátula en diferentes países de la UE puede encontrar dificultades. Sin embargo, la directiva de la UE da una cierta libertad a los Estados miembros para su aprobación. También es importante el hecho de que otras especies de peces producidas en Polonia y otros Estados miembros de la UE son también especies alóctonas de acuerdo con la Directiva. Dentro de las especies utilizadas en el módulo policrianza sólo la tenca es considerada especie nativa. El aumento de la demanda de los productos de la acuicultura en la UE puede obligar a que se permita el desarrollo de tecnologías para producir especies introducidas (incluyendo la espátula) en una forma ambientalmente segura.
- También hay algunas cuestiones relacionadas con el mercado. La espátula no es una especie reconocida en el mercado de la UE. Esto afecta a Polonia en particular, pero no únicamente. La forma alargada de la cabeza puede ser interesante para algunas personas, pero definitivamente no es práctica para el consumo diario o para su preparación. La venta en fresco como animal entero o únicamente eviscerado no parece ser la mejor solución por causa de su aspecto. La percepción general de la espátula puede reducir su demanda y valor. Sin embargo, cabe esperar pequeños pero constantes cambios en la demanda del pescado entero.
- Los precios minoristas dependerán en gran medida de la aceptación del consumidor de este nuevo producto. Cabe esperar precios semejantes a otras especies de esturión puesto que la calidad de la carne es similar.
- Este pescado deberá ser ofrecido en su mayoría como procesado aunque puede haber ciertas dificultades técnicas debido a la forma poco común de la espátula. Apenas hay información sobre el procesamiento y la calidad de los productos finales. Tampoco hay información científica sobre la preferencia de los consumidores.
- La creciente toma de conciencia de los consumidores en relación con el bienestar de los peces es una preocupación importante. Cada especie tiene diferentes requisitos ambientales. Sin embargo, durante el experimento realizado, el comportamiento de la espátula fue muy bien en términos de tasa de crecimiento, pero el estanque de tierra no es su hábitat nativo. Hay un problema potencial puesto que las condiciones ambientales de los estanques de carpas son subóptimas para la espátula. Lo mismo sucede en relación a la manipulación y el transporte. Esta cuestión requiere más investigación.

## *7.3. Uso de residuos agrícolas como nutrientes para la crianza de peces en estanques: Módulo Cascada*

### 7.3.1. Descripción general del estudio de caso

La progresiva especialización de la agricultura en Europa Central ha tenido como resultado que la producción animal en las granjas (que operan normalmente en régimen de monocrianza) no disponga de opciones para utilizar los residuos como nutrientes. El vertido del estiércol producido, o su utilización in situ, se convierte en una preocupación debido a limitaciones jurídicas y técnicas. En consecuencia, se desean tecnologías de bajo costo que permitan utilizar el estiércol de una forma sostenible, respetuosa con el medio ambiente y de fácil manutención. Un estanque es un ecosistema, que consta de diversos nichos y favorece a gran número de procesos bioquímicos que se mantienen con la alimentación de los peces. Esto permite que la materia orgánica se transforme en compuestos que se incorporan en el estanque a través de la cadena trófica, resultando en un aumento de la producción primaria (plancton) y, en consecuencia, en biomasa de peces. La fuente de nutrientes puede ser los residuos líquidos de estiércol (purines) procedente de una granja de animales. La combinación de éste tipo de explotaciones ganaderas con estanques de peces, como uno de sus elementos, es un gran paso para promover las deseadas explotaciones agrícolas integradas. La utilización de los recursos generados en la granja dentro de la misma explotación es un elemento importante de su sostenibilidad.

La solución propuesta se centra principalmente en las pequeñas granjas de animales que funcionan como “orgánicas” o que están dispuestas a mejorar su sostenibilidad. Se construyó un sistema de estanques para la crianza de peces en circuito abierto abastecido con agua limpia que utiliza una gran cantidad de nitrógeno, fósforo y materia orgánica (estiércol). Estos compuestos se mantienen en el sistema o se transforman en gases. El vertido total de nutrientes en este sistema es inferior al aportado. Además de estos beneficios ecológicos, la producción de peces puede ser una fuente adicional de ingresos.

### 7.3.2. Principios del módulo

El módulo se basa en un conjunto de cuatro compartimentos en los estanques conectados en serie, a los que se suministra agua dulce, que actúa como portador de nutrientes. La única fuente artificial de nutrientes y energía son el estiércol líquido (purines) y el suministro de agua. Estos compuestos, dependiendo de su forma (mineral u orgánica) son los responsables del desarrollo de la biomasa en las partes respectivas de la cascada. Cada parte del sistema de estanques utiliza el suministro de nutrientes a través de diferentes procesos ecológicos.

Se construyó un sistema de estanques "tipo carpa" de circuito abierto. La configuración experimental consistió en dos estanques de tierra idénticos conectados por una tubería (35 m de longitud, ØIN 15 cm) en serie (área total 0.3 hectáreas). Cada estanque fue dividido en dos partes por una malla (3x3 cm), resultando en cuatro compartimientos (ver Figura 16). Cada uno de los compartimentos realizó una tarea diferente en el sistema de cascada (Tabla 32).

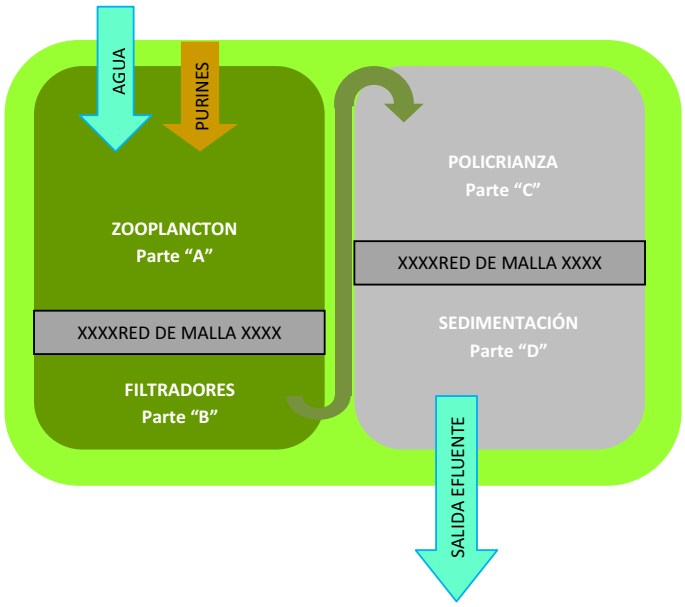



*Figura16: Esquema del sistema de cascada*

| Parte del sistema | Descripción |
|---|---|
| **A**<br>Compartimento Zooplancton | • Compartimento suministrado con estiércol bovino liquido<br>• La materia orgánica derivada del estiércol es la principal fuente de energía para el desarrollo del zooplancton y bacterias<br>• Sin peces<br>• 33% del área total del sistema |
| **B**<br>Compartimento filtradores | • Con peces filtradores que utilizan el plancton desarrollado en el compartimento A<br>• 17% del área total del sistema |
| **C**<br>Compartimento policrianza | • Poblaciones de carpa común, carpa cabezona, carpa plateada y carpa herbívora en régimen de policrianza.<br>• Peces y nutrientes utilizan el plancton desarrollado en el compartimento<br>• 25% del área total del sistema |
| **D**<br>Compartimento sedimentación | • Actúa como laguna de sedimentación para depositar los sólidos procedentes del compartimento C<br>• 25% del área total del sistema |

*Tabla 32: Papel de los respectivos compartimentos en el sistema de cascada*

Los estanques se abastecieron con agua dulce en la velocidad media del caudal 4.23 l/s • ha (15.3 $m^3$/h • hectárea). El sistema se abonó con estiércol de bovino líquido cada dos semanas en el *compartimento de zooplancton* junto con el suministro de agua. Durante la temporada, el sistema recibió 25 $m^3$/ha (7.5 $m^3$ en el módulo), que fue equivalente a 571 $kg_{DM}$[27]/ha. La cantidad de nutrientes recibidos por el módulo cascada durante la temporada de producción se presenta en la Tabla 33.

| Compuesto | Fuente | | Total [kg/ha] |
|---|---|---|---|
| | Purín [kg/ha] | Agua [kg/ha] | |
| C | 402.5 | 144.3 | 546.8 |
| N | 39.7 | 78.2 | 117.8 |
| P | 16.3 | 1.1 | 17.4 |

*Tabla 33: Vertido de nutrientes liberados con el estiércol y abastecimiento de agua al módulo cascada*

[27] DM = Dry matter. Kg de materia seca por hectárea

### Principales características de los abonos orgánicos empleados en los experimentos

Para proporcionar una eficiente conversión de nutrientes y energía a la biomasa de la biota, se necesita una fuente de materia orgánica fácilmente biodegradable. Desde hace siglos se han utilizado diferentes tipos de estiércol animal para la crianza de peces como fuente de nutrientes por una serie de razones:

- Es relativamente barato,
- Fácilmente disponible en la explotación, y
- Adecuado para una variedad de peces en policrianza.

Además, la cantidad de estiércol que permite su uso como abono para enmiendas de suelos normalmente está limitado por las normativas nacionales. En Polonia, la mayoría de los estanques de peces se encuentran localizados en áreas rurales con alta densidad ganadera y el estiércol líquido (purín) es un tipo de residuo agrícola, que se convierte en un grave problema si no es utilizado. El estiércol bovino o porcino líquido parece ser adecuado para su empleo en estanques como fuente de energía y nutrientes para el zooplancton.

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---|---|---|
| Material seca (DM) | [%] | 8.0 |
| Nitrógeno total (N) | [$\%_{DM}$] | 0.48 |
| Fósforo total (P) | [$\%_{DM}$] | 0.15 |
| Potasio(K) | [$\%_{DM}$] | 0.26 |
| Demanda bioquímica de oxígeno ($BOD_5$) | [$gO_2/dm^3$] | 5.0 |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | [$gO_2/dm^3$] | 14.0 |

*Tabla 34: Composición de la mezcla de estiércol líquido bovino/porcino (~50/50 v/v)*

La composición de la mezcla de estiércol bovino-porcino seleccionada para los experimentos realizados en el marco del módulo cascada se indica en la Tabla 34. Es importante tener en cuenta que la composición y la calidad de estiércol líquido puede variar durante la temporada de producción de acuerdo a las especies, su tamaño y edad, la alimentación recibida y la ingesta de agua, así como con los factores ambientales (sol, lluvia, etc.). Por ello, el análisis de suministro de estiércol debe repetirse con frecuencia durante la aplicación.

### 7.3.3. Evaluación de los indicadores de sostenibilidad seleccionados en SustainAqua

El módulo Cascada ha sido investigado en dos temporadas sucesivas. Sin embargo, el análisis de los datos preliminares reveló el bajo rendimiento del diseño de 2007 y por ello la configuración se reorganizó en 2008. En ambas temporadas el sistema en cascada se ha ejecutado por duplicado para garantizar una adecuada calidad de los datos obtenidos.

La temporada de producción se ha dividido en cinco períodos (cuatro semanas cada uno), a partir del 12 de mayo. El estiércol se ha aplicado sólo en los primeros cuatro períodos. Las condiciones de luz (nublado) y baja temperatura no permitieron introducir la materia orgánica en el último periodo porque habría causado una reducción en los niveles de oxígeno.

#### Entrada de agua: l/kg de producto

El agua de abastecimiento está destinada al transporte de nutrientes a lo largo de la cascada y fue un recurso necesario para la producción de peces[28]. La entrada de agua necesaria para la producción de peces se ha estimado que equivale a 66.9 $m^3$/kg.

#### Agua de salida (efluente): l/kg de producto

El mismo principio anterior se aplica al cálculo de la salida de agua. La diferencia de los resultados entre la entrada y salida se debe a la filtración, evaporación y precipitaciones. El agua de salida del sistema se estimó en 44.07 $m^3$/kg de peces.

#### Eficiencia Energética

El sistema investigado no utilizó energía para mantener la cascada. La única energía utilizada se relaciona con el transporte de los peces antes y después de la temporada de producción. Otras demandas atañen al mantenimiento de las instalaciones de la explotación. En el caso de que el agua no se pueda abastecer por gravedad sería necesario emplear bombeo para hacer circular el agua en el módulo. Si es así, la demanda de energía para la reutilización del agua puede representar importantes costes para el funcionamiento del módulo.

[28] El agua es un recurso absolutamente necesario para la producción de peces. No obstante también se pueden producir en sistemas estancos (cerrados) sin flujo de agua constante. Comparando con el módulo anterior (policrianza) en el que los valores variaron entre 8,4-26,5 $m^3$/kg se comprueba que la demanda de agua en este caso corresponde a aproximadamente el triple. Esto deriva de la necesidad de diluir el estiercol para distribuir los nutrientes por el sistema.

## Producción de peces

El sistema está diseñado en principio para utilizar los residuos agrícolas como nutrientes. La producción de peces en la cascada es una actividad adicional, aunque importante. El sistema es capaz de producir una gran biomasa de peces. Aunque hay muchas variables en la producción total de peces, se puede estimar en 380 kg/ha. El desglose de la producción (una temporada) para las diferentes especies se presenta en la Figura 17.

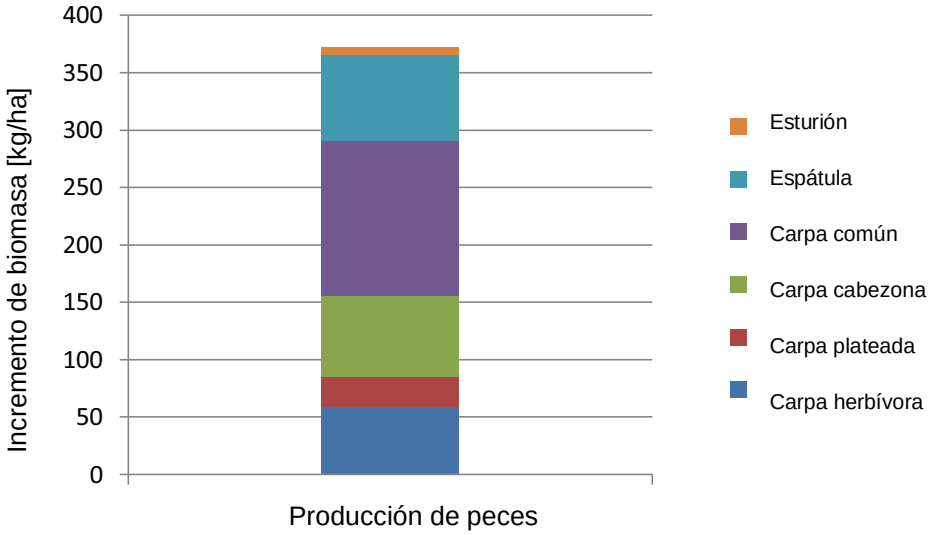



*Figura 17: Incremento de biomasa obtenido en el modulo estudiado*

## Eficiencia de utilización de nutrientes: kg de nutrientes (N, P, DQO) conservados en el producto / kg de nutrientes de entrada [%]

El objetivo principal de la cascada es retener los nutrientes liberados al sistema. En los cálculos se han tenido en cuenta dos fuentes principales de nitrógeno, fósforo y carbono orgánico:

- Agua de abastecimiento: El sistema es constantemente abastecido con agua del río. Durante el período investigado (20 semanas) el aporte de nutrientes por esta vía fue importante, estimando un total de 424 kgC/ha (C orgánico), 39.7 kgN/ha y 16.3 kgP/ha.
- Aporte de estiércol líquido: Cada dos semanas, el sistema se suministra con estiércol que constituye la principal fuente de nitrógeno. El total de la temporada completa de producción (20 semanas) introducido por esta vía se ha estimado en 78.1 kgN/ha y 1.1 kgP/ha.
- Fijación de nitrógeno - Como en el caso del módulo policrianza, esta fuente de N fue omitida en los cálculos.

Debido a la función básica que desempeña el módulo cascada, es importante evaluar la retención de los nutrientes, tanto en biomasa de peces como en el sistema global. En el caso de la retención de nutrientes en la biomasa de los peces, sólo se han tenido en cuenta el nitrógeno y fósforo. Aunque el estiércol presenta una gran cantidad de carbono orgánico se desconoce la parte retenida en los peces derivada del consumo de plancton (zooplancton y bacterias) que se desarrollan a partir de esta materia. Se asume que la mayoría de la materia orgánica incorporada en la biomasa de peces se deriva de la producción primaria (fitoplancton). La cantidad de nitrógeno y fósforo en la biomasa de los peces recolectados se ha comparado con el total de entrada de estos compuestos. Se ha calculado solamente la retención de nitrógeno y fósforo en la biomasa de peces.

| | Entrada [kg/ha·temporada] | | | Retención | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ***Agua*** | ***Purines*** | ***TOTAL*** | ***kg/ha*** | ***%*** |
| Nitrógeno | 39.7 | 78.1 | 117.8 | 10.4 | 8.8 |
| Fósforo | 16.3 | 1.1 | 17.4 | 1.0 | 5.8 |

*Tabla 35: Eficiencia de utilización de nutrientes por los peces en el módulo cascada.*

A lo largo de la temporada de producción, el módulo cascada ha sido capaz de retener cantidades importantes de nutrientes. Las concentraciones para todos los parámetros medidos han sido más pequeñas a la salida que a la entrada del sistema. En las figuras siguientes se

presentan las cantidades de carbono orgánico, nitrógeno y fósforo que entran y salen del sistema referidas a los períodos de cuatro semanas de la temporada (I a IV) (16 semanas en total).

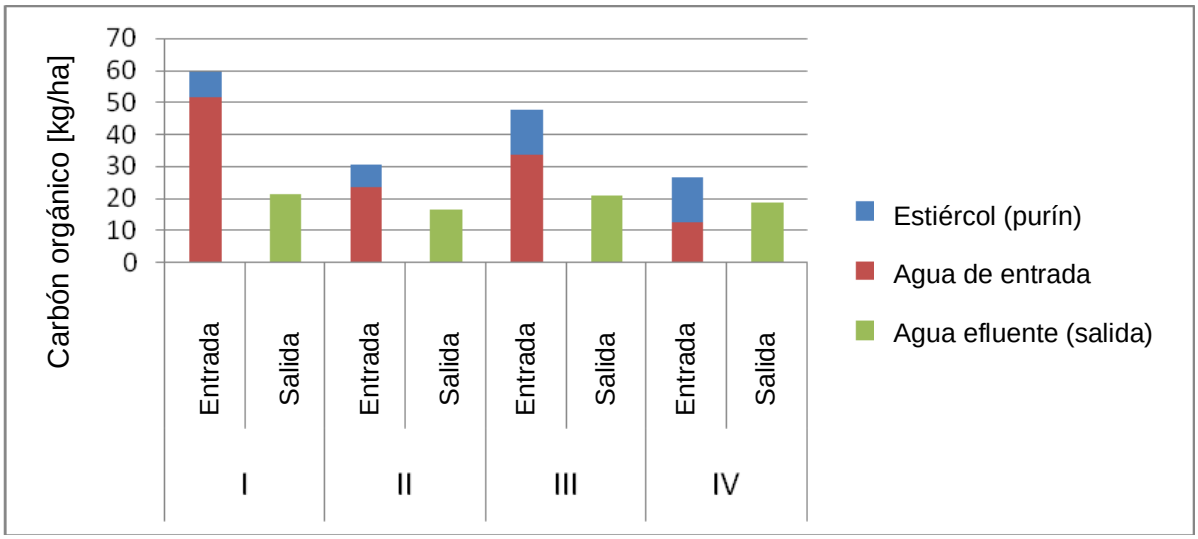



*Figura 18: Concentración de carbón orgánico a la entrada y a la salida del sistema de cascada*

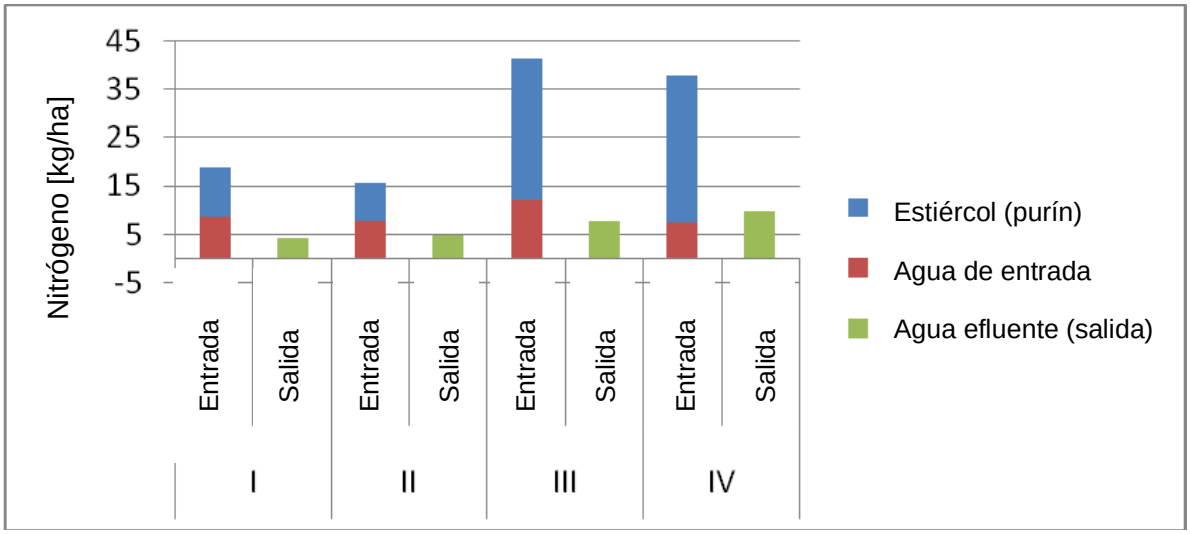



*Figura 19: Concentración de nitrógeno a la entrada y a la salida del sistema de cascada*

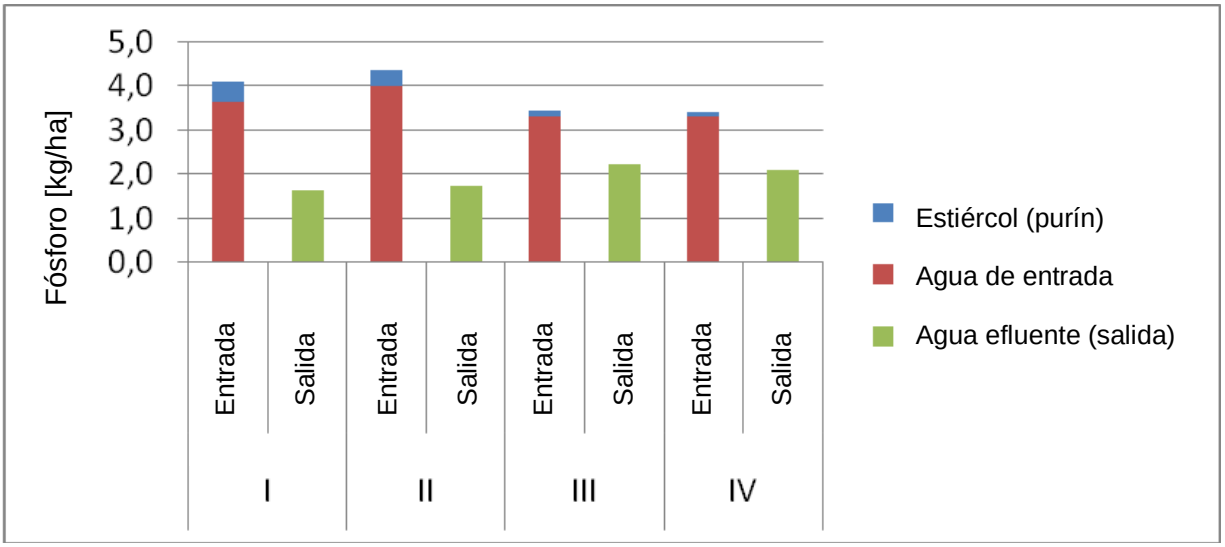



*Figura 20: Concentración de fósforo a la entrada y a la salida del sistema de cascada*

La retención de nutrientes en el sistema se ha calculado a partir de la diferencia de la cantidad total de nutrientes introducidos en él (aportados en el agua y estiércol) y los nutrientes de salida durante toda la temporada, sobre la base de la concentración de nutrientes en el agua que se libera del sistema (efluente). Los resultados se presentan en la tabla.

### Nutrientes de salida

Al sistema de cascada se le proporciona agua constantemente. Por ello, a pesar de la elevada retención de N, la cantidad total de nutrientes liberados al medio fue alta y llegó a 0.125 kg de N y 0.018 kg de P por kg de pescado producido.

| Compuesto | Vertido | Retención | |
|---|---|---|---|
| | *[kg/ha]* | *kg/ha* | *%* |
| C | 571.61 | 291.44 | 50.99 |
| N | 117.85 | 88.72 | 75.28 |
| P | 17.33 | 8.64 | 49.86 |

*Tabla 36: Retención de C, N, y P introducido al sistema de cascada mediante agua y estiércol líquido (purín)*

### Reutilización de los nutrientes para la alimentación de los peces: kg de nutrientes retenidos en subproductos secundarios por kg de nutrientes de entrada al sistema en su conjunto [%]

En el módulo de investigación se han intentado producir nuevos cultivos de plantas pero las pruebas no funcionaron por razones técnicas. El carácter del estanque favorece el desarrollo de especies de plantas no deseadas en lugar de las deseadas. No obstante, es posible producir plantas potencialmente útiles para su empleo in situ. La producción de *Azolla* (helecho de agua) puede ser considerada como fuente alternativa de nitrógeno y de alimentación para peces herbívoros.

### Incremento de mano de obra

La introducción del módulo cascada requiere una cantidad adicional de mano de obra relacionada con el mantenimiento del sistema (incluyendo la despesca). El sistema no mejora la relación productividad/trabajo.

## 7.3.4. Factores de éxito y limitaciones

La investigación realizada en el marco del módulo Cascada han tenido como resultado el desarrollo de una tecnología respetuosa con el medio ambiente que utiliza residuos orgánicos procedentes de otras actividades agrícolas (granjas de vacuno y cerdo).

Las principales limitaciones del sistema son:

- Necesidad de agua abundante: El sistema requiere importantes volúmenes de agua para proporcionar y distribuir los nutrientes a lo largo de la cascada. El abastecimiento de agua y su liberación a las aguas naturales puede estar limitada en algunos países, especialmente si sólo se tiene en cuenta las cantidades de nutrientes vertidas y no el balance (la diferencia entre las aguas de entrada y las liberadas).
- El buen funcionamiento del sistema diseñado se limita a 7 meses al año (entre la primavera y el otoño) cuando la temperatura del agua y la intensa radiación solar es suficiente para mantener los procesos hidrobiológicos en niveles adecuados.

## 7.3.5. Beneficios de la implantación

- El sistema de estanques en cascada puede actuar como un sector multifuncional de una explotación ganadera integrada.
- El sistema crea oportunidades para reducir los costos de utilización de las aguas residuales mediante su retención en un ecosistema controlado de estanques en cascada
- La propuesta tecnológica reduce el impacto ambiental de la explotación ganadera
- El sistema diseñado permite producir peces de una forma extensiva utilizando aguas residuales.
- Los peces producidos mediante alimentación natural pueden tener mayor valor nutritivo, siendo más apreciados por los consumidores (ver capítulo 5)
- Además de las ventajas del sistema de cascada citadas anteriormente, la construcción o el mantenimiento del sistema de estanques enriquece el medio ambiente natural a diferentes niveles aumentando la diversidad biológica, los niveles de agua subterránea o la retención de agua adicional. Los propietarios de los estanques pueden tener derecho a las ayudas nacionales y de la UE relacionadas con los valores ambientales (ver capítulo 4). El sistema de cascada también puede ser empleado para pesca deportiva generando ingresos adicionales.

## *7.4. Del estudio de caso a la explotación: Diseño de un módulo de producción en cascada*

### 7.4.1. Grupo objetivo y requerimientos tecnológicos

La solución propuesta está pensada principalmente para pequeñas granjas de animales que funcionan como explotaciones de producción orgánica ("ecológicas") o dispuestas a mejorar su sostenibilidad y que tengan la posibilidad de incorporar estanques piscícolas. Son privilegiadas las granjas bovinas o porcinas que recogen y fermentan sus purines.

El granjero dispuesto a aplicar la tecnología debe poseer estanques o ser capaces de construir un estanque con un sistema de abastecimiento de agua. El sistema demanda bastante terreno, alrededor de 1 ha de superficie de estanque por cada 150 kg de carbono orgánico derivado del purín. Al mismo tiempo, el sistema debe ser abastecido con flujo de agua que permita mantener un tiempo de retención hidráulica de aproximadamente 45 días.

### 7.4.2. Parámetros de planificación

- El sistema de investigación ha sido diseñado para combinar las ventajas de la crianza de carpas con las necesidades de las explotaciones ganaderas para utilizar los residuos de estiércol (purines).
- El módulo se basa en una configuración de cuatro compartimentos conectados en serie y abastecidos con agua dulce que actúa como portador de los nutrientes al estanque.
- La única fuente de nutrientes y materia orgánica son el estiércol líquido (purín) y el suministro de agua. Estos compuestos, dependiendo de su forma (mineral u orgánica), son responsables del desarrollo de la biomasa en las respectivas partes de la cascada.
- Cada parte de la laguna es responsable de los diferentes procesos que conducen a la utilización de los nutrientes en diferentes niveles tróficos.
- Cuando la biomasa de plancton se desarrolla en las respectivas partes de la cascada, se produce un incremento en la biomasa de peces. Esta producción puede ser una fuente adicional de ingresos.

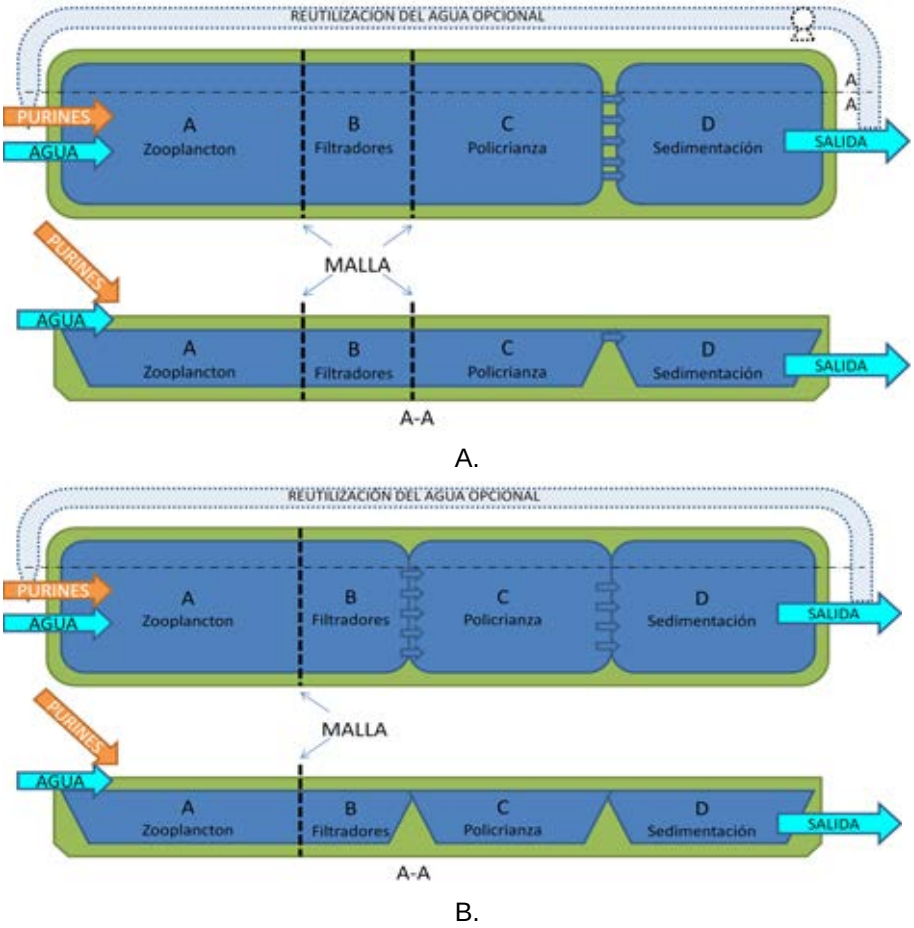



*Figura 21: Posible configuración del sistema de cascada. A: sistema de dos estanques. B: sistema con tres estanques*

Para obtener un rendimiento óptimo del sistema, el diseño de la cascada debe estar constituido por cuatro diferentes compartimentos funcionales y el área de cada uno de ellos debe preservarse con escasa desviación. No hay limitaciones generales relativas a las dimensiones de un compartimento, aunque son preferibles las formas alargadas para mantener el flujo de agua a través del sistema. Éste puede constar de dos o tres estanques, sin embargo, los dos primeros compartimientos se colocarán en el mismo estanque y estarán separados por una malla solamente para permitir el libre paso del zooplancton de un compartimento a otro. Las propuestas de configuración en cascada se presentan en la Figura 21. Las siguientes partes no tienen que estar orientadas en línea

necesariamente (es posible usar tuberías para conducir el agua entre los compartimentos BC y CD).Cada compartimento del sistema utiliza diferentes recursos y desempeña un papel distinto en la cascada:

- **Compartimento A - Zooplancton:** Este compartimiento se abastece directamente con agua y purín. El tiempo de retención hidráulica debe establecerse en dos semanas que se estima suficiente para el desarrollo del plancton. Zooplancton y bacterioplancton se alimentan directamente de la materia orgánica derivada del purín suministrado. Los compuestos biogénicos procedentes del estiércol junto con el agua de abastecimiento y los depósitos del fondo proporcionan los nutrientes para la producción primaria, sin embargo, el exceso de desarrollo de las comunidades zooplanctónicas puede reprimir el desarrollo del fitoplancton. En este caso, la producción primaria neta es mínima o negativa. Este hecho es un factor limitante para la utilización del purín. El oxígeno suministrado con el agua, expresado en moles, debe ser al menos el doble de la cantidad de carbono orgánico recibida con el estiércol para mantener condiciones de oxidación en el estanque. El compartimento de zooplancton no debe incluir peces aunque se pueden admitir algunos bentófagos (hasta varias docenas de kg/ha). Estos animales no deben causar la resuspensión de los sedimentos. Por ello los ciprínidos son menos favorecidos que los juveniles de esturión (se recomienda < 50 kg/ha con animales de 1-3 años de edad). Para controlar el crecimiento de macrófitas, se recomienda poner un lote de < 100 kg/ha de carpa herbívora.
- **Compartimento B – Peces filtradores:** El compartimiento está abastecido principalmente con especies de peces filtradoras. El plancton desarrollado en el compartimiento A transferido con el flujo de agua es utilizado por los peces planctófagos. Se propone incluir un lote compuesto por espátula y/o ciprínidos filtradores. Para utilizar el plancton de forma eficiente se recomienda incluir una población inicial de 150 kg/ha de espátula o carpa cabezona y 150 kg/ha de carpa plateada (0.5-3 kg de peso individual). Los compartimentos A y B deben estar separados por una malla para permitir la transferencia eficiente de plancton. El uso de tuberías reduce la eficacia de la transferencia.
- **Compartimento C - Policrianza:** Esta parte del sistema utiliza los compuestos biogénicos provenientes de los compartimentos precedentes que representan la única fuente externa de nitrógeno y fósforo. La presencia de la carpa común como especie principal mejora el reciclaje de nutrientes y la producción primaria. Por esta razón, el volumen del compartimiento debe proporcionar un tiempo de retención hidráulica de aproximadamente 12 días. Este compartimiento es responsable de la mayoría de la producción de biomasa en la cascada. Las poblaciones de peces cubren todos los nichos y, por tanto, son capaces de aprovechar un amplio espectro de alimentos naturales que se producen en el compartimento. La composición del lote incluye diversas especies de ciprínidos aunque se recomienda introducir la espátula como sustituta de la carpa cabezona (Tabla 37).

| Especies | Peso individual inicial [g] | Densidad inicial [kg/ha] |
|---|---|---|
| Carpa común (K2) | 200 - 300 g | 300 |
| Carpa cabezona O espátula* | 500 - 1 000 g | 150 |
| Carpa plateada | 500 - 1 000 g | 150 |
| Carpa herbívora | 750 - 1 500 g | 100 |

* Se recomienda en sustitución de la carpa cabezona

*Tabla 37: Lote recomendado para el compartimento C*

- **Compartimiento D - Sedimentación:** El último compartimiento del módulo cascada actúa como un estanque de sedimentación. Las poblaciones de peces de los compartimentos precedentes (B y C) causan la resuspensión de los sedimentos del fondo provocando alta turbidez y un incremento en la concentración de sólidos suspendidos. Dado que la materia en suspensión contiene nutrientes y carbono orgánico, el agua efluente no debe ser liberada al ambiente. Esta parte del módulo ofrece buenas condiciones para la sedimentación debido a la falta de peces y al elevado tiempo de retención hidráulica. La superficie del estanque puede ser utilizada para producir plantas o para fines recreativos. La falta de peces y la alta transparencia del agua favorece el crecimiento de plantas acuáticas que utilizan los nutrientes disueltos. En el caso de optar por la producción vegetal deberán desarrollarse equipos y tecnologías apropiadas.

### 7.4.3. Parámetros de operación

Dos factores principales afectan el diseño de la cascada, el flujo de agua y el suministro del purín. Se debe procurar un equilibrio entre la demanda de la explotación para aprovechar el purín y la cantidad de agua y terreno disponible. En los cálculos económicos deberán tenerse en cuenta también los valores ambientales y los beneficios de la sostenibilidad del sistema.

### Abastecimiento y flujo de agua

La eficiencia en el abastecimiento de agua puede ser el principal factor limitante en algunos casos puesto que la capacidad de suministro del purín depende del abastecimiento de agua. Suponiendo una profundidad media del estanque de 1 m, el volumen (área) total del sistema $A_t$ viene determinada por la multiplicación del tiempo de retención hidráulica RT (15 días = 360h) y el flujo de agua posible, q [$m^3$/h]). $A_t$ = RT· q [$m^3$ = ~ $m^2$]

### Suministro de purines

Si el abastecimiento de agua no es el factor que limita el sistema, éste deberá ser dimensionado en función de la materia orgánica derivada de la oferta de abonos orgánicos. Existe una fuerte relación entre el flujo de agua y el carbono orgánico suministrado. La producción primaria en el primer compartimento está muy limitada por el exceso de desarrollo del zooplancton, y, en el peor de los casos, es la única fuente de oxígeno suministrada a la red. Cada gramo de carbono orgánico derivado del purín requiere ~ 2,7 g de oxígeno. Suponiendo que el agua de abastecimiento contiene ~ 7 $gO_2/m^3$, para mantener buenas condiciones oxidativas en el compartimento A, sólo se deben aportar 2.5 g de carbono orgánico/ $m^3$. Así pues, el contenido de carbono orgánico en el purín debe ser determinado previamente al diseño de la cascada. Si el contenido del purín (valor medio) es de 5 $kgC/m^3$ se necesitan aproximadamente 2 000 $m^3$ de agua para tratar 1 $m^3$ de purín. Sin embargo, este valor puede variar dependiendo de la condiciones de luz y temperatura que son los auténticos motores de los procesos hidrobiológicos. A mediados de verano se puede aportar en torno a ~ 20% menos agua (o 20% más de purín) porque aumenta la temperatura, pero como la intensidad de luz decrece, el valor anterior debería mantenerse.

Las relaciones de concentración del C, N y P en el purín se mantienen en un cierto rango. La investigación realizada no manifestó limitaciones relacionadas con las concentraciones de N y P. Por lo tanto, la carga de nitrógeno y fósforo del purín rara vez es factor limitante para el sistema.

## 7.4.4. Resultados esperados

El uso de purín para la fertilización de los estanques de carpas tiene una larga historia, aunque declinó en el tiempo siendo sustituido por abonos agrícolas convencionales. Además, la intensificación de la producción ha reducido la demanda de producción primaria en los estanques y el empleo de alimento natural. La reciente tendencia a la extensificación vuelve a utilizar los residuos orgánicos y los ciclos de producción cerrados. La investigación realizada ha tenido como resultado el desarrollo de una tecnología favorable con el entorno que permite utilizar los residuos de materia orgánica procedente de otras actividades ganaderas (granjas de vacuno y cerdo).

La configuración de cuatro compartimentos tiene buen rendimiento y permite utilizar 25 $m^3$ de purín/ha de área total del sistema de cascada. Sin embargo, la principal limitación del sistema es el abastecimiento de agua, puesto que se requieren importantes volúmenes para transportar los nutrientes a través del flujo en la cascada. Este factor es especialmente limitante si el suministro y el vertido a las aguas naturales están restringidos en algunos países.

El correcto funcionamiento del sistema diseñado se limita a unos 7 meses/año (entre la primavera y el otoño), cuando la temperatura del agua y la intensa radiación solar son suficientes para mantener los procesos hidrobiológicos en niveles adecuados.

# 8. Nuevos métodos de crianza de truchas para reducir los efluentes en las piscifactorías- Estudio de caso en Dinamarca

## *8.1. Introducción – Descripción general del estudio de caso*

La crianza de la trucha arco iris (*Onchorhynchus mykiss*) en Dinamarca se ha desarrollado durante más de 100 años y es la especie dominante en la mayoría de las explotaciones acuícolas danesas. El total de la producción anual es de aproximadamente 33 000 Tm (en agua dulce) y cerca de 7 000 Tm (en agua marina), que corresponde a aproximadamente el 20% de los productos pesqueros daneses para consumo. Sin embargo, el valor de la producción acuícola es de alrededor del 25% del valor total del sector pesquero danés.

La producción danesa de trucha arco iris en agua dulce se realiza en 250 explotaciones aproximadamente. De ellas, alrededor de 200 se gestionan desde hace décadas con sistemas tradicionales de circuito abierto, con abastecimiento de agua a partir de un dique y relativamente escasa utilización de equipos consumidores de energía (bombas, etc.). El agua pasa por la piscifactoría y, finalmente, por gravedad se canaliza a una balsa de sedimentación (sedimentación de las partículas) antes de que sea devuelta al curso de agua. Hasta la década de 1980, la producción danesa de trucha arco iris en agua dulce se realizó sin ningún tipo de tratamiento de aguas residuales.

Con el aumento de la preocupación pública sobre cuestiones ambientales (tales como la descarga de los vertidos de nutrientes desde las granjas de trucha y el impedimento de la movilidad de la fauna a lo largo de los cursos de agua a través de los diques), entró en vigor una nueva legislación medioambiental en Dinamarca (1989). Por consiguiente, cada acuicultor tenía un determinado cupo de alimento y la calidad de los piensos debía cumplir determinadas especificaciones. Se convirtió en obligatorio para todas las piscifactorías de trucha construir una laguna de sedimentación para solucionar la retención de partículas de materia orgánica y los nutrientes del agua antes de su devolución al río. Los acuicultores también estaban obligados a seguir un programa de muestreo de agua con el fin de proporcionar la documentación aproximada de sus vertidos de nutrientes.

Para adaptarse a esta legislación, una parte de las explotaciones tradicionales se desarrollaron empleando tecnologías en mayor o menor grado para depurar el agua, su reutilización, aireación, oxigenación etc. Además, tuvieron lugar avances significativos en el desarrollo de piensos con alta eficiencia de utilización de nutrientes, la tecnología de alimentación, el tratamiento de las aguas, la reducción de la cantidad de agua de abastecimiento y la gestión de la explotación. En consecuencia, la cantidad de peces producidos por kilo de pienso y la reducción de los contaminantes vertidos se ha mejorado significativamente.

Sin embargo, la legislación ambiental fue seguida por una nueva legislación que puso un límite máximo permitido al consumo de agua de los ríos. Según esta nueva legislación, menos de la mitad del flujo (caudal) de agua procedente del río debería pasar por la granja. Para continuar con la producción, se obligó a los acuicultores a hacerse más independientes del curso de agua, lo cual significó incrementar la inversión en nuevos sistemas de tratamiento para su reutilización.

Como consecuencia de los cupos de alimentación restringida, las leyes ambientales, las restricciones al abastecimiento de agua de los ríos y de la Directiva Marco del Agua de la UE, en la que se establecen normas para la calidad del agua en los receptores, se necesita aclarar con urgencia las futuras condiciones de la crianza de truchas en Dinamarca. Durante las discusiones mantenidas entre las organizaciones de productores, las autoridades ambientales y ONG's, nació la idea de las "Piscifactorías Modelo" alrededor del año 2000 (Figura 22).

El concepto de piscifactoría modelo tiene como objetivo reducir la cantidad de agua de abastecimiento y aumentar la retención de nutrientes mediante el uso de la tecnología de recirculación. Algunos de los parámetros más importantes que describen las piscifactorías modelo se resumen en la Tabla 38. Todos los datos se basan en la utilización de 100 Tm de alimento por año.

| ***Parámetro*** | ***Granja Modelo de trucha*** |
|---|---|
| Material del estanque | Hormigón |
| Recirculación del agua (min. %) | 95 |
| Uso de agua (máx. $l \cdot s^{-1}$) | 15 |
| Recogida de lodos de fondo | Si |
| Filtrado para eliminación de partículas | Si |
| Biofiltros | Si |
| Lagunas con plantas acuáticas | Si |

*Tabla 38: Parámetros de las granjas modelo de truchas danesas*

*Figura 22: Una granja modelo de truchas (Ejstrupholm Dambrug). En el fondo a la izquierda se observan las lagunas de plantas construidas en los antiguos estanques de tierra, los canales de entrada y salida (Foto: Aqua-DTU)*

La estrategia de granja modelo de trucha implica importantes ventajas y perspectivas para el medio ambiente:

- Las granjas modelo se han hecho independientes del abastecimiento de los ríos ya que toman el agua de las salidas de la planta de producción y/o de pozos cercanos reciclando el agua (hasta un 97% el grado de recirculación).
- El consumo de agua entrante se redujo alrededor de 0,15 l/s/Tm pienso o aproximadamente 3 900 l por kg de peces producidos, correspondiente a 1/13 de las granjas tradicionales que utilizan el flujo a través (circuito abierto)
- Libre paso para la fauna silvestre en todo el curso de agua.
- Gracias a los dispositivos de limpieza en el interior de la granja y en la laguna de plantas acuáticas es posible eliminar una cantidad significativa de sustancias fácilmente degradables (DBO), el total de sustancias orgánicas (DQO), fósforo, amoníaco-N y el total de N.
- El empleo de las lagunas de plantas acuáticas para producir especies de valor comercial o comestibles (berro) como un elemento integrado en las piscifactorías modelo puede proporcionar beneficios adicionales.
- Estabilidad en las condiciones de crianza (calidad del agua, etc.)
- Posible aumento de la producción de truchas, sin el correspondiente aumento en el impacto ambiental.

Sin embargo, la aplicación de la tecnología de las piscifactorías modelo requiere amplios conocimientos y experiencia relacionados con:

- Necesidades biológicas de la especie que se cría
- Diseño y la función de cada dispositivo de la piscifactoría (filtración mecánica, biofiltros, aireadores, bombas etc.).
- Implicaciones de la producción de peces utilizando la tecnología de recirculación
- Experiencia cualificada en piscicultura y en el funcionamiento de sistemas que utilizan la tecnología de recirculación.
- Calidad del agua adecuada.
- Alta calidad del alimento de los peces y estrategias de alimentación apropiadas.

Desde el punto de vista ambiental y comercial, las piscifactorías modelo tienen éxito. Algunos acuicultores han constatado tiempos de producción más bajos y además de la gran reducción de los vertidos de nutrientes, se facilita la migración de la fauna en las inmediaciones del curso de agua. Sin embargo, los sistemas necesitan ser optimizados, en particular, con respecto a la reducción de los vertidos de nitrógeno. De esta forma, el estudio de caso danés SustainAqua investigó la optimización de diferentes aspectos o módulos de las granjas modelo de trucha:

1. Piensos y alimentación - modelo del impacto ambiental.
2. Modelo del consumo de energía.
3. Cultivo de plantas ornamentales en los estanque de tierra.
4. Producción de otras especies de peces en los estanques.

## *8.2. Piensos y alimentación – Impacto ambiental en las piscifactorías modelo de trucha*

La alimentación es el parámetro más importante en relación al crecimiento de los peces, el impacto ambiental y los costes de producción. Estimar el rendimiento medioambiental de las explotaciones modelo es fundamental para hacer una cuantificación precisa de la contribución de los piensos en el agua de salida (efluente), la llamada "contribución de la producción" antes de que el agua pase a los dispositivos de tratamiento y limpieza de la piscifactoría.

Los distintos dispositivos de limpieza aplicados en las piscifactorías modelo tienen diferentes eficiencias dependiendo de la magnitud y la composición de los residuos que reciben. Por lo tanto, se necesita desarrollar un modelo de cálculo para poder predecir el comportamiento medioambiental de un sistema en términos de componentes del vertido - nitrógeno (N), fósforo (P) y materia orgánica - transferido al curso de agua. El modelo deberá considerar los parámetros de producción (tipo y cantidad de alimento, la producción de peces, etc.), los parámetros de funcionamiento (temperatura, contenido de oxígeno, etc.) y configuración del sistema (componentes, caudales y dimensiones)

### 8.2.1. Descripción general de la innovación

La forma física (disuelta, suspendida o particulada) y la estructura química (N, P, $DBO_5$ [demanda biológica de oxígeno], DQO [demanda química de oxígeno]), de los componentes del vertido pueden ser evaluados en experimentos de laboratorio. Con base en los resultados obtenidos, se desarrolló un modelo predictivo (módulo de cálculo global) sobre la contribución directa de los residuos procedentes de los diferentes tipos de piensos comerciales aplicados en los sistemas de acuicultura intensiva. El modelo de laboratorio es un factor importante para determinar con precisión el modelo de cálculo global (Figura 23).

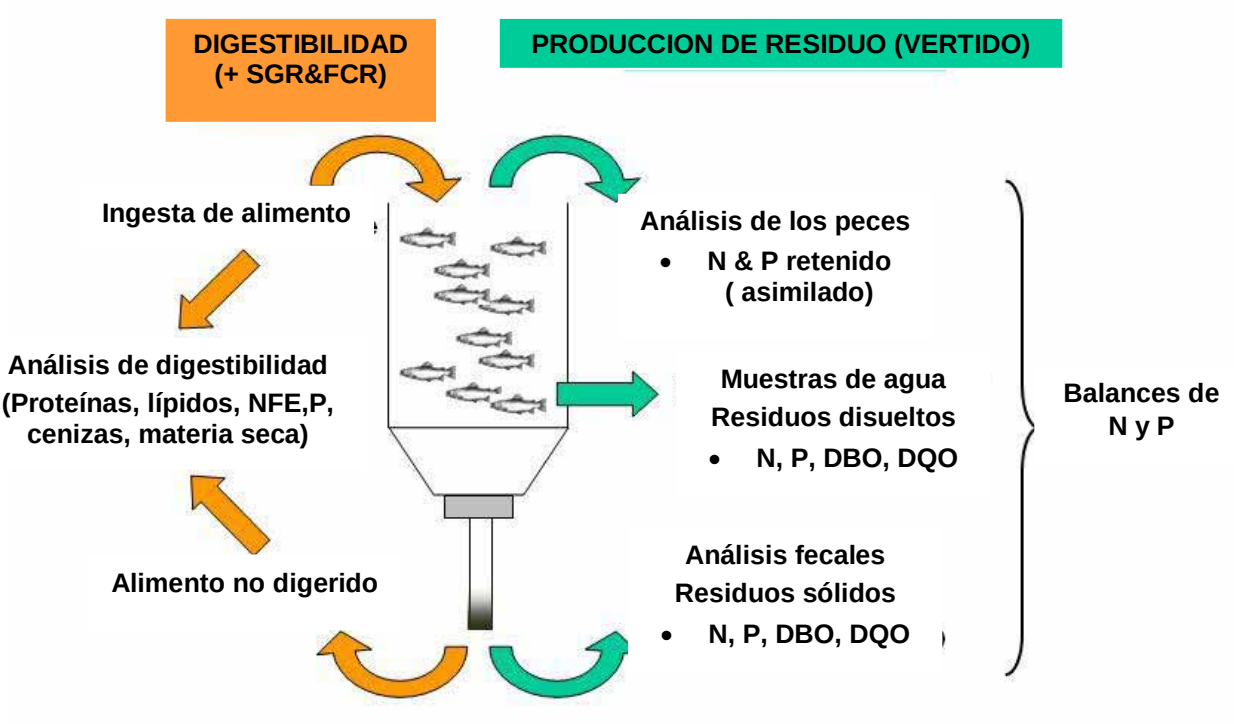



*Figura 23: Configuración para la evaluación de la forma física y estructura química de los componentes del residuo y de la contribución directa de los tipos de piensos comerciales más importantes que se emplean en los sistemas de acuicultura intensiva.*

### 8.2.2. Principios del módulo

El modelo de cálculo se basa principalmente en los datos obtenidos mediante un programa de documentación y medición realizado en ocho "piscifactorías modelo" de trucha en Dinamarca durante el período 2005-2007. Estas fueron equipadas con dispositivos de retirada de lodos, biofiltros y humedales construidos y, en algunas de ellas, se instalaron además microtamices. Se obtuvieron datos de consumo de

agua y la concentración de nutrientes en varios puntos de muestreo dentro de la granja de truchas, el aporte de piensos, los ingredientes utilizados en los piensos e incremento de biomasa de todas las explotaciones y los principales resultados fueron integrados en el modelo de cálculo global.

Además se utilizaron en el modelo datos de las explotaciones tradicionales de trucha en Dinamarca (datos de Al-og Landskabsstyrelsen, 2007). Normalmente, estas granjas no tienen las instalaciones que caracterizan las explotaciones modelo pero de acuerdo con la legislación danesa (Bekendtgørelse om Ferskvandsdambrug) estas piscifactorías también están obligadas a instalar una balsa de sedimentación justo después de las unidades de producción.

Mediante la integración de los dos tipos de datos en el modelo de cálculo (piscifactorías modelo y tradicionales con menos tecnología), éste ofrece la posibilidad de obtener estimaciones para los vertidos procedentes de ambos tipos de explotaciones. Después de la integración de los datos, el modelo ha sido verificado y ajustado en consecuencia, a fin de optimizar la correlación con las medidas reales de descarga. De este modo se ha objetivado optimizar el modelo tanto como era posible en este momento.

Los experimentos de laboratorio se llevaron a cabo en 18 estanques termoplásticos de circuito abierto y, con un volumen de 189 l. Los tanques se montaron en un sistema modificado de Guelph en el cual la tercera parte inferior del tanque, con forma cónica, fue separada del resto por una rejilla (Figura 23). Este diseño permite una rápida sedimentación y la recogida de partículas fecales inalteradas en frío, parcialmente separadas en columnas de sedimentación.

Ejemplares de trucha arco iris (peso medio 50 g) obtenidos de piscifactorías locales danesas se trasladaron a las instalaciones de investigación de DTU-Aqua en Hirtshals, Dinamarca. En los experimentos se registraron datos de consumo de alimento y las heces se obtuvieron de las columnas de sedimentación siendo vaciadas antes de la alimentación diaria. Las muestras fecales fueron almacenadas a -20 °C hasta el análisis de proteínas, lípidos, extracto libre de nitrógeno (NFE), cenizas, fibra y P.

La composición media de los tres tipos de piensos utilizados se muestra en la Tabla 39.

| | |
|---|---|
| **Proteína:** | 46.3 % |
| **Lípidos:** | 27.5 % |
| **Extracto libre de nitrógeno (NFE):** | 12.6 % |
| **Cenizas:** | 6.9 % |
| **Fibra:** | 1.4 % |
| **Materia seca:** | 94.6 % |
| **Fósforo:** | 0.98 % |
| **Energía:** | 23.8 kJ· g pienso |

*Tabla 39: Composición del alimento*

Se tomaron muestras para determinar la contribución de N y P (en partículas y disuelto/suspendido respectivamente). La retención de N y P en los peces se determinó mediante el análisis de la concentración al inicio y al final de todo el experimento.

Se configuró un experimento específico para determinar la contribución de la $DBO_5$ y la DQO en los residuos disueltos y en partículas.

El coeficiente de digestibilidad aparente (ADC) de los nutrientes y minerales introducidos con la dieta se ha calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$ADC = [(consumido_i - excretado_i) / consumido_i] \times 100 \qquad \text{ec. 1}$$

donde i es el porcentaje de proteínas, lípidos, NFE, P, ceniza o materia seca.

La tasa de crecimiento específico (SGR,% $d^{-1}$) se calculó sobre la base del incremento de biomasa en los tanques, suponiendo que los juveniles crecen exponencialmente en un tiempo experimental relativamente corto:

$$SGR = Ln(W(t_i)/W(t_0))/(t_i - t_0) \times 100 \qquad \text{ec. 2}$$

donde W ($t_i$) y W ($t_0$) fueron la biomasa al final ($t_i$) y al inicio ($t_0$) de la prueba y ($t_i$ - $t_0$) fue la duración en días.

El índice de conversión del alimento (FCR, g $g^{-1}$) se calculó sobre la base del incremento de biomasa en los tanques, la cantidad de alimento suministrada y el registro del residuo de alimento durante los 9 días de alimentación de acuerdo a:

$$FCR = alimento\ consumido\ (t_i - t_0) / incremento\ de\ biomasa\ (t_i - t_0) \qquad \text{ec. 3}$$

Los datos fueron sometidos a un modelo lineal utilizando el programa Sigma Stat for Windows Versión 3.10. Se utilizó el test de Holm-Sidak para la comparación de duplicados con tratamientos de dieta significativamente diferentes. La probabilidad P <0,05 fue considerada significativa en todos los análisis.

### 8.2.3. Evaluación de los indicadores de sostenibilidad seleccionados en SustainAqua

#### Reducción de la descarga de nutrientes

Los valores medios de la digestibilidad (ADC) fueron 93.5% (proteínas), 91.2% (lípidos), 66.9% (NFE) 51.9% (ceniza), y 64.2% (fósforo). La tasa de crecimiento específica (SGR) fue en promedio 1.97% $d^{-1}$ y el valor medio del índice de conversión (FCR) fue 0.76 (kg de pienso/kg de peso). La retención de nitrógeno y fósforo por los peces fue, de media, 49.1% y 57.6%, respectivamente.

| Componente de la dieta | BioMar Ecolife 20 | Aller Aqua 576 BM XS | Dana Feed Dan-Ex2844 | $F_{2,6}$ | *P* |
|---|---|---|---|---|---|
| Proteínas | 93.9 ± 0.4[a] | 92.8 ± 0.2[b] | 93.7 ± 0.3[a] | 10.81 | 0.010 |
| Lípidos | 91.4 ± 0.6[ab] | 88.4 ± 1.8[a] | 93.7 ± 1.0[b] | 14.22 | 0.005 |
| NFE | 66.6 ± 1.1[a] | 67.2 ± 0.9[a] | 67.0 ± 1.0[a] | 0.36 | 0.711 |
| Cenizas | 46.7 ± 1.8[a] | 57.2 ± 0.4[b] | 51.7 ± 0.8[c] | 62.69 | <0.0001 |
| Fósforo | 60.9 ± 0.7[a] | 71.0 ± 0.9[b] | 60.6 ± 0.7[a] | 177.83 | <0.0001 |
| Material seca | 84.7 ± 0.6[a] | 84.4 ± 0.5[a] | 85.6 ± 0.6[a] | 4.09 | 0.076 |
| Materia seca calculada [2] | 85.7 ± 0.5 | 85.2 ± 0.5 | 86.3 ± 0.6 | - | - |

*[1)]Los valores dentro de las filas que no comparten un superíndice común fueron significativamente diferentes (ANOVA, Tukey HSD, P <0,05).*
*[2)] La digestibilidad de materia seca se calculó como la suma de las mediciones de la digestibilidad de las proteínas, los lípidos, NFE y la ceniza.*

*Tabla 40: Coeficientes de digestibilidad aparente (ADC) de proteínas, lípidos, Extracto libre de nitrógeno (NFE), cenizas, fósforo y materia seca (MS) (%, media ± estd. Dev., N = 3) de las dietas, así como el cálculo de la digestibilidad de la materia orgánica[1].*

Los cálculos de las contribuciones de la DQO y $DBO_5$ mostraron que una media del 55% del total del vertido $DBO_5$ se recuperó como residuo disuelto/suspendido, mientras que un promedio de 45% se recuperó como partículas. De media, el 71% de la DQO total fue recuperada en forma particulada mientras que el 29% fue en forma disuelta/suspendida. La razón entre $DBO_5$/DQO fue 0,51.

La mayoría de los residuos de N-total se recuperaron como disueltos/suspendidos (88%), mientras que un promedio de 12% se recuperó en forma particulada. Casi todos los residuos de fósforo-P se recuperan en forma particulada (en media 98%), mientras que sólo una fracción muy pequeña (2% aproximadamente) se recuperó como disuelta/suspendida.

### 8.2.4. Factores de éxito y limitaciones

Los resultados de los experimentos de laboratorio son datos importantes para la precisión del modelo de cálculo global. Mediante la integración de datos en el modelo de cálculo de los dos tipos de granjas, el modelo ofrece la posibilidad de estimar los vertidos que se producen en instalaciones con diferentes niveles tecnológicos. Sin embargo, cabe señalar que a fin de obtener estimaciones aceptables al utilizar el modelo de cálculo, es necesario que se cumplan los siguientes requisitos previos:

1 La especie a criar debe ser la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum).
2 Los piensos utilizados deberán ser de buena calidad y contener un nivel suficiente de vitaminas y minerales para proporcionar buen crecimiento y salud. La digestibilidad de las proteínas y los lípidos no deberá ser inferior a 85%.
3 Si la piscifactoría opera con recirculación, el agua debe permanecer al menos 18.5 horas en la unidad de producción y al menos 20 horas en los humedales.
4 Si la explotación está equipada con filtros mecánicos (filtros de tambor o similares) y/o filtros biológicos, los filtros deberán tener dimensiones adecuadas a fin de optimizar el tratamiento de las aguas.
5 El aporte de la alimentación diaria no debe superar los 800 kg.
6 Siempre que se cumplan estos requisitos previos, el modelo de cálculo global sirve como una herramienta para la estimación de los vertidos de los principales nutrientes en las piscifactorías de trucha.

Sin embargo, cabe destacar que el modelo de cálculo sólo sirve como una herramienta para estimar la descarga de nutrientes de las explotaciones de trucha, es decir, el modelo no se puede utilizar para la documentación de los vertidos.

## *8.3. Consumo de energía en las granjas de trucha modelo*

Las piscifactorías modelo de trucha dependen del transporte de agua en la granja (recirculación), así como de la aireación / oxigenación del agua debido al bajo consumo de agua del río. Los gases como el $CO_2$ y $N_2$, se suprimirán del agua de producción.

La cuestión más importante en las granjas modelo de trucha es la aplicación de la tecnología de recirculación, es decir, el bombeo de agua y su purificación para reducir al mínimo el consumo e impacto ambiental. Esta tecnología requiere de energía y, por lo tanto, es un parámetro importante que tiene que ser considerado para una producción sostenible.

### 8.3.1. Descripción general de la innovación

El bombeo de agua en las granjas modelo de trucha así como la inyección de aire/oxígeno en el sistema requiere energía. Por lo tanto, es importante evaluar las necesidades de oxígeno durante la producción y ajustar el nivel de inyección/consumo de energía de acuerdo a ello. Las necesidades de aire/oxígeno son mayores durante la alimentación y la digestión, es decir, durante los procesos metabólicos. Además, las necesidades de oxígeno dependen del tamaño del pez y del lote de peces existente.

### 8.3.2. Principios del módulo

Las tecnologías actuales para la aireación del agua son:

- Balsa de aireación.
- Difusores de baja presión.
- Aireador de superficie.
- Filtro percolador (de goteo).
- Bomba elevadora de aire.

Para una eficiente oxigenación/desgasificación deberá tener en cuenta que:

- La solubilidad de los gases/saturación de agua se incrementa con la presión, es decir, el agua expuesta a presión puede contener más oxigeno/$CO_2$ que en la superficie.
- Cuanto mayor sea la superficie de contacto entre el gas y la fase acuosa, más rápido se disolverá el gas en el agua, es decir, burbujas de aire creadas por los difusores con diferentes tamaños de orificios que, a su vez, afectan a la magnitud de presión.

*Balsas de aireación*

Las balsas de aireación pueden ser concebidas como simples difusores situados a unos 50 cm por encima del fondo de una unidad de producción con una adecuada proporción entre la longitud y la profundidad de la balsa para garantizar la circulación adecuada.

*Difusores de baja presión*

Un difusor de baja presión puede tener varios tubos difusores montados sobre un marco de acero. El difusor tiene una relativamente baja presión y moderada profundidad de agua, unos 80 cm. La eficiencia de oxigenación es buena a bajas saturaciones de oxígeno y adecuada para la desgasificación debido a la baja profundidad de la inyección de aire.

*Aireadores de superficie*

Los aireadores superficiales se utilizan a menudo en las granjas tradicionales. El agua se lanza al aire creando una buena superficie de contacto con el aire y una buena mezcla en el estanque. Los aireadores de superficie son eficientes para mantener los peces vivos en condiciones de bajo oxígeno y para la desgasificación.

*Filtro percolador (de goteo)*

En un filtro percolador, el agua se bombea a través de una red de distribución situada en la parte superior. Desde allí el agua circula a través de un medio (por ejemplo Bio-Bloques) que proporciona una gran superficie de contacto para la aireación ($O_2$) y desgasificación ($N_2$/$CO_2$). Sin embargo, el filtro de goteo exige energía (de bombeo) debido a la altura de elevación (frecuentemente al menos 1 m).

*Bomba elevadora de aire ("Bomba Mammut")*

El método más común para el transporte y aireación del agua en las granjas modelo de trucha es el uso de bombas elevadoras de aire (airlifts). Su función es doble: bombear y airear el agua. La bomba elevadora de aire consiste en un pozo/hueco dividido (Figura 24), en el cual de un lado se han instalado una serie de difusores (inyección de aire a presión mediante compresores). La fuerza motriz de una bomba elevadora de aire es la diferencia en el peso específico entre el agua y el aire (de un lado) y el

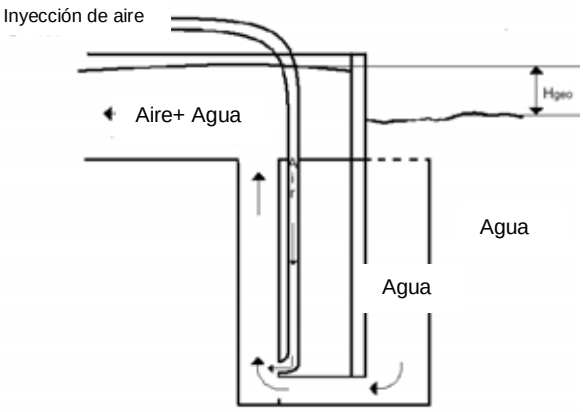



*Figura 24: Esquema de una bomba elevadora de aire (modificado de Lokalenergi, 2008).*

agua (del otro lado).

El diseño de la bomba elevadora de aire determina su capacidad para gestionar el flujo de aire (evitando el colapso) como el máximo cabezal. El cabezal óptimo podría ser unos 10 cm en una profundidad de agua de 2 m.

### 8.3.3. Evaluación de los indicadores de Sostenibilidad seleccionados por SustainAqua

#### Consumo energético

La inyección de aire en los sistemas acuícolas es energía requerida y, por lo tanto, es importante evaluar las necesidades de aire (oxígeno) durante la producción y ajustar el nivel de inyección/consumo de energía de acuerdo a ellas. Las necesidades de aire/oxígeno son mayores durante la alimentación y la digestión, es decir, durante los procesos metabólicos. Además, las necesidades de oxígeno dependen del tamaño del pez y del lote de peces existente.

Sin embargo, para conseguir la utilización óptima de aire inyectado deben ser consideradas las relaciones entre el flujo de aire, principio de aireación, elección del tipo de difusor y profundidad del agua para obtener:

- Gran superficie de contacto entre las burbujas de aire y el agua.
- Máximo tiempo de retención de las burbujas de aire en la columna de agua antes de llegar a la superficie.
- Menor presión posible/pérdidas de presión en el sistema.

El factor más importante para la óptima eficiencia de la bomba elevadora de aire es la adecuada relación entre el caudal del aire y del agua. Si se inyecta demasiado aire en relación al flujo de agua, la bomba puede perder eficiencia y se colapsa. Los experimentos mostraron una relación directa entre el consumo de energía y la eficiencia de la aireación del agua. Sin embargo, el consumo de energía de la bomba elevadora de aire en relación con la presión de aire resultante en el sistema necesita mayores consideraciones a fin de optimizar el consumo de energía. En consumo de energía medio se estima en 1,7 kWh/kg de pescado producido.

La aireación requiere energía para comprimir el aire, y el coincidente aumento de la temperatura revela una pérdida de energía, es decir, mayores costos energéticos. Durante el experimento se midió el consumo de energía por la bomba elevadora de aire y resulto ser 5 802 W para comprimir el aire y un total de 10 199 W incluyendo la energía para calentar el aire.

En comparación, el correspondiente consumo de energía de una típica hélice sumergida la bomba de elevación de agua hasta 0,4 metros y una eficacia total, $\eta$total = 0,4 puede calcularse como: Q x dp/$\eta$total, donde Q = 1 300 $m^3$/h = 0.362 $m^3$/s; MVS dp = 0,25 = 2 500 Pa, es decir, 0.362 x 2 = 500/0,4 = 2 260 W. Los cálculos demostraron que una bomba de hélice sumergida podría mover el agua mediante el uso de sólo ¼ de la energía consumida por el transporte aéreo. Sin embargo, utilizando una bomba de hélice requiere energía para la aireación por un método alternativo.

### 8.3.4. Factores de éxito y limitaciones

Resumiendo los resultados de las investigaciones sobre consumo de energía en tres diferentes piscifactorías modelo de truchas, se puede concluir lo siguiente:

- El correcto funcionamiento de la bomba elevadora de aire depende en gran medida de la relación equilibrada entre el caudal del aire y del agua, es decir, la tasa de inyección de aire se ajustará a la del flujo de agua.
- Existe una relación lineal entre el consumo de energía por la inyección de aire y la consiguiente concentración de oxígeno en el agua después de la aireación en la bomba elevadora de aire.
- Los costos energéticos del transporte interno de agua por las bombas de hélice sumergidas fueron ¼ del costo utilizando la bomba elevadora de aire.
- Sin embargo, aunque el transporte del agua con una bomba de hélice sea más barato que con la bomba elevadora de aire, los costes energéticos para la aireación por otro método (balsas de aireación) deben ser añadidos al cálculo.
- Bajos flujos de aire proporcionan mayor eficiencia de aireación en relación al coste que altos flujos de aire.
- Añadir pequeñas burbujas de aire de acuerdo con el contenido de oxígeno deseado, es decir, la inyección de flujo y largo tiempo de contacto entre el aire y agua son importantes para la rentabilidad de la aireación.
- Cuanto mayor sea el nivel de inyección de aire en la columna de agua, mayor es el flujo de aire que debería ser suministrado para obtener una cantidad dada de oxígeno por unidad de tiempo.

- Los costos energéticos para la aireación fueron significativamente dependientes del método de aireación, es decir, de la geometría del difusor.
- La pérdida de energía debido al gran aumento de la temperatura mediante el uso de sopladores rotativos debe ser considerada.
- El coste de un proceso de aireación eficiente deberá ser controlado y gestionado de acuerdo a las condiciones de explotación (variación diurna, estación, etc.)
- El empleo de bombas de hélice en sustitución de las bombas de elevación de aire deberá considerar el coste de inversión así como las soluciones para garantizar la fiabilidad operacional.
- Aparentemente, parece más fácil mejorar los costos energéticos en el transporte del agua que para la aireación.

## *8.4. Cultivo de plantas acuáticas en las lagunas de las granjas modelo*

En relación a las piscifactorías modelo de trucha, los anteriores estanques de tierra a menudo se dejan interconectados con los antiguos canales que conforman una laguna con plantas silvestres.

Después del tratamiento en los dispositivos de limpieza de la explotación (trampas de lodos, filtros biológicos), el agua pasa lentamente a través de la laguna para que las plantas aprovechen los excedentes de nutrientes como fase final del tratamiento antes de retornar al curso de agua. Las lagunas de plantas son importantes para la conversión de nitratos, DBO y la precipitación de la materia orgánica y fósforo. Sin embargo, las lagunas no son eficientes en la conversión de amoníaco a nitrato. Debido a la conversión de la materia orgánica, se pueden dar condiciones anaeróbicas en el fondo y favorecer la desnitrificación, es decir, la conversión de nitratos en nitrógeno gaseoso. Por lo tanto, las condiciones anaeróbicas en las lagunas pueden promover la eliminación de la materia orgánica y nitratos.

### 8.4.1. Descripción general de la innovación

La vegetación en las lagunas es de gran importancia para el proceso de depuración y se ha investigado en Ejstrupholm. Las principales especies de plantas observadas en las lagunas de la granja modelo de truchas de Ejstrupholm con un grado de cobertura del 80% fueron la grama de ciempiés o hierba de maná (*Glyceria spp*.), lenteja de agua (*Lemna spp.)*, barbona o tomillo de agua (*Hydrilla verticillata*), algas filamentosas y la pamplina o hierba gallinera (*Stellaria genus, Stellaria spp*.).

Las plantas son interesantes en relación con la eliminación de nutrientes y la transformación o conversión de los mismos. Sirven como superficie para el desarrollo de microorganismos (biofilm), participan en la conversión del amoníaco y asimilan el fósforo y el nitrógeno disuelto que convierten en biomasa vegetal. Por último, las plantas influyen en las corrientes de agua y facilitan la sedimentación de las partículas.

Sin embargo, aparte de su función de reducir el impacto medioambiental en la producción de truchas, las lagunas pueden ser utilizadas para la producción secundaria de especies de alto valor que podrían suponer un ingreso adicional a la producción de truchas. El mercado potencial de diferentes plantas comerciales como subproductos de la actividad acuícola está siendo investigado.

### 8.4.2. Principios del módulo

Las principales especies estudiadas fueron plantas perennes ornamentales, que además de su alto potencial para la absorción de nutrientes podría obtener precios razonables en el mercado. Las nueve especies investigadas se muestran en la Tabla 41. Las investigaciones se realizaron en diferentes lugares de la balsa de la granja modelo Ejstrupholm en Dinamarca. Los lugares seleccionados se caracterizaron por diferencias en el flujo de agua, carga de nutrientes y parámetros de calidad.

Debido a la densa vegetación nativa, que se desarrolla muy bien en las orillas y en los estanques, se utilizaron marcos flotantes de poliestireno especiales para el cultivo de las plantas acuáticas (Figura 25).

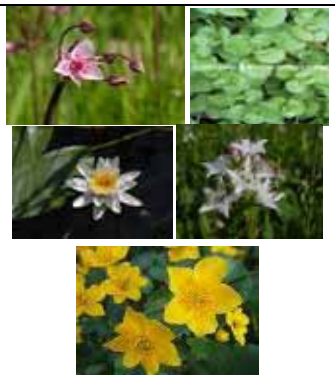
| Familia | Especie | Nombre común | |
|---|---|---|---|
| Iridaceae | *Iris pseudacorus* | Lirio amarillo | |
| | *Iris versicolor* | Lirio multicolor | |
| | *Iris sibírica* | Lirio de siberia | |
| | *Iris kaempheri* | Lirio japonés | |
| Butomaceae | *Butomus umbellatus* | Junco florido |  |
| Nymphaecea | *Nimphaea alba* | Nenúfar | |
| Brassicaceae | *Nasturtium officinale*), | Berro | |
| Menyanthaceae | *Menyanthes trifoliata* | Trébol de agua | |
| Ranunculaceae | *Caltha palustris* | Hierba centella | |

*Tabla 41: Plantas ornamentales investigadas en la granja modelo de Ejstrupholm (Foto: Aqua-DTU)*

*Figura 25: Método de jardín flotante aplicable a los estanques no utilizados en las granjas modelo de trucha (Foto: Aqua-DTU)*

### 8.4.3. Factores de éxito y limitaciones

Las lagunas (humedales construidos) representan un buen potencial para reducir los vertidos de nutrientes de las granjas de peces. La eliminación de nitrógeno total fue más de 1 g por $m^2$ y día. Sin embargo, el tiempo de retención hidráulica es importante para la eficacia de la eliminación de nutrientes. El estudio mostró que la vegetación natural establecida en la laguna plantea problemas para el desarrollo adecuado de las plantas probadas en los estanques y canales. Por lo tanto, se requiere inicialmente una gran cantidad de mano de obra para desbrozar el terreno. De las especies analizadas se ha comprobado que las Iridáceas son las más tolerantes, resistentes y fáciles de cultivar pero incluso éstas fueron desplazadas por especies de crecimiento más rápido en las laderas y riberas de las lagunas. Además, una parte importante de las plantas (rizomas) fueron depredadas por ratones de agua.

El berro (*Nasturtium officinale*), el trébol de agua (*Menyanthes trifoliata*) y la hierba centella (*Caltha palustris*) que pueden propagarse rápidamente, han crecido en uno de los antiguos estanques de tierra en la sección media de la laguna. Algunas de estas especies sobrevivieron y crecieron aunque las tasas de crecimiento

fueron inferiores a las previstas debido a las condiciones anaeróbicas en los estanques de tierra y a la predación por las ratas de campo.

Las plantas estudiadas se propagan fácilmente por rizomas o propágulos. Además de la reproducción vegetativa, las especies de lirios producen semillas. No obstante, las semillas de plantas ornamentales pueden tener características genéticas distintas de las multiplicadas de forma vegetativa lo cual puede repercutir negativamente en la venta debido a las diferencias fenotípicas (es decir, híbridos; color de las flores, etc.)

El concepto de jardín flotante fue relativamente exitoso y los marcos de poliespán pueden ser incorporados en unidades mayores que abarcan cientos de metros cuadrados. Sin embargo, las piscifactorías de trucha en Dinamarca se caracterizan por numerosos estanques de tierra abandonados, que son relativamente pequeños y estrechos. En consecuencia, las masas de agua en esas zonas están completamente cubiertas por la vegetación autóctona, que puede ser una ventaja para la retención de nutrientes pero que dificulta la introducción de unidades flotantes de mayor tamaño.

Con el fin de optimizar la producción comercial de plantas en la laguna de la granja modelo de Ejstrupholm, se reestructuraron partes de la laguna. Esto significó establecer grandes áreas de baldío (someras y libres de la vegetación existente) para a continuación utilizar el concepto de jardín flotante o plantar directamente en los estanques dependiendo de la especie.

Algunos aspectos de la construcción de los estanques para el cultivo de plantas acuáticas también deben tenerse en cuenta para el desarrollo de las piscifactorías futuras. Estas consideraciones implican también el uso combinado de plantas ornamentales y vegetación natural más densa como el carrizo (*Phragmites australis*) o de otras plantas con posible uso bioenergético. Estas plantas pueden contribuir a aumentar los bajos niveles de oxígeno en los estanques. En la actualidad la mayoría de las lagunas en la planta de Ejstrupholm tienen condiciones anaeróbicas, lo que reduce el crecimiento de las plantas comerciales. Además, cabe señalar, que unidades más grandes de marcos flotantes pueden obstaculizar el transporte de oxígeno / difusión y pueden crear condiciones anaeróbicas en las raíces.

El estudio mostró un buen crecimiento de algunas especies de plantas acuáticas en el estanque, especialmente las pertenecientes a la familia Iridaceae. Sin embargo, el potencial de ingresos de la venta de las plantas puede verse comprometido por los costes iniciales de preparación del terreno (desbroce) y más tarde en la cosecha.

## *8.5. Crianza de otras especies de peces en las lagunas de las granjas modelo*

Después del tratamiento en los dispositivos de limpieza de la explotación (trampas de lodos, filtros biológicos), el agua pasa lentamente a través de la laguna para que las plantas aprovechen los excedentes de nutrientes como fase final del tratamiento antes de retornar al curso de agua.

### 8.5.1. Descripción general de la innovación

Aparte de su función de reducir el impacto medioambiental de la producción de truchas, las lagunas también pueden ser utilizadas para la producción secundaria de peces juveniles con alto valor comercial que podrían ofrecer un ingreso adicional.

La idea general era incrementar la rentabilidad de la explotación mediante la optimización de los procesos sin perjudicar la producción principal de la trucha y el funcionamiento general del sistema. Además, se suponía que la producción se basaría exclusivamente en las condiciones prevalecientes en la laguna, sin ningún tipo de abastecimiento externo (por ejemplo, alimentación).

### 8.5.2. Principios del módulo

La producción extensiva de larvas de peces y juveniles debe basarse en la producción natural de zooplancton en las lagunas. En consecuencia, en un principio se investigó si la producción de zooplancton en diversos lugares de la laguna era suficiente para proporcionar alimento a juveniles de perca y lucioperca.

Con base en los resultados de la toma de muestras de zooplancton, se concluyó que las lagunas eran poco adecuadas para la cría de larvas de peces. Sin embargo, la producción de juveniles en jaulas de red (incluidos los lugares disponibles de la laguna) pueden ser un método atractivo para producir diferentes especies de peces que se comercialicen para engorde en otras instalaciones, acuarios, lagos, etc.

Para investigar el rendimiento de las jaulas, se realizaron experimentos en la laguna de la granja modelo de Ejstrupholm y en dos lagos, en los cuales se consideró que la calidad del agua y la producción de zooplancton eran más favorables para los alevines. Se utilizaron ejemplares de perca y lucioperca en estos experimentos.

### 8.5.3. Evaluación de los indicadores de sostenibilidad seleccionados en SustainAqua: nutrientes, agua y eficiencia en la utilización del espacio

Los resultados de la toma de muestras de zooplancton durante la primavera (temporada larvaria) mostraron que las concentraciones de plancton son muy variables y, en general, por debajo del nivel que se consideraba necesario para la supervivencia y crecimiento de las larvas y alevines. Además, la calidad del agua era inestable con períodos de bajadas de oxígeno y la aparición de sulfuro de hidrógeno tóxico, claro indicador de condiciones anóxicas. Por lo tanto, las lagunas fueron consideradas poco aptas para la cría de larvas.

No obstante, se realizaron experimentos en jaulas con alevines de perca y lucioperca. Los resultados mostraron que la producción de alevines en la laguna de la planta de la granja modelo de Ejstrupholm no era viable debido a los bajos niveles de oxígeno y a una alta producción de algas filamentosas. La aireación del agua dentro de las jaulas no fue suficiente para aumentar el contenido de oxígeno a niveles aceptables.

Sin embargo, los experimentos en los lagos han demostrado que las larvas de peces pueden ser criadas desde su nacimiento hasta un tamaño de 2-3 cm (un mes) en jaulas sin intervención humana durante la producción.

## *8.6. Resumen- Factores de éxito y limitaciones*

Resumiendo, los resultados del estudio de caso de las granjas modelo de trucha danesas han proporcionado información valiosa y herramientas relacionadas con:

- La reducción de nutrientes y pérdida de materia orgánica, es decir, la reducción del impacto ambiental.
- La optimización de los costes energéticos.
- La sostenibilidad del cultivo de plantas acuáticas y el crecimiento adicional de alevines de peces en las áreas de lagunado.

En concreto, se pueden indicar los siguientes factores que limitan el éxito:

- Las lagunas destinadas a las plantas acuáticas en la granja de Ejstrupholm no eran viables debido a los bajos niveles de oxígeno y alta producción de algas filamentosas. Sin embargo, los experimentos realizados en paralelo en otras lagunas si han demostrado que las larvas de peces pueden ser criadas desde su nacimiento hasta un tamaño de 2-3 cm en jaulas de red sin intervención humana en la producción.
- El correcto funcionamiento de la bomba elevadora de aire depende en gran medida de una relación equilibrada entre el caudal del aire y del agua, es decir, la tasa de inyección de aire se debe ajustar a la del flujo de agua.
- Los costos energéticos para la aireación dependen significativamente del tipo de aireador utilizado, es decir, de la geometría del difusor.
- La pérdida de energía debido al gran aumento de temperatura en los sopladores rotativos deben ser considerados.
- El coste eficiente del proceso de aireación debe ser supervisado y gestionado de acuerdo con las condiciones de la explotación (variación diurna, temporada etc.).
- Incremento en la liberación de $CO_2$

Los principios generales de las granjas modelo de trucha utilizando el concepto de tecnología de recirculación pueden ser adaptados al sector de la acuicultura europea.

## *8.7. Del estudio de caso a la explotación: Como gestionar una granja modelo que produce 500 t truchas por año (Ejstrupholm)*

### 8.7.1. Descripción de la granja modelo

La piscifactoría modelo de Ejstrupholm se sitúa en el curso de agua Holtum Å en la zona media de la península de Jutlandia, Dinamarca. La finca está construida con dos unidades de producción idénticas divididas en 8 secciones. En la Figura 26 se muestra un esquema del modelo de explotación.

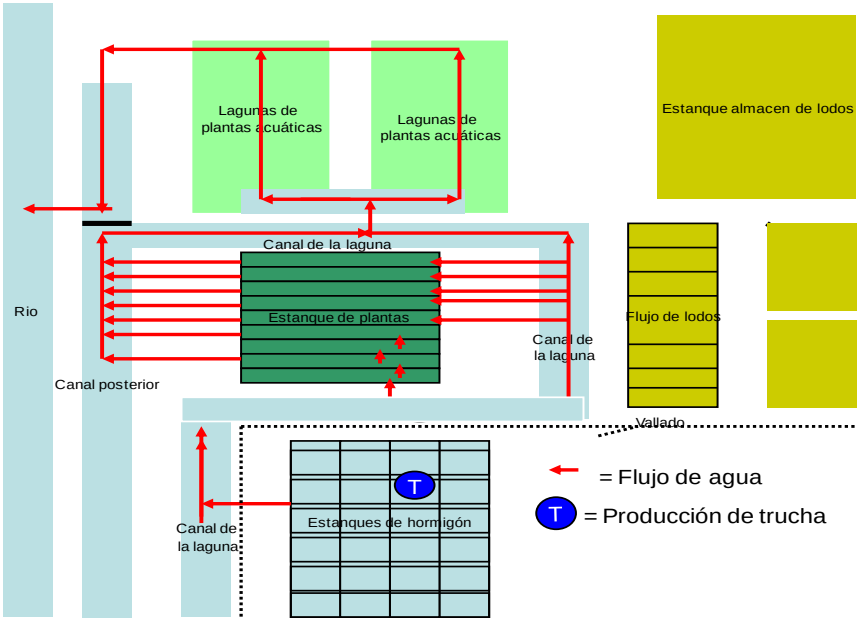



*Figura 26 : Esquema de la granja modelo Ejstrupholm. Las flechas indican la dirección del flujo de agua.*

La aireación y la recirculación del agua se hacen mediante bombas elevadoras de aires (airlifts) que desempeñan dos funciones (bombear y airear). La bomba elevadora de aire consiste en un pozo/hueco dividido, en el cual de un lado se han instalado una serie de difusores (inyección de aire a presión mediante compresores). La fuerza motriz de una bomba elevadora de aire es la diferencia en el peso específico entre el agua y el aire (de un lado) y el agua (del otro lado). La combinación de la inyección del aire y la aireación del agua en el interior del pozo que se eleva unos centímetros genera así un caudal de recirculación.

La materia orgánica particulada procedente de la producción se recoge en los conos de lodos colocados en la parte inferior de las unidades de producción. El lodo se bombea a las balsas de sedimentación. El agua recirculante pasa por un biofiltro en el cual se realiza la oxidación del amoniaco a nitrito / nitrato.

El agua de las unidades de producción y el agua limpia de las balsas de sedimentación (que han pasado previamente por los dispositivos de limpieza, trampas de lodos y biofiltros) se conduce a las lagunas de plantas acuáticas, primero un estanque de tierra que está interconectado con los antiguos canales y después el área de lagunado con plantas silvestres. En estas zonas el agua pasa mucho más lentamente, con tiempo suficiente para eliminar los nutrientes gracias a su asimilación por las plantas antes de ser devuelta al curso de agua.

### 8.7.2. Descripción de los efluentes de la granja

En la Tabla 42 se muestra la contribución específica de la producción, la liberación neta de vertidos y la eficiencia de los dispositivos de limpieza de la granja modelo de Ejstrupholm, comparada con el valor medio de la descarga específica (g de nutrientes por kg de peces producido) de las explotaciones de trucha danesas.

| Nutrientes | Contribución de la producción | Descarga neta | Grado de limpieza % | Descarga media Dinamarca | Ejstrupholm en % de la media danesa |
|---|---|---|---|---|---|
| Nitrógeno Total | 33.7 | 15.8 | 53 | 31.2 | 51 |
| Fósforo Total | 4.3 | 0.39 | 91 | 2.9 | 13 |
| DBO | 78.7 | 3.2 | 96 | 93.6 | 3 |
| DQO | 224.9 | - | | | - |

*Tabla 42: Contribución específica de la producción, descarga neta (valor medio g de nutrientes/kg pescado producido) y grado de limpieza de la granja de Ejstrupholm, comparada con la descarga específica media de las piscifactorías danesas.*

Los resultados documentan una muy alta eficiencia de eliminación de nutrientes del agua de producción en la granja modelo. La descarga específica del fósforo y materia orgánica se redujo significativamente en comparación con el valor medio observado en las granjas de trucha danesas. El amoníaco, fósforo y materia orgánica son eliminados en las trampas de lodo y biofiltros mientras que las lagunas de plantas eliminan de manera eficiente la materia orgánica, el fósforo (sobre todo en suspensión) y el Nitrógeno total (especialmente nitratos).

Los cálculos de las contribuciones de $DBO_5$ y DQO mostraron que, de media, el 55% del total de residuos $DBO_5$ se recuperó como disuelto / suspendido y el 45% como $DBO_5$ particulada. De media, el 71% de la DQO total era de naturaleza particulada y el 29% disuelta / suspendida. La relación $BOD_5$/COD fue 0,51.

La mayoría de los residuos de N-total se recuperaron como disueltos/suspendidos (88%), mientras que un promedio del 12% se recuperó en la fracción de partículas. Casi todos los residuos de fósforo-P se recuperan en forma de partículas (98%), mientras que sólo una fracción muy pequeña (2%) se recuperó como disuelta/suspendida.

### 8.7.3. Balance de agua en la granja

El agua para la producción se capta de los desagües de la planta de producción y/o pozos cercanos. La entrada de agua ha sido de alrededor de 45 l/s. y el tiempo de estancia (tiempo de retención hidráulica) en la explotación ha sido de alrededor de 35 horas. El consumo de energía para el bombeo y aireación (oxígeno) del agua ha sido de alrededor de 1.7 kWh/kg de pescado producido.

### 8.7.4. Pros y contras de las granjas modelo de trucha

En comparación con la acuicultura tradicional, las ventajas e inconvenientes del concepto de granja modelo son las siguientes:

| Ventajas : | Inconvenientes: |
|---|---|
| • El consumo de agua se reduce de alrededor de 50.000 l/kg a unos 3.900 l/kg de pescado producido.<br>• Independencia del curso de agua (río).<br>• Condiciones estables de producción.<br>• Pequeñas variaciones en la calidad del agua.<br>• Mejora de la eficiencia de los dispositivos de limpieza.<br>• Reducción del impacto ambiental.<br>• La recirculación implica menos variaciones estacionales de temperatura.<br>• Mejora de la gestión y el control de la producción.<br>• Reducción de riesgos externos de la infección con patógenos.<br>• Reducción en el empleo de terapéuticos.<br>• Mejor ambiente de trabajo. | • Incremento en las necesidades de energía, oxigeno, bombas, etc.<br>• Incremento en la descarga de $CO_2$<br>• Riesgo de acumulación de amonio.<br>• Mayores necesidades de gestión y control.<br>• Alto consumo de energía por kg/producido- |

Los costes de implantación de una granja modelo de truchas como la descrita (Ejstrupholm) cuestan 3 - 3,50 €/ kg de pienso, es decir, unos 1.6 millones de euros para producir 500Tm.

# 9. Crianza de tilapia en sistemas acuícolas de recirculación (SAR) - Estudio de caso en Holanda

## *9.1. Módulo Reactor desnitrificador de lecho de lodos de flujo ascendente (USB-MDR[29])*

En Holanda la crianza de peces se realiza principalmente en Sistemas Acuícolas de Recirculación (SAR)[30]. Para mejorar la sostenibilidad de la piscicultura en los SAR, los acuicultores tratan de:

1. Reducir consumo de energía y agua.
2. Reducir el volumen de vertido de aguas residuales (costes de transporte de los lodos y costes de gestión los vertidos).
3. Mejorar la utilización de nutrientes por los peces utilizando piensos bien diseñados y condiciones de cultivo óptimas.
4. Reducir las tasas de contaminación de las unidades de producción que se basan en las cantidades de DQO, N-Kjeldahl y fósforo presentes en el efluente (vertido al medio).

Para alcanzar estos objetivos en lo que llamamos “innovaciones del sistema” se deben desarrollar aquellas que reduzcan las emisiones de nitrógeno (disuelto y particulado), DQO y materia orgánica. En este estudio de caso se ha investigado la integración de un reactor desnitrificador de lodos de flujo ascendente en un SAR para reducir el consumo de agua, la energía asociada a las necesidades de calor y los vertidos de nutrientes. Los objetivos de investigación del estudio de caso holandés fueron determinar:

- El efecto de la velocidad de flujo en el rendimiento de un USB-MDR.
- El efecto de la razón C: N de la dieta (pienso) sobre la eliminación de nitratos y la calidad del agua
- El efecto de un pienso (dieta) basado en proteínas vegetales sobre la eliminación de nitratos y el sistema de calidad del agua.
- La escala de rendimiento del reactor.
- El efecto del sistema Geotube ® en la reducción del volumen de descarga de residuos del USB-MDR.
- El efecto del USB-MDR en la salud y el bienestar de los peces en un SAR a escala piloto y si la integración previene la presencia de compuestos de sabor desagradable (off-flavour).
- Por último, los resultados de la investigación y los datos comerciales (ZonAquafarming BV) se han traducido a un estudio de caso para comparar una instalación hipotética que opera con SAR capaz de producir 100 Tm de tilapia con y sin USB-MDR para averiguar el impacto en los indicadores de sostenibilidad.

### 9.1.1. Descripción general del estudio de caso

El diseño de una piscifactoría comienza con la elección de las especies de peces puesto que esto determina en gran medida el rendimiento en crecimiento, las técnicas de crianza y manejo, la calidad de agua exigida y la cantidad de residuos generados. La producción de vertidos en las piscifactorías como consecuencia de los procesos de crianza es inevitable. Los metabolitos excretados son liberados al agua y causan un deterioro en su calidad. Por lo tanto es necesario renovar constantemente el agua proporcionando un flujo que garantice la eliminación de esos residuos. En los sistemas de circuito abierto, el flujo a través de los tanques es igual a la tasa de renovación del sistema (Figura 27).

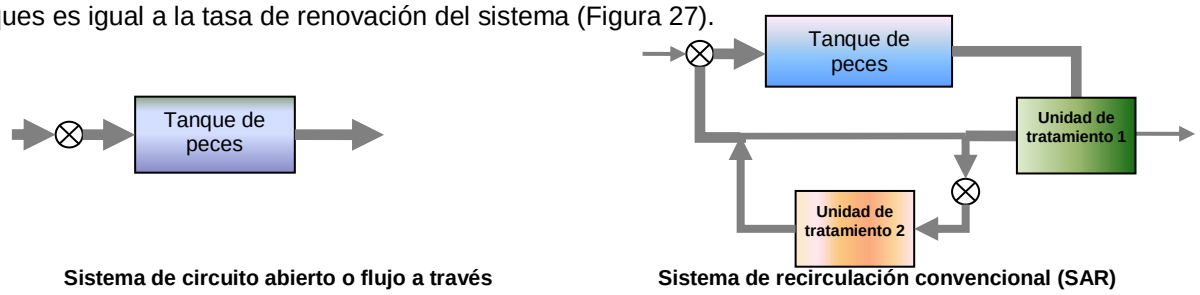



*Figura 27: En un sistema de circuito abierto, el flujo de agua que pasa por los tanques iguala a la tasa de renovación. En un sistema de circuito cerrado o recirculación (SAR) el flujo de agua que pasa por los tanques se depura (purifica) y se reutiliza. Las diferentes unidades de tratamiento pueden requerir diferentes flujos y, a veces, se operan en su propio circuito cerrado (derivación) dentro del sistema.*

[29] USB-MDR = Upflow Sludge Bed Manure Denitrification Reactor
[30] RAS= Recirculation Aquaculture Systems

En un sistema de recirculación (SAR) el agua de los tanques de producción de peces se depura y se reutiliza. Los sólidos se eliminan por sedimentación o tamizado, el oxígeno se añade por aireación u oxigenación, el dióxido de carbono ($CO_2$) se elimina mediante desgasificación y el amoniaco es convertido en su mayoría a nitrato ($NO^3$) por nitrificación en filtros biológicos aerobios. Cada fase de tratamiento reduce la tasa de renovación de agua en el sistema hasta la siguiente limitación impuesta por otro componente residual. En los sistemas de recirculación convencionales, la tasa de renovación de agua viene dictada por la concentración de nitratos y supone un recambio de agua diario de 5-10%[31]. En los SAR de última generación, el nitrato se convierte en gas nitrógeno ($N_2$) por procesos desnitrificación anóxica en los filtros biológicos. En estos reactores de desnitrificación, la materia orgánica (preferentemente de origen interno, es decir, piensos no consumidos y heces procedentes de la fase de eliminación de sólidos) se oxida utilizando el oxígeno de la molécula de nitrato. En virtud de este proceso, en estos SAR se reduce no sólo la cantidad de agua y la liberación de nitrógeno (se libera menor cantidad de nitrato) sino también la cantidad de materia orgánica en el vertido.

Para todos los compartimientos de un SAR (tanques de producción de peces y cada una de las unidades de tratamiento) hay dos cuestiones fundamentales: 1) la cantidad de agua que debe fluir por el circuito 2) las dimensiones necesarias (es decir, volumen y forma).

En los tanques de peces, el flujo debe ser lo suficientemente grande como para eliminar la cantidad de residuos producidos y mantener una aceptable calidad del agua. Para cada unidad de tratamiento, el flujo debe ser lo suficientemente grande como para facilitar la acumulación de nutrientes (residuos) que serán eliminados. Diferentes unidades de tratamiento pueden requerir diferentes flujos de agua y, en ocasiones, operan en una derivación del sistema (Figura 27).

El volumen requerido para los tanques de peces dependerá de la densidad máxima de población que puedan soportar las especies en cuestión (es decir, de las estrategias de manejo) y su forma obedecerá a sus características funcionales. La eliminación de sólidos depende en gran parte de la distribución de las partículas según su tamaño. El volumen de los filtros biológicos depende de su actividad específica, expresada en función de su capacidad de eliminar residuos en un determinado periodo de tiempo (g residuos/ $m^3$/día).

De lo anteriormente expuesto, se deduce que para diseñar un sistema de recirculación (SAR) es fundamental conocer la cantidad de residuos producidos por día. Dado que todos los residuos se originan como consecuencia de la alimentación por piensos (es decir, todo lo que no se asimila se convierte en "residuo") es fundamental conocer la cantidad de alimento suministrado al día. Debido a la fluctuación de las poblaciones de peces presentes en la explotación (lotes vendidos, desdobles, crecimiento de los animales, etc.) la cantidad de alimento diaria también varía. No obstante, el diseño de la explotación debe basarse en la máxima cantidad de alimento diaria que se espera suministrar al realizar la planificación de la producción anual. Esto, a su vez, puede calcularse a partir del plan de explotación. Por último, la producción de residuos se puede determinar a partir del suministro máximo de alimento con el modelo de balance de nutrientes, que utiliza la composición de los piensos, la digestibilidad de los mismos y la composición y respiración de los peces para calcular la cantidad de residuos sólidos (heces) y disueltos (resultado de la excreción a través de las branquias y orina).

### 9.1.2. Principios del módulo USB-MDR

Un reactor desnitrificador de lodos de flujo ascendente (USB-MDR) es un cilindro anóxico (sin oxígeno libre) alimentado con el flujo de residuos sólidos (lodos) procedentes de la unidad de filtrado físico (normalmente filtro de tambor, Figura 28) que contienen residuos orgánicos fecales (disueltos y particulados), flóculos bacterianos y compuestos inorgánicos. El flujo de residuos entra en el reactor por el centro de su fondo en dirección ascendente y a una determinada velocidad máxima (Figura 34). La principal característica de diseño del USB-MDR consiste en que la velocidad máxima siempre ha de ser menor que la velocidad de asentamiento (sedimentación) de la fracción mayor del residuo particulado para que, de esta forma, la mayor parte de las partículas se depositen en el fondo creando un "lecho de lodos" formada por sólidos fecales particulados sedimentables. El escaso oxígeno que pueda entrar en el reactor con el flujo entrante es consumido por las bacterias heterótrofas anaerobias facultativas en el lecho de lodo junto a la materia orgánica fácilmente degradable. Las bacterias desnitrificantes (anaeróbicas) completan la digestión del lecho con el resultado de:

- Aumento de la producción de biomasa bacteriana.

[31] Es lo que se conoce como *Make up-water* (*agua de refresco)* que es aquella que se introduce para suplir pérdidas y mejorar la calidad de agua, normalmente para rebajar las concentraciones de nitratos (aprox 10% diario). Ver más información en MASSER *et. al.,* 1999 (MASSER, M.P., J. RAKOCY, & T.M. LOSORDO. 1999. Recirculating aquaculture tank production systems: management of recirculating systems. Southern Regional Aquaculture Center Publication No. 452:12 pgs. http://aqua.ucdavis.edu/dbweb/outreach/aqua/452RFS.PDF ) y LENNARD , 2004 (LENNARD W., 2004.- Aquaponics, the theory behind the integration. In GAIN : Gippsland Aquaculture Industry Network. http://www.growfish.com.au/content.asp?contentid=1060 )

- Reducción del nitrato a nitrógeno gas ($N_2$) con producción de $CO_2$.
- Producción de alcalinidad.
- Producción de calor.

Las partículas de residuos en el lecho de lodos sirven también como medio de cultivo para que las bacterias desnitrificantes crezcan en él. El agua libre de partículas (agua pre-sedimentada) abandona el reactor a través del borde dentado con forma de V de la parte superior del reactor por rebosamiento (Figura 34). En comparación con los sistemas de recirculación convencionales, un SAR equipado con un USB-MDR permite:

- Reducir el "agua de refresco" necesaria para controlar los niveles de nitrato.
- Reducir los vertidos de nitrato-nitrógeno.
- Reducir el consumo de energía debido al bajo aporte de agua de refresco y la producción de calor por la biomasa bacteriana en el reactor.
- Concentrar el flujo de sólidos del filtro de tambor.
- Reducir el tamaño/volumen del post tratamiento puesto que el USB-MDR pre-concentra y digiere los sólidos.
- Reducir las tasas de vertidos de nutrientes (TAN, nitrato, N-org, y materia orgánica como DQO).
- Aumentar la producción de alcalinidad y permitir un pH neutro para las operaciones de piscicultura.

No obstante, el sistema presenta algunas desventajas como son la mayor inversión (mayor coste inicial), mayor necesidad de conocimiento para operar el sistema y la acumulación de sólidos totales disueltos (STD).

### 9.1.3. Evaluación de los indicadores de sostenibilidad seleccionados en SustainAqua

Los parámetros de sostenibilidad SustainAqua aplicados en este módulo para una hipotética granja (capacidad de producción 100 Tm de tilapia) que opera con un sistema de recirculación (SAR convencional) y con USB-MDR son el uso de los recursos por kg de pescado producido, la utilización de nutrientes como % de la entrada y la descarga de agua. (Tabla 43)

| | ***SAR Convencional*** | ***SAR + USB-MDR*** | | ***SAR Convencional*** | ***SAR + USB-MDR*** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Uso del recurso** | | | **Vertido efluente** | | |
| Alevines (#/kg) | 1.2 | 1.2 | **Nitrógeno** | | |
| Alimento(kg/kg) | 1.22 | 1.22 | Sólido (g/kg) | 8.5 | 2.6 |
| Electricidad (kWh/kg) | 1.8 | 2.2 | Disuelto (g/kg) | 37.4 | 5.9 |
| Calor (kWh/kg) | 3.4 | 0.0 | **Fósforo** | | |
| Agua (L/kg) | 238 | 38 | Sólido (g/kg) | 4.5 | 7.2 |
| Oxígeno (kg/kg) | 1.18 | 1.26 | Disuelto (g/kg) | 3.8 | 1.3 |
| Bicarbonato (g/kg) | 252 | 107 [a] | **DQO** | | |
| Mano de obra (h/MT) | 12.5 | 13.1 | Sólido (g/kg) | 189 | 84 |
| | | | Disuelto (g/kg) | 40 | 9 |
| **Utilización de nutrientes** | | | **DTO** | | |
| | | | Sólido (g/kg) | 227 | 95 |
| Nitrógeno (% entrada) | 32 | 32 | Disuelto (g/kg) | 48 | 11 |
| Fósforo(% entrada) | 43 | 43 | **$CO_2$** (kg/kg incl. gas) | 1.58 | 1.10 |
| DQO (% entrada) | 32 | 32 | **Sólidos totales Disueltos TDS** (g/kg) | 62 | 28 |
| DTO (% entrada) | 32 | 32 | **Conductividad** (µS/cm) | 1060 | 2000 |

a) En la práctica la necesidad de bicarbonato (alcalinidad) es prácticamente nula (despreciable) cuando se aplica la desnitrificación.

*Tabla 43: Evaluación de los indicadores de sostenibilidad en el modulo MDR*

### 9.1.4. Factores de éxito y limitaciones

En el estudio de caso "Holanda", la integración de un reactor desnitrificador de lodos de flujo ascendente (USB-MDR) en un sistema de recirculación convencional indica lo siguiente:

#### Factores de éxito

- El agua, la energía y el consumo de bicarbonato pueden reducirse de forma significativa

- El consumo de energía es muy reducido en comparación con los SAR porque: (a) el intercambio de agua se reduce y, por tanto, se calienta para controlar las concentraciones de nitrato y (b) se produce una importante cantidad de calor por la biomasa bacteriana cuando reutiliza y oxida nutrientes que de otra forma serían desperdiciados.
- En comparación con los SAR convencionales, la descarga de nutrientes se reduce (porque son digeridos por las bacterias) y se concentra en el MDR (a través de la selección del proceso de tratamiento) por la derivación del sistema. Además es posible obtener aún mayor concentración tratando los lodos del MDR con un sistema de Geotubes ®.

**Perspectivas**

- Para futuras condiciones de granja, en las que los nitratos no sean controlados por USB-MDR, la reformulación de dietas que originen unas heces con una alta relación C/N puede ser una herramienta útil para controlar la acumulación de nitratos por desnitrificación. Consecuentemente, se reducirán la energía en la recirculación de agua y en el consumo de alcalinidad.
- Los piensos elaborados con proteínas vegetales serán de aplicación futura para mejorar la imagen de sostenibilidad de los peces criados en sistemas de recirculación. Este estudio ha mostrado que estos cambios en el pienso (dieta) no tienen efecto significativo en el rendimiento del reactor. Sin embargo, la concentración de ortofosfato-P fue significativamente mayor en el sistema cuando los peces fueron alimentados con piensos formulados con proteínas vegetales en comparación con aquellos basados en harina de pescado.

**Limitaciones**

- La tilapia del Nilo hasta ± 150 g puede ser criada en sistemas casi cerrados de recirculación con tasas de renovación de agua de 30 l/kg de pienso/día (con el USB-MDR) sin afectar al bienestar de los peces. Por el contrario, animales mayores (± 300g) parecen mostrar una tendencia al retraso del crecimiento cuando se crían a escala piloto en un SAR equipado con un USB-MDR y una tasa similar de recambio de agua. Sin embargo, este efecto no se observó en SAR comercial (información ZonAquafarming BV)
- Para operar con este sistema, es necesario realizar mayores inversiones iniciales y disponer de personal con mayor nivel de conocimientos.

### 9.1.5. Beneficios de la aplicación

Los beneficios y dificultades a la hora de aplicar un USB-MDR en un SAR convencional, se basan en un estudio de caso para una hipotética granja de tilapia (venta de 100 Tm al año) que integra los datos de la investigación (AFI-WUR) y los procedentes de una instalación comercial que opera con un SAR (ZONAQUAFARMING BV). Los beneficios y dificultades se basan en la comparación de un SAR convencional con un SAR que opera con un USB-MDR y Geotube® integrado como innovación en el sistema. En resumen:

| **Beneficios** | |
|---|---|
| *Uso del recurso:* | - Reducción en coste energético de 3 kWh/kg producido<br>- Reducción en consumo de agua de 200 L/kg producido<br>- Reducción en consume de bicarbonato de 252 g/kg producido |
| *Reutilización de nutrientes:* | - Nutrientes reutilizados por las bacterias y convertidos en 0.5 kWh/kg producido |
| *Descarga de nutrientes:* | - Reducido en 81% para N,<br>59% para DQO ( demanda química de oxigeno),<br>61% para DTO ( demanda total de oxigeno),<br>30% $CO_2$ [1)]<br>58% para STD ( sólidos totales disueltos) |
| *Volumen de lodos:* | - Reducción en el volumen de lodos de 7.3 L kg alimento usando el sistema Geotube® |

| Dificultades | |
|---|---|
| | - Altas inversiones (±52 800,--, € USB-MDR además de material adicional y espacio para el biofiltro) cuando comparado con un SAR convencional.<br>- Se puede necesitar un filtro de tambor con gran capacidad para eliminar sólidos en suspensión totales (SST) porque no todos son retenidos en el reactor USB-MDR. En los experimentos a escala piloto, la eficiencia del tratamiento (USB-MDR %) para SST fue de 65 ± 18 (media ± S.D; N=7).<br>- Nivel alto de conocimiento para operar un SAR con USB-MDR<br>- La razón C:N en las heces puede limitar la tasa de eliminación del nitrato |

[1)] Reducción en la liberación de $CO_2$ debido al ahorro en el consumo de combustibles fósiles.

En general, para las condiciones económicas en los Países Bajos, el estudio de caso indica un 10% de ahorro en los costes de producción por kg de peces.

## *9.2. Del estudio de caso a la explotación: Integración de un USB-MDR en un SAR para 100 Tm de tilapia*

### 9.2.1. Introducción

En este estudio de caso, se demuestran los efectos de la integración de un USB-MDR en un SAR con capacidad de 100 Tm de tilapia sobre los indicadores de sostenibilidad. En este sentido, se ha comparado un SAR convencional con un SAR que tiene integrado un USB-MDR. Como punto de partida para este análisis adoptamos el concepto y resultados de la empresa ZonAquafarming B.V. dedicada a la crianza de tilapia de forma intensiva (Figura 28)

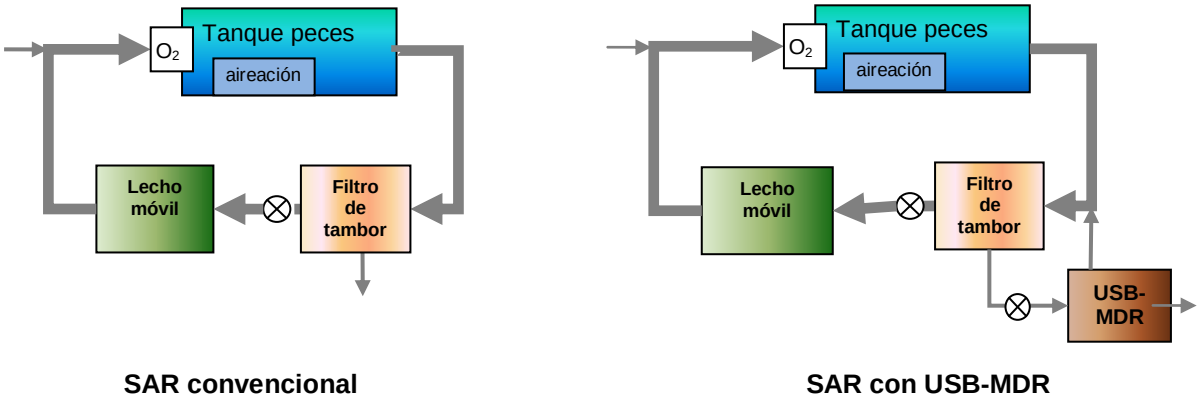



*Figura 28: En este estudio de caso se compararon dos sistemas SAR (convencional y con un USB-MDR integrado) de acuerdo con los datos de la empresa ZonAquafarming B.V.*

El estudio de caso se ha realizado en formato de manual con idea de ofrecer directrices para el desarrollo de un curso en diseño y funcionamiento de USB-MDR. Los pasos necesarios para el diseño del SAR se muestran en la Tabla 44. Estos puntos se discutirán en las secciones siguientes.

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Especies de peces** | Tilapia | | **Producción de residuos** |
| **Trayectoria de crecimiento** | | | Composición de los peces |
| Densidad inicial | 70 | gramos | Composición del alimento |
| Peso final venta | 845 | gramos | Digestibilidad |
| Tiempo | 24 | semanas | Consumo de oxígeno |
| Consumo de alimento | | | **Tasas de flujo y recambio de agua (Caudales)** |
| Índice de conversión ( FCR) | 1.34 | | Límites de calidad del agua |
| Densidad/carga máxima | 140 | $kg/m^3$ | Tasa de recambio en los tanques |
| Mortalidad | 0.5 | % | Tasa de recambio en el sistema |
| **Plan de producción** | | | Flujos de las unidades de tratamiento |
| Objetivos de producción | **100** | Tm/año | **Sistema de tratamiento** |
| Fases de crecimiento ( desdobles) | 2 | | **Resultados** |
| Esquema lotes/ producción | 3 | semanas | Flujos de N,P y DQO |
| Cantidad máxima de alimento | 349 | kg/d | Indicadores de sostenibilidad |

*Tabla 44: Etapas en el diseño de un SAR*

### 9.2.2. Aplicación

#### Especies de peces

La primera decisión que hay que tomar (las especies a producir) fue adoptada por la empresa hace tiempo eligiendo la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). A menudo, esta elección se hace sobre la base del precio de mercado de los peces. La sostenibilidad económica (rentabilidad) viene dada por el margen entre los precios de mercado y precio de coste, que en sistemas intensivos es determinada en gran medida por la productividad ($kg/m^3$/año), y, por lo tanto, ésta debe ser la consideración principal.

#### Trayectoria de crecimiento

Con la elección de las especies de peces de acuerdo a su posición en el mercado, también se determina en gran medida la trayectoria de crecimiento, es decir, la planificación para la disposición de los lotes y el peso de comercialización o venta. La curva de crecimiento de los peces se caracteriza por el tiempo necesario para llegar al peso de mercado, que a su vez está determinado por el alimento suministrado y el índice de conversión, ambos dependientes del peso corporal. La mortalidad también depende del peso corporal y es necesaria para calcular el número de peces que se necesitan en cada ciclo. Por último, la elección de las especies también determina las condiciones de crianza, como la densidad máxima y la calidad de agua necesaria (este punto se describe en la **sección Caudal**).

En este estudio de caso se han elegido animales de peso inicial medio 70 g y un peso final de venta de 845 g sobre la base de los datos de crecimiento, consumo de alimento y características de manejo en la empresa ZonAquafarming BV tilapia, tal y como se muestra en la Figura 29. Cabe señalar que esta empresa desarrolla su actividad con varias generaciones de animales criados selectivamente. La mayoría de las cepas comerciales de tilapia crecen menos rápido y, en particular, tienen dificultades para alcanzar el tamaño por encima de 600-700 g en condiciones intensivas.

La tilapia en este estudio de caso puede alcanzar el tamaño de mercado en 24 semanas, con una supervivencia acumulada del 99,5%. Para más detalles, consultar el marco 1 en la **sección Plan de Producción.**

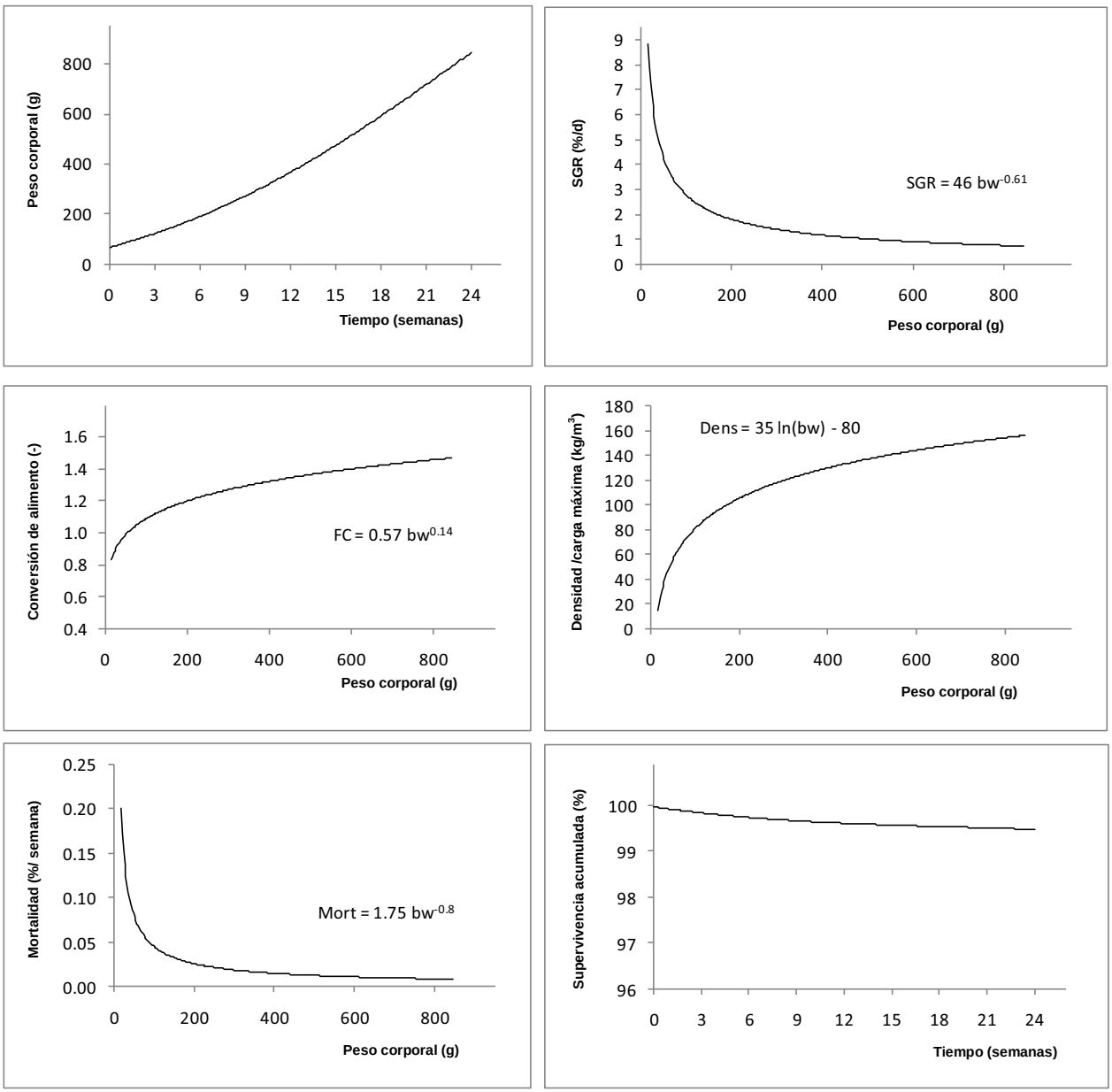



*Figura 29: Crecimiento y características de manejo de la empresa ZonAquafarming B.V. tilapia.*

## Plan de producción

Después de elegir la especie y determinar la trayectoria de crecimiento, es necesario establecer el plan de producción. Esto incluye fijar los objetivos (en este caso 100 Tm / año), el número de fases de crecimiento o desdobles (en este caso 2, la división del lote se realiza a la mitad del ciclo, es decir, después de 12 semanas), la disposición de nuevos lotes y régimen de producción (en este caso cada 3 semanas)[32].

Con el plan de producción se puede determinar el número de cohortes de peces que estarán presentes en la explotación al mismo tiempo. Con los pesos e individuos organizados por cohortes se puede calcular el suministro de alimento (pienso en kg/día).

En el plan de producción de ZonAquafarming BV, se utilizan 12 tanques (24 semanas/2 fases de crecimiento). Éstos son manejados en bloques de 3 tanques, que están conectados a través de piscinas (canaletas) cerradas. De esta forma, los peces de un tanque pueden ser desdoblados abriendo la compuerta de un tanque vacío adyacente. Uno de los 3 tanques de una unidad (cualquiera de los laterales, nunca el del centro) se abastece con 6.862 peces de 70 g y el ciclo se repite cada tres semanas[33]. Después

[32] Nota: Con una explotación de 100 Tm y una salida de 100 Tm de peces de tamaño de mercado se entiende. La producción se basa en un aporte de 8,3 Tm de alevines, la producción efectiva es sólo 91,7 Tm.
[33] Cada 3 semanas se realiza esta operación puesto que hay 4 unidades de 3 tanques cada. Cada unidad se desdobla a las 12 semanas (3 meses).

de 12 semanas, cuando los peces tienen aprox. 370 g, los peces se desdoblan en 2 tanques, tal y como se ha descrito anteriormente. En ese mismo tiempo, el tercer tanque se abastece con una nueva cohorte de peces de 70 g. Al cabo de 24 semanas, los 2 tanques con peces de tamaño comercial se pescan, el tercer tanque se desdobla y el 1 se abastece con un nuevo lote. Este plan se muestra en la Tabla 45 junto con la consiguiente configuración de la piscifactoría, forma del tanque, volumen de agua, sistema de abastecimiento y requerimientos operacionales del manejo.

**Marco 1. Cálculos del Plan de Producción.**

El número de peces engordados es de 100 000 (kg / año) / 0.845 (kg / pez) = 118 343 # / año o 118 343 * (3 / 52) = 6 828 # /cohorte. 3 / 52 es el número de pescas/ lotes por año.

El número de peces necesarios es 118 343 / 0.995 (supervivencia acumulada) ≈ # 118 946 / año o 118 946 * (3 / 52) = 6 862 # / cohorte.

Para la primera semana la mortalidad es $1.75 * 70^{-0,8}$ = 0.058% y el número por tanque después de 1 semana es 6 862 * (1-0.00058) = 6 858.

El volumen de depósito se considera como el máximo de los volúmenes requeridos al final de la fase 1 y 2. Este es el volumen necesario después de 12 semanas, 2 516 (kg / tanque) / (35 * ln (368) -80) = 19.8$m^3$. Debido a consideraciones de diseño, el volumen actual del tanque es 20.5$m^3$ y el volumen total de agua en todos los tanques es 246$m^3$.

Después de 1 semana, la biomasa por tanque es de 6 858 * 0.087 (kg / pez) = 597kg. La densidad de peces es 597/20.5 = 29kg/$m^3$.

El crecimiento de los peces después de 1 semana es $87 * (46*87^{-0,61}) / 100$ = 2.6g/pez/d. La producción total para ese tanque es 0.026 * 6.858 = 18kg / d.

Con una conversión alimenticia de $0.57* 87^{0,14}$ = 1.07, el total de pienso para ese tanque es 18 * 1.07 = 19kg / d

Después de la puesta en marcha de la piscifactoría, la biomasa de peces se incrementará progresivamente debido al crecimiento de los peces y de las nuevas cohortes o lotes. Al mismo tiempo se incrementa la alimentación y la cantidad diaria (kg/d) que se indica en la Tabla 46. La cantidad máxima se alcanza en el momento en que el primer lote alcanza el tamaño comercial, después de 24 semanas. Posteriormente, la alimentación diaria seguirá un patrón llamado diente de sierra (Figura 30).El diseño de la explotación se basa en el máximo aporte diario de alimento, en este caso 349 kg/d.

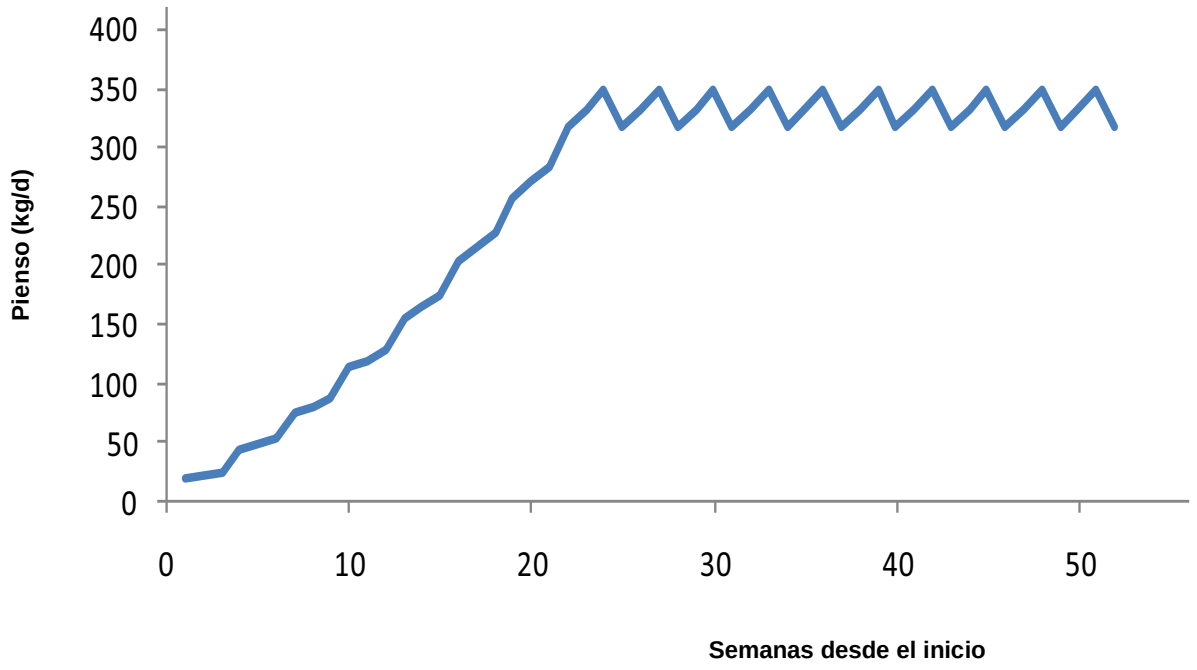



*Figura 30: El aporte máximo de pienso se alcanza en el momento en que la primera cohorte alcanza el tamaño del mercado, después de 24 semanas. En ese momento (ver Tabla 45) hay 8 grupos presentes en la explotación. Cuando se pesca la primera cohorte y se sustituye por un nuevo lote de peces pequeños, el aporte de alimento primero decrece y luego se incrementa de nuevo debido al crecimiento del nuevo lote. Este proceso continúa y el aporte de alimento sigue un patrón de diente de sierra.*

**Tanques de peces**

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Número de tanques (bloques de 3 tanques) | 12 | # | Número de peces producidos | 6,828 | #/cohorte | 118,343 | #/año |
| Volumen de tanque requerido | 238 | m3 | | | | | |
| Volumen por tanque | 19.8 | m3 | Número de peces en el lote | 6,862 | #/cohorte | 118,946 | #/año |
| Profundidad del tanque total | 1.6 | m | | | | | |
| Anchura de la pared | 0.2 | m | Mano de obra | general | 3 | h/día | |
| Profundidad del tanque | 1.3 | m | | desdobles | 3 | h/cohorte | |
| | | | | pesca | 6 | h/cohorte | |
| Superficie requerida/ tanque | 15 | m2 | | | | | |
| Relación longitud : Anchura | 4 | | | total | 1251 | h/año | |
| Diseño con 0.1 m de longitud redondeada | 7.90 | m | | | | | |
| Diseño con anchura redondeada 0.1 m. | 2.00 | m | | | | | |
| Superficie de agua tanque | 190 | m2 | Vol. agua en el tanque | 246 | m3 | Vol. del sistema | 384 | m3 |
| Superficie total inc. paredes | 239 | m2 | | | | | |

**DIMENSIONES DEL SISTEMA Y RENDIMIENTO DE CRECIMIENTO DE TILAPIA**

Volumen: **20.5** m3/tanque Tanques: **12** #

| Tiempo semanas | Peso g/pez | Densidad kg/m3 | Lote peces kg/tanque | Nro ind. #/tanque | Crecimiento g/pez | Producción kg/t/día | FC | Alimento aportado kg /día |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 87 | 29 | 597 | 6858 | 2.6 | 18 | 1.07 | 19 |
| 2 | 106 | 35 | 727 | 6855 | 2.8 | 19 | 1.10 | 21 |
| 3 | 126 | 42 | 863 | 6852 | 3.0 | 21 | 1.12 | 24 |
| 4 | 147 | 49 | 1007 | 6849 | 3.2 | 22 | 1.15 | 25 |
| 5 | 169 | 56 | 1157 | 6847 | 3.4 | 23 | 1.17 | 27 |
| 6 | 193 | 64 | 1321 | 6845 | 3.6 | 25 | 1.19 | 30 |
| 7 | 218 | 73 | 1492 | 6843 | 3.8 | 26 | 1.21 | 31 |
| 8 | 245 | 82 | 1677 | 6842 | 3.9 | 27 | 1.23 | 33 |
| 9 | 273 | 91 | 1868 | 6840 | 4.1 | 28 | 1.25 | 35 |
| 10 | 303 | 101 | 2073 | 6839 | 4.3 | 29 | 1.27 | 37 |
| 11 | 335 | 112 | 2291 | 6838 | 4.4 | 30 | 1.29 | 39 |
| 12 | 368 | 122 | 2516 | 6836 | 4.6 | 31 | 1.30 | 40 |
| 13 | 403 | 67 | 1377 | 3418 | 4.8 | 16 | 1.32 | 21 |
| 14 | 439 | 73 | 1500 | 3417 | 4.9 | 17 | 1.34 | 23 |
| 15 | 476 | 79 | 1626 | 3417 | 5.1 | 17 | 1.35 | 23 |
| 16 | 514 | 85 | 1756 | 3417 | 5.2 | 18 | 1.37 | 25 |
| 17 | 553 | 92 | 1889 | 3416 | 5.4 | 18 | 1.38 | 25 |
| 18 | 592 | 98 | 2022 | 3416 | 5.5 | 19 | 1.39 | 26 |
| 19 | 633 | 105 | 2162 | 3415 | 5.7 | 19 | 1.41 | 27 |
| 20 | 674 | 112 | 2302 | 3415 | 5.8 | 20 | 1.42 | 28 |
| 21 | 716 | 119 | 2445 | 3415 | 6.0 | 20 | 1.43 | 29 |
| 22 | 759 | 126 | 2591 | 3414 | 6.1 | 21 | 1.44 | 30 |
| 23 | 802 | 133 | 2738 | 3414 | 6.2 | 21 | 1.45 | 31 |
| 24 | 845 | 140 | 2884 | 3414 | 6.4 | 22 | 1.46 | 32 |

**BLOQUES DE 3 TANQUES**
**DESDOBLE EN 2 TANQUES**

| **Tanque 1** #/tanque | **Tanque 2** #/tanque | **Tanque 3** #/tanque |
|---|---|---|
| 6858 | 3418 | 3418 |
| 6855 | 3417 | 3417 |
| 6852 | 3417 | 3417 |
| 6849 | 3417 | 3417 |
| 6847 | 3416 | 3416 |
| 6845 | 3416 | 3416 |
| 6843 | 3415 | 3415 |
| 6842 | 3415 | 3415 |
| 6840 | 3415 | 3415 |
| 6839 | 3414 | 3414 |
| 6838 | 3414 | 3414 |
| 6836 | 3414 | 3414 |
| 3418 | 3418 | 6858 |
| 3417 | 3417 | 6855 |
| 3417 | 3417 | 6852 |
| 3417 | 3417 | 6849 |
| 3416 | 3416 | 6847 |
| 3416 | 3416 | 6845 |
| 3415 | 3415 | 6843 |
| 3415 | 3415 | 6842 |
| 3415 | 3415 | 6840 |
| 3414 | 3414 | 6839 |
| 3414 | 3414 | 6838 |
| 3414 | 3414 | 6836 |

*Tabla 45: Configuración del plan de producción de la empresa ZonAquafarming B.V. tilapia. Total de mano de obra y volumen es para el SAR convencional*

| | | |
|---|---|---|
| **MED.** | **333** | **kg/d** |
| **MIN.** | **318** | **kg/d** |
| **MAX.** | **349** | **kg/d** |

**LOTES DE PECES: 1 tanque cada 3 semanas**
**PESCA : 2 tanques de tamaño comercial cada 3 semanas**

| **semana** | ***kg pienso*** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 19 | 19 | | | | | | | | | | | |
| **2** | 21 | 21 | | | | | | | | | | | |
| **3** | 24 | 24 | | | | | | | | | | | |
| **4** | 44 | 25 | | | 19 | | | | | | | | |
| **5** | 48 | 27 | | | 21 | | | | | | | | |
| **6** | 53 | 30 | | | 24 | | | | | | | | |
| **7** | 76 | 31 | | | 25 | | | 19 | | | | | |
| **8** | 81 | 33 | | | 27 | | | 21 | | | | | |
| **9** | 88 | 35 | | | 30 | | | 24 | | | | | |
| **10** | 113 | 37 | | | 31 | | | 25 | | | 19 | | |
| **11** | 120 | 39 | | | 33 | | | 27 | | | 21 | | |
| **12** | 129 | 40 | | | 35 | | | 30 | | | 24 | | |
| **13** | 155 | 21 | 21 | 19 | 37 | | | 31 | | | 25 | | |
| **14** | 165 | 23 | 23 | 21 | 39 | | | 33 | | | 27 | | |
| **15** | 175 | 23 | 23 | 24 | 40 | | | 35 | | | 30 | | |
| **16** | 204 | 25 | 25 | 25 | 21 | 21 | 19 | 37 | | | 31 | | |
| **17** | 215 | 25 | 25 | 27 | 23 | 23 | 21 | 39 | | | 33 | | |
| **18** | 228 | 26 | 26 | 30 | 23 | 23 | 24 | 40 | | | 35 | | |
| **19** | 258 | 27 | 27 | 31 | 25 | 25 | 25 | 21 | 21 | 19 | 37 | | |
| **20** | 271 | 28 | 28 | 33 | 25 | 25 | 27 | 23 | 23 | 21 | 39 | | |
| **21** | 285 | 29 | 29 | 35 | 26 | 26 | 30 | 23 | 23 | 24 | 40 | | |
| **22** | 318 | 30 | 30 | 37 | 27 | 27 | 31 | 25 | 25 | 25 | 21 | 21 | 19 |
| **23** | 332 | 31 | 31 | 39 | 28 | 28 | 33 | 25 | 25 | 27 | 23 | 23 | 21 |
| **24** | 349 | 32 | 32 | 40 | 29 | 29 | 35 | 26 | 26 | 30 | 23 | 23 | 24 |
| **25** | 318 | 19 | 21 | 21 | 30 | 30 | 37 | 27 | 27 | 31 | 25 | 25 | 25 |
| **26** | 332 | 21 | 23 | 23 | 31 | 31 | 39 | 28 | 28 | 33 | 25 | 25 | 27 |
| **27** | 349 | 24 | 23 | 23 | 32 | 32 | 40 | 29 | 29 | 35 | 26 | 26 | 30 |
| **28** | 318 | 25 | 25 | 25 | 19 | 21 | 21 | 30 | 30 | 37 | 27 | 27 | 31 |
| **29** | 332 | 27 | 25 | 25 | 21 | 23 | 23 | 31 | 31 | 39 | 28 | 28 | 33 |
| **30** | 349 | 30 | 26 | 26 | 24 | 23 | 23 | 32 | 32 | 40 | 29 | 29 | 35 |
| **31** | 318 | 31 | 27 | 27 | 25 | 25 | 25 | 19 | 21 | 21 | 30 | 30 | 37 |
| **32** | 332 | 33 | 28 | 28 | 27 | 25 | 25 | 21 | 23 | 23 | 31 | 31 | 39 |
| **33** | 349 | 35 | 29 | 29 | 30 | 26 | 26 | 24 | 23 | 23 | 32 | 32 | 40 |
| **34** | 318 | 37 | 30 | 30 | 31 | 27 | 27 | 25 | 25 | 25 | 19 | 21 | 21 |
| **35** | 332 | 39 | 31 | 31 | 33 | 28 | 28 | 27 | 25 | 25 | 21 | 23 | 23 |
| **36** | 349 | 40 | 32 | 32 | 35 | 29 | 29 | 30 | 26 | 26 | 24 | 23 | 23 |
| **37** | 318 | 21 | 21 | 19 | 37 | 30 | 30 | 31 | 27 | 27 | 25 | 25 | 25 |
| **38** | 332 | 23 | 23 | 21 | 39 | 31 | 31 | 33 | 28 | 28 | 27 | 25 | 25 |
| **39** | 349 | 23 | 23 | 24 | 40 | 32 | 32 | 35 | 29 | 29 | 30 | 26 | 26 |
| **40** | 318 | 25 | 25 | 25 | 21 | 21 | 19 | 37 | 30 | 30 | 31 | 27 | 27 |
| **41** | 332 | 25 | 25 | 27 | 23 | 23 | 21 | 39 | 31 | 31 | 33 | 28 | 28 |
| **42** | 349 | 26 | 26 | 30 | 23 | 23 | 24 | 40 | 32 | 32 | 35 | 29 | 29 |
| **43** | 318 | 27 | 27 | 31 | 25 | 25 | 25 | 21 | 21 | 19 | 37 | 30 | 30 |
| **44** | 332 | 28 | 28 | 33 | 25 | 25 | 27 | 23 | 23 | 21 | 39 | 31 | 31 |
| **45** | 349 | 29 | 29 | 35 | 26 | 26 | 30 | 23 | 23 | 24 | 40 | 32 | 32 |
| **46** | 318 | 30 | 30 | 37 | 27 | 27 | 31 | 25 | 25 | 25 | 21 | 21 | 19 |
| **47** | 332 | 31 | 31 | 39 | 28 | 28 | 33 | 25 | 25 | 27 | 23 | 23 | 21 |
| **48** | 349 | 32 | 32 | 40 | 29 | 29 | 35 | 26 | 26 | 30 | 23 | 23 | 24 |
| **49** | 318 | 19 | 21 | 21 | 30 | 30 | 37 | 27 | 27 | 31 | 25 | 25 | 25 |
| **50** | 332 | 21 | 23 | 23 | 31 | 31 | 39 | 28 | 28 | 33 | 25 | 25 | 27 |
| **51** | 349 | 24 | 23 | 23 | 32 | 32 | 40 | 29 | 29 | 35 | 26 | 26 | 30 |
| **52** | 318 | 25 | 25 | 25 | 19 | 21 | 21 | 30 | 30 | 37 | 27 | 27 | 31 |

*Tabla 46: Desarrollo del plan de alimentación desde el inicio. Cantidad máxima de alimento a las 24 semanas ( marco rojo)*

## Producción de residuos

La producción de pescado causa inevitablemente la obtención de residuos. Ejemplos de ello son la producción de heces, la excreción de amoníaco ($NH^3$) y dióxido de carbono ($CO_2$) y el consumo de oxígeno ($O_2$). Estos residuos se eliminan en el agua de producción deteriorando su calidad en consecuencia. Por lo tanto, es necesario un constante aporte de agua limpia para eliminar estos desechos de los peces. Para calcular el aporte de agua necesario (ver **sección Caudal**), se necesita saber la cantidad de residuos producidos por unidad de tiempo.

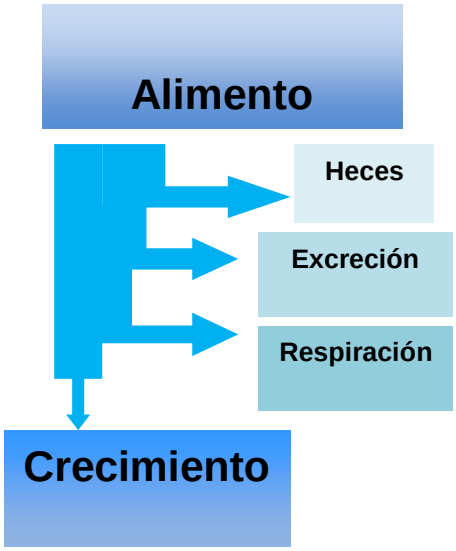



*Figura 31: Modelo de balance de nutrientes para calcular la producción de residuos (N, P and COD) originados por el alimento.*

En este estudio de caso, la cantidad de residuos viene dada por el modelo de balance de nutrientes (Figura 31) para el nitrógeno (N), fósforo (P) y la demanda química de oxígeno (DQO). La DQO es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar 1 kg de material, y por lo tanto, puede utilizarse como denominador común para caracterizar el contenido orgánico de los peces, los piensos, los residuos y los derivados bacterianos. La fracción orgánica se compone de proteínas, grasas e hidratos de carbono. Las proteínas no se oxidan completamente, y el nitrógeno orgánico no está oxidado. La DQO puede calcularse a partir de la composición de la materia orgánica como el sumatorio de cada componente multiplicado por su respectivo factor (= Σ [(proteína*1.38)+ (grasa *2.78) + (carbohidratos *1.21)]).[34]

| Peso de los peces | | Proteína | Grasa | Ceniza | P | E | DQO | DigN | DigP | DigCOD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Inicial | Final | % | % | % | % | kJ/g | g/kg | % | % | % |
| 70 | 845 | 38 | 11 | 11.1 | 1.2 | 18.4 | 1 192 | 0.90 | 0.60 | 0.85 |

*Tabla 47: Composición del alimento y digestibilidad del N, P y DQO.*

A fin de calcular la cantidad de residuos que se producen cuando se aporta 1 kg de pienso como alimentación, hay que conocer la composición y la digestibilidad del pienso (Tabla 47) y la composición de los peces (Figura 32). La excreción de N y P se puede calcular como la diferencia entre el alimento digerible (piensos menos heces) y el crecimiento. El consumo de oxígeno de los peces puede calcularse como:

$$DQO_{respiración} = (ME_m + [1-k_g] * ED) / OCE \qquad (1)$$

donde:

$ME_m$ = energía necesaria para el mantenimiento, para la tilapia 65 $kJ/kg^{0.8}/d$
ED = energía de deposición (crecimiento en energía, kJ / peces / d)
$k_g$ = eficiencia marginal de la deposición de energía, para la tilapia 0.7
OCE = equivalente oxicalórico, 14.2 kJ / g de $O_2$

Con base en estos pasos, la producción de residuos para el aporte de alimento máximo en una producción de 100 Tm de tilapia del presente estudio de caso se muestra en la Tabla 48. Aunque no hay una excreción directa de DQO por los peces, todavía hay una pequeña cantidad de DQO que falta en el balance (DQOrest). Esta cantidad, probablemente derive del alimento no consumido disuelto y heces, se trata como "DQO excreción".

[34] Nota: El nitrógeno orgánico también puede ser oxidado pasando de $NH_4$-N a $NO_3$-N. Esta reacción teóricamente requiere 4,57 g $O_2$ / g de N. Añadiendo esta cantidad a la DQO tendremos la demanda total de oxígeno (TOD). En el proceso de utilización del alimento y crecimiento, los peces también oxidan parte de la materia orgánica del alimento. El consumo de oxígeno de los peces (la respiración), por lo tanto, también puede ser expresada directamente en DQO(1).

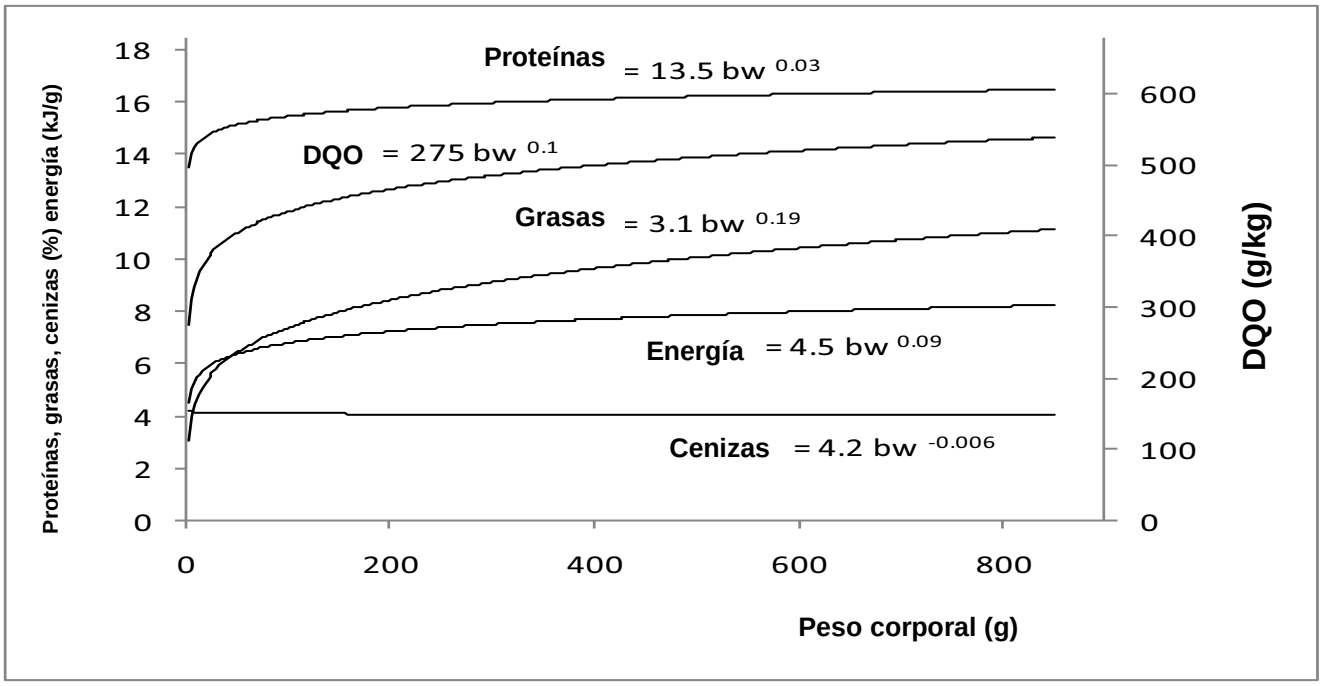



*Figura 32: Composición general del cuerpo de las tilapias de ZonAquaculture B.V. influenciado por el peso corporal*

**Marco 2. Cálculo de la producción de residuos a la máxima carga de alimentación.**

La composición corporal de los peces del grupo 8 es: $N_{pez}$= 0.16 * 13.5 * 126 $^{0.03}$ * 10 = 25.0 gN/kg,$P_{pez}$= 0.17 * 4.2 * 126 $^{-0.006}$ * 10 = 6.9 gP/kg, $DQO_{pez}$= 275 * 126 $^{0.1}$ = 446 gDQO / kg y $E_{pez}$ = 4.5 * 126 $^{0.09}$ = 7.0 MJ/kg **Nota**: la proteína de pescado contiene 16% N y las cenizas del pescado contienen 17% de P.

La composición y la digestibilidad de los alimentos se pueden tomar de la Tabla 47. La proteína del alimento también contiene 16% N.

Las cantidades de N, P y DQO en el alimento pueden ser calculadas como por ejemplo, $N_{alim}$ = 24 (kg pienso) * 0.0608 (kgN / kg de pienso) ≈ 1.43 kgN / d.

Las cantidades de N, P y DQO en las heces puede calcularse a partir de la digestibilidad como, por ejemplo, $N_{heces}$ = (1 – 0.9) * 1.43 = 0.14 kgN/d.

Las cantidades de N, P y DQO de crecimiento pueden calcularse como por ejemplo, $N_{crec.}$ = 21 (kg crecimiento) * 0,025 (kg $N_{pez}$ / kg) ≈ 0.52 kgN / d.

La excreción de N y P se puede calcular, por ejemplo: $N_{alim}$ - $N_{crec}$ - $N_{heces}$ = 1.43 – 0.52 – 0.14 = 0.76 kgN/d.

Para calcular el DQO respirado por los peces primero hay que calcular la energía de la deposición: ED = 21 (kg crecimiento) * 7.0 (MJ / kg) = 147 MJ / d. El $DQO_{resp}$ pez es entonces [(65/1000 * 0.126 $^{0.8}$ * 6,852) + (1 – 0.7) * 147 ]/14.2 ≈ 9.6 kgDQO/d.

El $DQO_{rest}$ es DQO $_{alim}$ – DQO $_{crec.}$ – DQO $_{heces}$ – DQO $_{resp}$ = 28.1 – 9.4 – 4.2 – 9.6 = 4.9 kgDQO/d.

| **Tanque** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** | **Total** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cohorte** | **1a** | **1b** | **5** | **2a** | **2b** | **6** | **3a** | **3b** | **7** | **4a** | **4b** | **8** | | | | |
| Semanas | 24 | 24 | 12 | 21 | 21 | 9 | 18 | 18 | 6 | 15 | 15 | 3 | | | | |
| Peso corporal | 845 | 845 | 368 | 716 | 716 | 273 | 592 | 592 | 193 | 476 | 476 | 126 | **24.5** | max Stock (MT) | | |
| Número | 3414 | 3414 | 6836 | 3415 | 3415 | 6840 | 3416 | 3416 | 6845 | 3417 | 3417 | 6852 | | | | |
| Alimento | 32 | 32 | 40 | 29 | 29 | 35 | 26 | 26 | 30 | 23 | 23 | 24 | **349** | kg/d | | |
| FC | 1.46 | 1.46 | 1.30 | 1.43 | 1.43 | 1.25 | 1.39 | 1.39 | 1.19 | 1.35 | 1.35 | 1.12 | **1.34** | - | | |
| Crecimiento | 22 | 22 | 31 | 20 | 20 | 28 | 19 | 19 | 25 | 17 | 17 | 21 | **261** | kg/d | | |
| Npez | 26.4 | 26.4 | 25.8 | 26.3 | 26.3 | 25.6 | 26.2 | 26.2 | 25.3 | 26.0 | 26.0 | 25.0 | | | | |
| Ppez | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | 6.9 | | | | |
| DQO pez | 540 | 540 | 496 | 531 | 531 | 482 | 521 | 521 | 465 | 509 | 509 | 446 | | | | |
| Epez | 8.3 | 8.3 | 7.7 | 8.1 | 8.1 | 7.5 | 8.0 | 8.0 | 7.2 | 7.8 | 7.8 | 7.0 | | | | |
| Nalimento | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | 60.8 | | | | |
| Palimento | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | | | | |
| DQO alim. | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | | | | |
| DigN | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | | | | |
| DigP | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | | | | |
| DigDQO | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | | | | |
| Nalimento | 1.96 | 1.96 | 2.46 | 1.74 | 1.74 | 2.13 | 1.61 | 1.61 | 1.81 | 1.40 | 1.40 | 1.43 | **21.2** | kg/d | | |
| Ncrecim. | 0.58 | 0.58 | 0.80 | 0.53 | 0.53 | 0.72 | 0.50 | 0.50 | 0.63 | 0.44 | 0.44 | 0.52 | **6.8** | kg/d | **32** | % entrada |
| Nheces | 0.20 | 0.20 | 0.25 | 0.17 | 0.17 | 0.21 | 0.16 | 0.16 | 0.18 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | **2.1** | kg/d | **6** | g/kg alim. |
| Nexcr. | 1.18 | 1.18 | 1.41 | 1.04 | 1.04 | 1.20 | 0.95 | 0.95 | 1.00 | 0.82 | 0.82 | 0.76 | **12.3** | kg/d | **35** | g/kg alim. |
| P alim. | 0.39 | 0.39 | 0.48 | 0.34 | 0.34 | 0.42 | 0.32 | 0.32 | 0.36 | 0.28 | 0.28 | 0.28 | **4.2** | kg/d | | |
| Pcrec. | 0.15 | 0.15 | 0.21 | 0.14 | 0.14 | 0.19 | 0.13 | 0.13 | 0.17 | 0.12 | 0.12 | 0.15 | **1.8** | kg/d | **43** | % entrada |
| P heces | 0.15 | 0.15 | 0.19 | 0.14 | 0.14 | 0.17 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | **1.7** | kg/d | **5** | g/kg alim. |
| Pexcrec. | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.02 | **0.7** | kg/d | **2** | g/kg alim. |
| DQOalim. | 38.4 | 38.4 | 48.2 | 34.1 | 34.1 | 41.7 | 31.6 | 31.6 | 35.5 | 27.4 | 27.4 | 28.1 | **416** | kg/d | | |
| DQO crec. | 11.9 | 11.9 | 15.4 | 10.6 | 10.6 | 13.5 | 9.9 | 9.9 | 11.6 | 8.7 | 8.7 | 9.4 | **132** | kg/d | **32** | % entada |
| DQO heces | 5.8 | 5.8 | 7.2 | 5.1 | 5.1 | 6.3 | 4.7 | 4.7 | 5.3 | 4.1 | 4.1 | 4.2 | **62** | kg/d | **179** | g/kg alim. |
| DQO resp. | 18.1 | 18.1 | 19.9 | 16.0 | 16.0 | 16.2 | 14.0 | 14.0 | 12.9 | 11.9 | 11.9 | 9.6 | **179** | kg/d | **512** | g/kg alim. |
| DQOrest | | | | | | | | | | | | | **43** | kg/d | **124** | g/kg alim. |

*Tabla 48: Producción de residuos al nivel máximo de aporte de alimento*

## Tasas de flujo y recambio de agua (caudales)

Para eliminar los residuos y reponer el oxígeno es necesario suministrar un flujo constante de agua para permitir que su calidad se mantenga dentro de límites aceptables para el pez. Las unidades de tratamiento también necesitan un flujo de agua que les proporcione los residuos a tratar. La fórmula general para calcular el caudal requerido es:

$$\text{Flujo} = \text{abs}\,[k * P / \Delta C] \qquad (2)$$

donde

Flujo = Caudal que atraviesa cada compartimento respectivo ($m^3$/tiempo)
k = factor para corregir la variación diaria en la producción de residuos ($k \geq 1$)
P = producción (o el consumo de $O_2$), de los residuos (g/hora)
$\Delta C$ = la diferencia entre la concentración limitante ($C_{limit}$) detectada a la salida del tanque para un residuo determinado y la concentración del mismo residuo detectada a la entrada ($C_{in}$), ambas en g/$m^3$.

Debido a que algunas producciones son negativas y también porque la diferencia de concentraciones tiene signos opuestos para las unidades de peces y las unidades de tratamiento, se determina el valor absoluto. Esta fórmula sólo funciona para sustancias mezcladas más o menos idealmente y por lo tanto no es aplicable a sólidos suspendidos, los cuales pueden aparecer en una variedad de tamaños de partículas, desde gránulos de alimento y heces de varios mm a partículas de tamaño de micras (µm). Bajo condiciones extremas de flujo, por ejemplo en tanques rectangulares muy largos o con un gran tiempo de retención hidráulica, pueden aparecer algunas desviaciones. En la Tabla 49 se aportan los limites de calidad de agua y los valores k junto con las opciones escogidas en el presente estudio para la nitrificación y desnitrificación (véase también la **sección de sistemas de tratamiento**).

| **Parámetros de calidad de agua** | | Peces | | Valor k | | Nitrificación | Desnitrificación |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *Rango* | *Elección* | *Rango* | *Elección* | | |
| Temperatura | (°C) | 24-28 | 27 | | | 27 | 27 |
| pH | (-) | 5.5-7.5 | 7 | | | 7 | 7 |
| $NH_3$-N | (g/$m^3$) | 0.01-0.1 | 0.01 | | | | |
| TAN | (g/$m^3$) | | 1.5 | 1-2 | 1.4 | | |
| $NO_2$-N | (g/$m^3$) | 0.05-1 | 1 | | | | |
| $NO_3$-N | (g/$m^3$) | 100-200 | 165 | 1-2 | 1 | | 10 |
| $O_2$ | (g/$m^3$) | 4-6 | 4.5 | 1-1.2 | 1.2 | 4.5 | |
| $CO_2$ | (g/$m^3$) | 15-20 | 15 | 1-1.2 | 1.2 | | |
| DQO disuelto | (g/$m^3$) | 100-300 | 200 | 1-2 | 1 | | |
| Sólidos suspensión | (g/$m^3$) | | 25 | | | | |

*Tabla 49: Calidad del agua y límites de valores k para corregir la variación diaria en la producción de residuos*

Puesto que se ha demostrado en la **sección de producción de residuos** que (P) conviene expresarla por kg de pienso, se deduce que el flujo también debe ser expresado de la misma forma. En la Tabla 50 se presentan los flujos (caudales) para los diferentes compartimentos en el sistema según la configuración (flujo abierto y constante, reutilización, SAR). Se puede observar que el flujo (caudal) a través del sistema necesita grandes cantidades de agua, porque las tasas de renovación igualan al flujo a través de los tanques. Incorporando sistemas de tratamiento, las tasas de renovación se pueden reducir a expensas de los caudales añadidos a través de estos sistemas de tratamiento. Para algunos tratamientos que se aplican a la entrada de los tanques (oxigenación) o en el propio tanque de peces (aireación), no es necesario añadir caudales. La oxigenación y aireación realmente reducen el flujo de agua a través de los tanques de peces, y por lo tanto también la tasa de renovación de agua en el sistema. Los sistemas con reducción de hasta el 15% (o menos) de las tasas de recambio de agua se llaman sistemas de reutilización y cuando las reducciones son mayores al 15% se habla de sistemas de recirculación (SAR). Se puede observar que cuando un SAR convencional reduce el intercambio de agua a un 1% de ese flujo a través del sistema, la integración de un USB-MDR da una nueva reducción hasta el 0.15%.

| | Flujo constante | Reutilización | Convencional | USB-MDR |
|---|---|---|---|---|
| **Tasa de renovación en el tanque** | | | | |
| TAN | 32 | 32 | 61 | 74 |
| $O_2$ | 204 | 59 | 59 | 59 |
| $CO_2$ | 94 | 37 | 70 | 74 |
| Sólidos suspendidos | ? | ? | ? | ? |
| Elección (máximo) | 204 | 59 | 70 | 74 |
| **Renovación en el sistema** | | | | |
| Renovación en el tanque | 204 | 59 | | |
| $NO_3$-N | | | 0.187 | 0.029 |
| **Caudal para eliminar sólidos suspendidos** | | | | |
| Renovación en el tanque | n/a | n/a | 70 | 74 |
| **Caudal de nitrificación** | | | | |
| Renovación en el tanque | n/a | n/a | 70 | 74 |
| **Caudal de desnitrificación** | | | | |
| $NO_3$-N | n/a | n/a | n/a | 0.210 |

n/a = no aplicable

*Tabla 50: Flujos de agua (caudales) a través de los diferentes compartimentos del sistema en $m^3$/kg alimento.*

**Marco 3. Cálculo de caudales en un SAR con un USB-MDR.**

**Renovación en los tanques**

Para el nitrógeno total (TAN) en los sistemas abiertos y de reutilización $\Delta C = C_{limit}$ (suponiendo que no hay TAN en el agua de entrada) y, por tanto, el flujo = abs [1.5 * 35 / 1.5] = 35 $m^3$/kg pienso. En un SAR el flujo (caudal) a través de los tanques es el mismo que se necesita para el filtro de nitrificación (Marco 7) 61 $m^3$/kg pienso para SAR convencionales y 75 $m^3$/kg pienso para un SAR con USB-MDR.

Para $O_2$, P = -512 $gO_2$/kg pienso y $\Delta C$ = -10,5 g/$m^3$ (Marco 4), por lo que el flujo = abs [1.2 * -512 /-10.5] ≈ 59 $m^3$/kg pienso.

Para el $CO_2$, P = 633 $gCO_2$/kg pienso (RQpez = 0,9) y $\Delta C$ = 10,3 g/$m^3$ (marco 5), por lo que el flujo = abs [1.2 * 633 / 10.3] = 74 $m^3$/kg pienso.

**Sistema de intercambio**

Para $NO_3$-N, P espontáneo que queda después de la desnitrificación del USB-MDR = 4,8 gN/kg de pienso (=1.7kg N/349 kg de pienso) y $\Delta C$ = 165 - 0 = 165 g/$m^3$, por lo que el flujo = abs [1 * 4.8 / 165] = 0.029 $m^3$/kg pienso.

**Flujo de desnitrificación**

Para $NO_3$-N, P que queda después de la desnitrificación espontánea = (15 800/349) * 0.85 = 38.5 gN/kg pienso (Marco 10) de los cuales 85% es desnitrificado y $\Delta C$ = 10 - 165 = -155 g/$m^3$, por lo que el Flujo = abs [1 * (38.5 * 0.85) /-155] ≈ 0.210 $m^3$/kg

## Sistemas de tratamiento

En la sección anterior (Caudal) se demostró que la incorporación de sistemas de tratamiento puede reducir el flujo de intercambio de agua en el sistema. La elección del tratamiento que debe añadirse se basa en el primer componente limitante de los residuos. Por ejemplo, se puede comprobar en la Tabla 50 que añadiendo oxigenación a un sistema abierto (de flujo continuo) la tasa de renovación requerida por el sistema se reduce de 203 a 94 $m^3$/kg pienso, es decir, la primera es la limitación impuesta por los residuos consumidores de oxígeno (que llevan a su agotamiento). La siguiente limitación de los residuos después del oxígeno es el $CO_2$, y así sucesivamente. En esta sección, los sistemas de tratamiento serán discutidos en el orden determinado por las principales limitaciones impuestas por los residuos. Para la mayoría de los sistemas de tratamiento sólo se refieren las bases o fundamentos. La desnitrificación con el empleo del USB-MDR se describe con mayor detalle. Además se mencionan brevemente dos sistemas de tratamiento

que en realidad no reducen el intercambio de agua en el sistema pero si aumentan su sostenibilidad (intercambio de calor mediante ventilación y tratamiento de lodos).

## Oxigenación

El oxígeno puede ser añadido al agua de producción mediante aireación (poniendo en contacto el agua con el aire) o mediante oxigenación (en contacto con el gas enriquecido en oxígeno). Con aireación, la cantidad máxima de oxígeno sólo puede llegar al punto de saturación. Mediante la oxigenación, el agua de entrada puede ser supersaturada (sobresaturada). Esto no significa que el agua en los tanques de los peces este supersaturada; en los sistemas cuya mezcla es completa, el agua en los tanques presenta una concentración igual a la del flujo de salida (ver **sección caudales**). En el presente estudio de caso, el agua es oxigenada a la entrada de los tanques de peces mediante oxigenadores de baja presión con una razón gas-líquido (G/L ratio) de 0.05.

*Parámetros de control:* Superficie de contacto, tiempo de contacto, relación gas-líquido.

**Marco 4. Oxigenación**

Con los oxigenadores de baja presión, la concentración de $O_2$ en la entrada del agua a los tanques de peces llega hasta el 200% de saturación = 15 g/m$^3$. Con la limitación de la concentración de $O_2$ (=concentración del agua a la salida de los tanques de peces) se llega a 4,5 g/m$^3$, por lo tanto :

$\Delta C$ = -10,5 g/m$^3$ .

**Nota:** Con el empleo de oxígeno líquido en la práctica se asume que todas las necesidades de $O_2$ (tanto de los peces como de las bacterias) están cubiertas por la oxigenación y que el oxígeno líquido se aplica con una eficiencia del 80% (es decir, el oxígeno empleado $O_2$ = 1.25 * necesario)

## Eliminación de dióxido de carbono

La eliminación de dióxido de carbono ($CO_2$) se realiza mediante desgasificación (stripping[35]). Esta operación se puede hacer por aireación o bombeando el agua a una columna hermética (torre) que funciona como un filtro percolador (por goteo[36]). En el presente estudio de caso se utilizan burbujas de aireación tanto en los tanques como en el filtro biológico de lecho móvil (nitrificación).

*Parámetros de control:* Superficie de contacto, tiempo de contacto y relación gas-líquido

**Marco 5: Desgasificación ($CO_2$ stripping)**

La aireación en tanques de peces aumenta la $\Delta C$ efectiva = $C_{limit}$ - $C_{in}$ para el $CO_2$, pero como $C_{limit}$ es constante (15 g/m$^3$) se disminuye la $C_{in}$ efectiva. Con una eficiencia de desgasificación SE, la $\Delta C$ efectiva = $\Delta C$ / (1 - SE). En un SAR desconocemos el $C_{in}$ pero si sabemos cuál es la producción de $CO_2$ por los peces (Marco 3) y el hecho de que en la práctica un flujo de 70 m$^3$/kg de pienso es suficiente en el SAR convencional, por ello podemos calcular la eficiencia de desgasificación en 0.4 y la efectiva $C_{in}$ = 4,2 g/m$^3$ ($\Delta C$ = 10.8 g/m$^3$). En el SAR con un USB-MDR produce más $CO_2$ en los filtros biológicos y la efectiva $C_{in}$ en los tanques de los peces es $C_{in}$ = 4.7 g/m$^3$ ($\Delta C$ = 10.3 g/m$^3$).

## Eliminación de los sólidos en suspensión

La eliminación de los sólidos en suspensión del agua de producción se realiza por métodos gravitacionales (sedimentación, flotación, hidrociclón[37]) o filtración (filtros convencionales, de recorrido, microtamices, etc). Para todos los tipos de filtro, la distribución según tamaño de partícula en el residuo dictará su diseño, de forma indirecta a través de la distribución de las partículas según su peso en los que emplean métodos gravitacionales y directamente para los que emplean métodos de filtración. En el presente estudio de caso se ha empleado un filtro de tambor de 80 micras de malla.

[35] Stripping: Operación petroquímica básica, consistente en la extracción de las fracciones más volátiles del petróleo (generalmente por inyección de vapor de agua) en columnas de rectificación. Diccionario Enciclopédico Vox 1. © 2009 Larousse Editorial, S.L.

[36] El agua entra por la parte superior de la unidad, donde es inyectada a presión como rocío por una serie de boquillas de baja presión, proporcionando una elevada superficie del agua. Luego, el agua cae a través de una cámara de contacto de aire/agua. A medida que el aire fluye en contra de las gotas de agua, el dióxido de carbono es extraído y el oxígeno es absorbido hasta que los gases están esencialmente en equilibrio con el aire atmosférico. Un conducto dirige el dióxido de carbono húmedo fuera de la unidad

[37] Un hidrociclón ´lleva incorporado un motor y separa las partículas gracias a la velocidad de rotación que se genera al ser inyectada el agua de forma tangencial en el interior del cuerpo. Como consecuencia de la fuerza centrífuga, las partículas sólidas se desplazan hacia la pared del cono del hidrociclón, donde prosiguen una trayectoria espiral descendente debido a la fuerza de gravedad. De esta forma, las partículas sólidas son arrastradas a la parte inferior del hidrociclón donde se almacenan en un depósito colector. El agua limpia sale del hidrociclón a través del tubo situado en la parte superior.
Fuente: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Catalogos/HidraulicaRiegos/RegaberHidrociclones.pdf

*Parámetros de control:* Distribución de las partículas por peso y tamaño

**Marco 6. Filtro de tambor**

Para el diseño del filtro de tambor se puede elegir un filtro específico (http://www.hydrotech.se/en/solutions/drumfilters) sobre la base de la matriz de Caudal (l / s), Temperatura (° C), carga esperada de sólidos suspendidos (g/m3) y malla (micras, µm).

## Nitrificación

La eliminación del nitrógeno total (TAN) del agua de producción en los sistemas de acuicultura se realiza generalmente por el proceso de nitrificación que se define como la oxidación biológica bacteriana del amoníaco ($NH_3$) a nitrato ($NO_3$). Esta reacción se desarrolla en dos etapas, por los distintos grupos de bacterias (Nitrosomonas y Nitrobacter), con los nitritos ($NO_2$) como metabolitos intermediarios. La ecuación de la reacción general es:

$$1 \text{ g de } NH_3\text{-N} + 4.25\text{g } O_2 + 5.88\text{g } NaHCO_3 \rightarrow 0.26\text{g DQO} + 0.98\text{g } NO_3\text{-N} + 2.72\text{g de } CO_2 \quad (3)$$

De esta reacción se puede observar que el proceso consume oxígeno y alcalinidad, produciendo además del $NO_3$, $CO_2$ y biomasa bacteriana. En este balance, por cada g de TAN se necesitan 4.25 g de $O_2$ y alrededor de 1 equivalente de alcalinidad y se producen 0,26 g de DQO. En los sistemas acuícolas las bacterias nitrificantes crecen generalmente en un sustrato plástico llamados biofilms. La tasa de reacción (velocidad) se expresa por tanto en superficie de plástico, en g/m$^2$/d. Dado que los sustratos de ésta reacción (TAN y O2) tienen que difundirse en el biofilm, la velocidad de reacción depende de la concentración del sustrato limitante. Debido a la cinética de la difusión, esta dependencia toma la forma de raíz cuadrada, la tasa depende de la concentración a una potencia ½ (o √ [Concentración]).

$$R \text{ tasa de nitrificación } r \text{ (g/m2/d)} = a * \sqrt{[TAN]} + b \quad (4)$$

Los valores a y b dependen del tipo de reactor (filtro biológico) utilizado para el proceso nitrificación. Para el filtro de lecho móvil utilizado en el presente estudio de caso a = 0.65 y b = -0.1. La relación de las concentraciones de $O_2$ y TAN en la cual uno u otro se convierten en tasa de sustrato limitante es de 3.6. Estas relaciones se muestran en la Figura 33, donde se puede observar que a bajas concentraciones de TAN la velocidad de reacción depende de la concentración de TAN, aunque no en concentraciones más altas. La concentración de TAN a la cual tiene lugar la transición, así como de la tasa de nitrificación, son dependientes de la concentración de oxígeno[38].

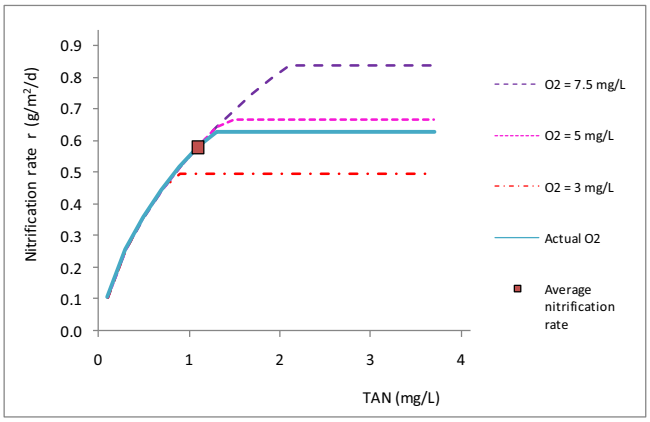



*Figura 33: Tasa de nitrificación (g TAN/m$^2$/d) influenciada por las concentraciones de nitrógeno total (TAN) y $O_2$. Tambien se muestra la tasa de nitrificación media en una granja de 100 Tm de tilapia del estudio de caso*

El flujo requerido a través del filtro de desnitrificación:

$$\text{Caudal } (m^3/\text{tiempo}) = P / \Delta C \quad (5)$$

Los parámetros de control para el diseño de los reactores de nitrificación, por lo tanto, son las concentraciones medias de TAN y $O_2$. Ellos van a determinar la tasa de nitrificación y, en consecuencia, la superficie total necesaria para el proceso y el flujo a través del reactor. Con la superficie del material biofiltro (m$^2$/m$^3$), se puede calcular el volumen de material requerido en el biofiltro.

[38] Cuando $C_{limit}$ para el TAN se encuentra cerca de [$O_2$] / 3,6, el valor medio de concentración de TAN será inferior a [$O_2$] / 3,6 durante parte del día y el valor medio de la tasa de nitrificación también será menor. Se puede corregir mediante la adopción de [TAN] = media $C_{limit}$ / k (para k, ver ecuación 2 en la **sección Caudal)**

*Parámetros de control:* Concentraciones de TAN y $O_2$ en el reactor de nitrificación

**Marco 7. Biofiltro de lecho móvil.**

Con $C_{limit}$ para TAN = 1.5 g/m$^3$ y [$O_2$] = 4.5 g/m$^3$, [$O_2$] / [TAN] está cercano a 3.6 y, por tanto, el valor medio [TAN] de nitrificación en el reactor [TAN] promedio= 1.5 / 1.4 ≈ 1,1 g/m$^3$ y de tasa de nitrificación r = 0.65 * √ [1.1] – 0.1 ≈ 0.58 gN/m$^2$/d.

El filtro de lecho móvil se llena de un sustrato (biorings) con una superficie de 800 m$^2$/m$^3$, por lo que con la cantidad de N para ser oxidado a la máxima carga de pienso de 12,6 kgN (para el SAR convencional, ver el marco 9) son necesarios 12 600 / 0.58 / 800 = 28 m$^3$ de sustrato (biorings). El filtro de lecho móvil se rellena con un factor de llenado 0.4, por lo que el volumen total será 27 / 0.4 = 71 m$^3$. Se supone también que el 95% del volumen total es agua, por lo que el volumen de agua para la nitrificación es de 0.95 * 75 = 67 m$^3$.

El flujo necesario a través del filtro de lecho móvil es Flujo = 12 600 / 0.59 ≈ 21 360 m$^3$ / d, o 21 360 / 349 = 61 m$^3$/kg pienso. Nota: ΔC y el flujo se determinaron simultáneamente por interacción.

Para el SAR con un USB-MDR, se debe oxidar más N (15,8 kgN / d, marco 10) y, por tanto son necesarios 34 m$^3$ de biorings (85 m$^3$ de volumen total, 81 m$^3$ de volumen de agua) y el flujo a través del filtro de lecho móvil se convertirá en 74 m$^3$/kg pienso.

## Desnitrificación

La eliminación de nitrato ($NO_3$) del agua de producción se puede hacer por desnitrificación. La desnitrificación biológica es la reducción bacteriana de $NO_3$ a $N_2$ gas y se realiza por bacterias heterótrofas aerobias facultativas. La reacción de desnitrificación se realiza en una serie de pasos con el $NO_2$, NO y $N_2O$ como metabolitos intermediarios. La ecuación de la reacción general es:

$$1g\ NO_3\text{-}N + 4.4g\ DQO \rightarrow 1.54g\ DQO + 1g\ N_2 + 0.085g\ NH_4\text{-}N + 5.49g\ NaHCO_3 + 0.88g\ CO_2 \quad (6)$$

De esta reacción se puede observar que el proceso consume DQO y produce, además de $N_2$, alcalinidad y biomasa bacteriana. Cada g de N-$NO_3$ puede oxidar 2.86 g de DQO mientras que se producen 0.91 equivalentes de alcalinidad y 1.54 g DQO (0.35 g DQO / g DQO). La demanda total de DQO por lo tanto es 2.86 / (1 – 0.35) = 4.4 g DQO / g de N. Sin embargo, si hay menos DQO disponible, la velocidad de reacción será menor[39] (Figura 35).

Las bacterias desnitrificantes pueden crecer en sustratos de plástico (como los llamados biofilms) o suspendidas (como en una "sopa" en los lodos). En este estudio de caso se ha empleado un reactor de lecho de lodos con flujo ascendente que lleva un agitador incorporado para facilitar la salida de gas del nitrógeno. La DQO interna, también llamada "estiércol" (manure) se utiliza con el nombre abreviado USB-MDR (**U**pflow **S**ludge **B**ed **M**anure **D**enitrifying **R**eactor) (Figura 34).

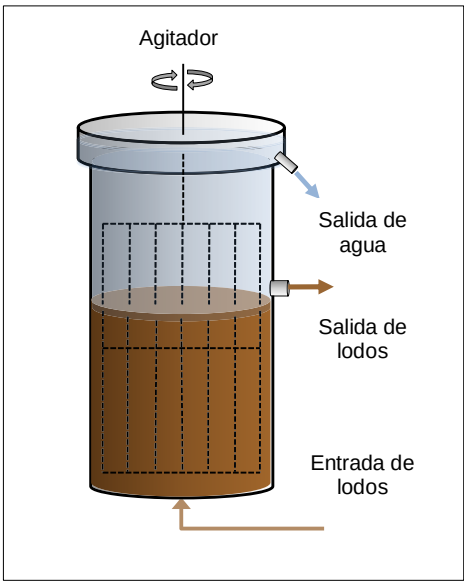



*Figura 34: Reactor desnitrificador de lecho de lodos con flujo ascendente (Upflow Sludge Bed – Manure Denitrifying Reactor: USB-MDR).*

El volumen de lodos requerido para el reactor de desnitrificación está determinado por la capacidad de eliminación específica de $NO_3$-N (gN/m$^3$/d). Esta capacidad de eliminación depende de la proporción de DQO/$NO_3$-N en los residuos afluentes (Figura 36) y de la cantidad de bacterias presentes, la densidad de los lodos (gSSV/m3), que a su vez depende de la velocidad de flujo (m/h) (Figura 35).

El volumen total del reactor está determinado por la proporción de volumen de lodos/volumen total. El diámetro y la altura del reactor se pueden calcular a partir del volumen total y la velocidad de flujo.

*Parámetros de control:* Relación DQO/$NO_3$-N en el residuo afluente, caudal (flujo ascendente).

[39] Nota: Incluso cuando no hay DQO disponible, aún hay una pequeña eliminación de $NO_3$-N de origen endógeno («ayuno »). La DQO utilizada por las bacterias desnitrificantes pueden ser de origen interno (las heces y pienso no consumido) o externo (por ejemplo, metanol).

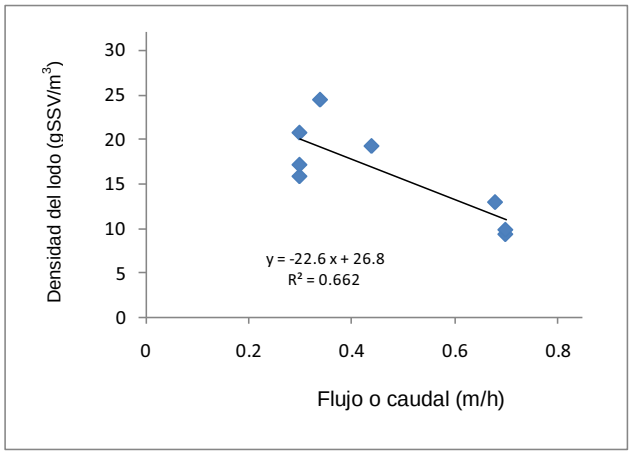



*Figura 36: La densidad del lodo está influenciada por la tasa de flujo afluente en el USB-MDR.*

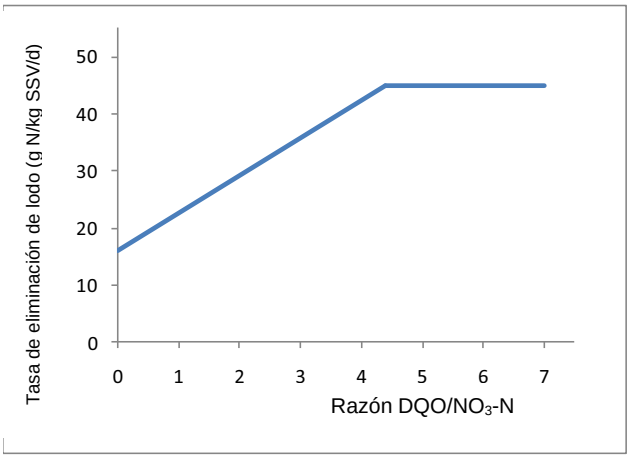



*Figura 35: La tasa de eliminación específica del lodo está influenciada por la razón DQO/ NO3-N en el residuo afluente. Con el residuo de DQO en una piscifactoría intensiva de tilapia, la tasa máxima de eliminación es 45 gN/kgSSV. La tasa de eliminación endógena es 16 gN/kgSSV. Por simplicidad se asume que la tasa de eliminación de lodos decrece linealmente con un descenso del ratio DQO/N.*

**Marco 8. Reactor desnitrificador de lecho de lodos con flujo ascendente (USB-MDR).**

La proporción de DQO/$NO_3$-N de los residuos afluentes al USB-MDR es de 5.1 (marco 10), que está por encima de 4.4 (ecuación 6), por lo que la velocidad de eliminación de lodos es máxima a 45 gN/kgSSV/d (Figura35).

En el presente estudio de caso hemos elegido un caudal de hasta 0,38 m / h, por lo que la densidad de los lodos es -22.6 * 0.38 + 26.8 = 18 kg SSV/$m^3$ (Figura 36), y la velocidad de eliminación específica de los lodos es 0.045 * 18 ≈ 0.82 kg N/$m^3$/d.

Con 11.3 kg de N-$NO_3$ disponible después de la desnitrificación espontánea, se necesitan 11.3 / 0.82 = 13.9$m^3$ de lodos. El volumen total del USB-MDR es 2 * 13.9. = 27.7$m^3$, lo que eleva el tiempo de retención hidráulica a TRH = 27.7/(349/24 * 0.210) = 9h. El tiempo de retención de los lodos puede calcularse a partir de la cantidad de lodos presentes (13.9$m^3$ * 18kg SSV/$m^3$ = 250kg) y el aporte diario de los lodos producidos (14.9/1.42 = 10.5kg, marco 10), como STR = 250 / 10.5 = 24 d.

El diámetro del USB-MDR puede calcularse a partir de la superficie de la sección transversal, que a su vez se puede calcular a partir del flujo a través del USB-MDR (marco 3) y el caudal máximo. Por flexibilidad hemos elegido instalar el USB-MDR como 3 unidades, cada una con un diámetro de 2 * √ [(349/24 * 0,210 / 3) / π] = 1.8m. La altura del USB-MDR se convierte entonces en (27.7 / 3) / [(1.8 / 2) 2 * π] ≈ 3.4 m.

## Intercambio de calor de ventilación

La piscifactoría intensiva de tilapia se ha aireado para mantener la concentración de $CO_2$ en el aire dentro de niveles aceptables. Las pérdidas de calor por la aireación pueden ser sustanciales, de 40 kW en el SAR convencional del presente estudio de caso, para 44 000 $m^3$ de gas al año. La aplicación de intercambio de calor en la ventilación de aire ahorraría aprox. 11 kW (12.000 $m^3$ de gas / año) y, al mismo tiempo reduciría la cantidad de evaporación de agua de 2.7 a 0.5 L / kg de pienso.

## Tratamiento de lodos

Para evitar una descarga de residuos grande y diluida (el flujo de un retrolavado de un filtro de tambor contiene menos del 0,1% de materia seca) y reducir los costes de eliminación de lodos, se puede aplicar un tratamiento de espesamiento. Esto se puede hacer con métodos de eliminación de sólidos, como los descritos anteriormente mediante sedimentación (balsa de digestión), flotación y filtración con microtamices. Otro método de filtración es el uso de Geotubes (bolsas de tejido polipropileno geotextil de alta resistencia) frecuentemente usadas para la contención y la deshidratación de los lodos.

En el presente estudio de caso, el retrolavado convencional de los lodos del filtro de tambor del SAR se espesó por flotación, resultando un lodo con 2% en materia seca. Los lodos del USB-MDR se espesaron con el empleo de polímeros y Geotubes, dando un contenido de materia seca final en los lodos del 9%.

### 9.2.3. Evaluación de los resultados de la comparación del SAR convencional con el SAR-USB-MDR

## Resultados del SAR convencional

Los flujos y el destino de los componentes de los residuos a la máxima carga de pienso en el SAR convencional se muestran en la Figura 37. De la calidad del agua observada en la práctica en el SAR convencional de la empresa ZonAquaculture se podría deducir que el 98% del N disuelto es oxidado y el 50% del disuelto DQO. Además se asume que se produce más de un10% de desnitrificación espontanea.

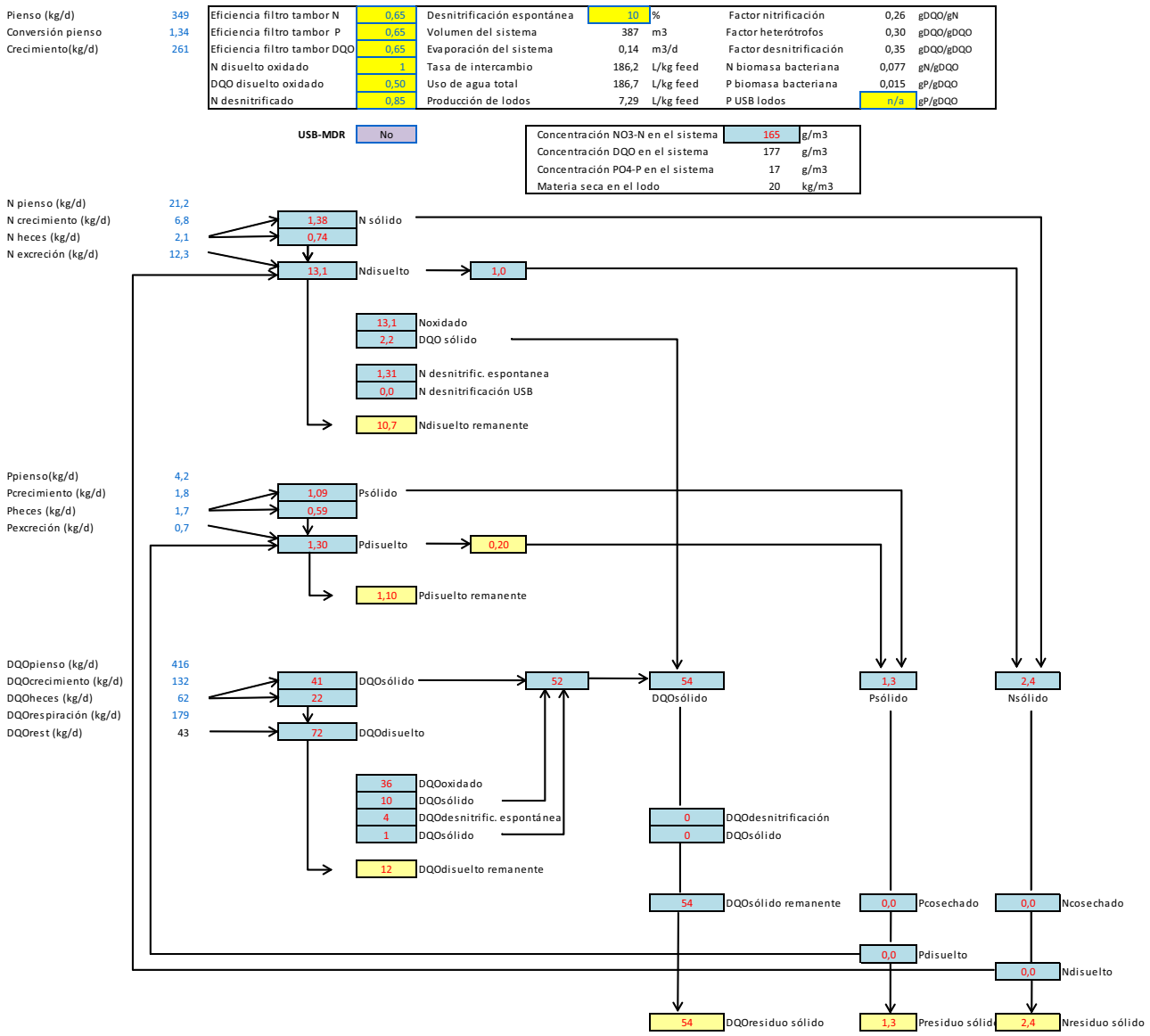
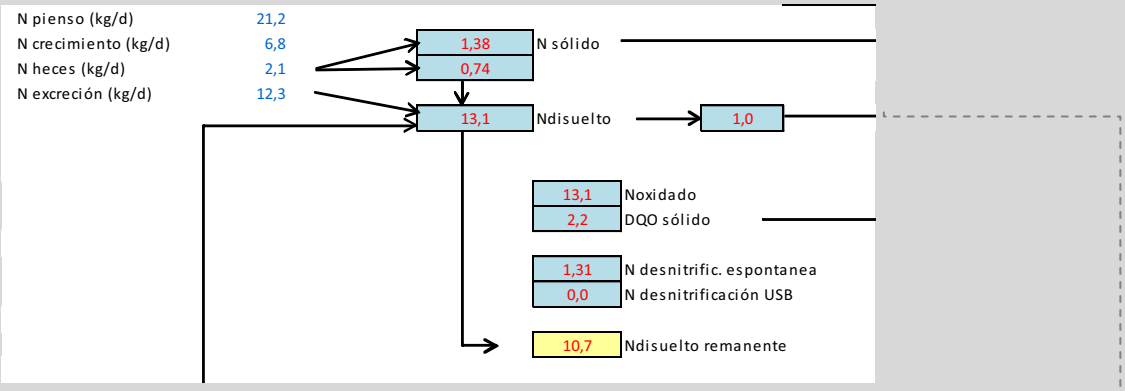
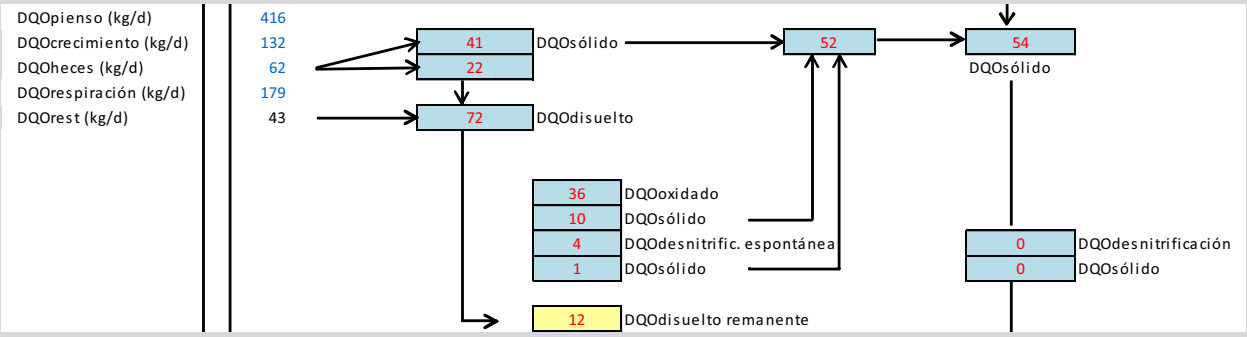



*Figura 37: Diagrama de flujo de N, P y DQO en el SAR convencional.*

**Marco 9. Cálculo de los flujos de N y DQO en el SAR convencional**




Los 2.1 kg N de las heces se eliminan por el filtro de tambor con una eficiencia de 0.65, resultando 1.38 kg N -sólido y 0.74 kg (re) disuelto. Esta fracción junto a los 12.3 kg N obtenidos vía excreción hacen un total de 13.1 kg N disuelto que se asume se oxida completamente. La nitrificación tiene un rendimiento ("cosecha") de DQO de 0.26g / g de N, de los cuales 65% es recogido por el filtro de tambor añadiendo 0.65 * 12.6 * 0.26 * 0.077 = 0.16kg N de la fracción N sólido. El resto del 1.0kg añadido a la N-sólida proviene de los rendimientos (crecimiento de la biomasa) de la desnitrificación espontánea y de la oxidación del DQO (véase más adelante). De la fracción N-oxidada 10% (1.3kg) es espontáneamente desnitrificada quedando un resto de 10.7kg $NO_3$-N. Para mantener una concentración de $NO_3$-N en el sistema de 165 g/m$^3$, el sistema debe tener un cambio de agua de 10.700 / 165 = 65 m$^3$ / d, o 65.000 / 349 ≈ 186 L / kg de pienso.




Los 62kg de DQO en las heces son eliminados por el filtro de tambor con una eficiencia de 0.65, resultando 44 kg en la fracción DQO-sólida y 22Kg en la fracción DQO-disuelta (re-disuelta). Junto con los 43kg DQOrest hay 72kg DQO-disueltos de los cuales 50% (36kg) se oxidan. Las bacterias heterotróficas dan un rendimiento de DQO de 0.30g / g de DQO, de los cuales 65% es capturado por el filtro de tambor añadiendo 0.65 * 36 * 0.30 / (1-0.30) = 10 kg DQO a la DQO-sólida. Otros 3 kg de la fracción DQO-sólida vienen del rendimiento de la nitrificación (véase más arriba) y la desnitrificación espontánea, lo que da un total de residuos sólidos de DQO de 54kg. Con un contenido en DQO en los lodos de 21.3kg/m$^3$ (20kg/m$^3$ de materia seca, contenido en cenizas del 25%), esto dará como resultado un flujo de lodo de 54/21.3 = 2.5 m$^3$ / d, o 2.500 / 349 ≈ 7,3 L / kg de pienso. Teniendo en cuenta que el recambio total de agua en el sistema es de 65 m$^3$ / d, la concentración de DQO disuelta en el sistema será de 12 000 / 65 ≈ 177 g/m$^3$.

## Resultados del SAR-USB-MDR

Los flujos y el destino de los componentes de los residuos a la máxima carga de alimentación en el SAR con un USB-MDR integrado se muestran en la Figura 38. De la calidad del agua observada en la práctica en la piscifactoría ZonAquaculture que opera con un SAR con un reactor de desnitrificación incorporado, se puede inferir que el 56% de la DQO disuelta es oxidada. Se asume que la desnitrificación espontánea equivale a más del 15% del N oxidado mientras que el 85% del $NO_3$-N restante se desnitrifica. El cambio de agua en el sistema podría reducirse aún más puesto que todavía hay disponible $NO_3$ y DQO. Sin embargo, la acumulación de sustancias (conocidas y desconocidas) incrementa exponencialmente cuando la renovación se reduce.

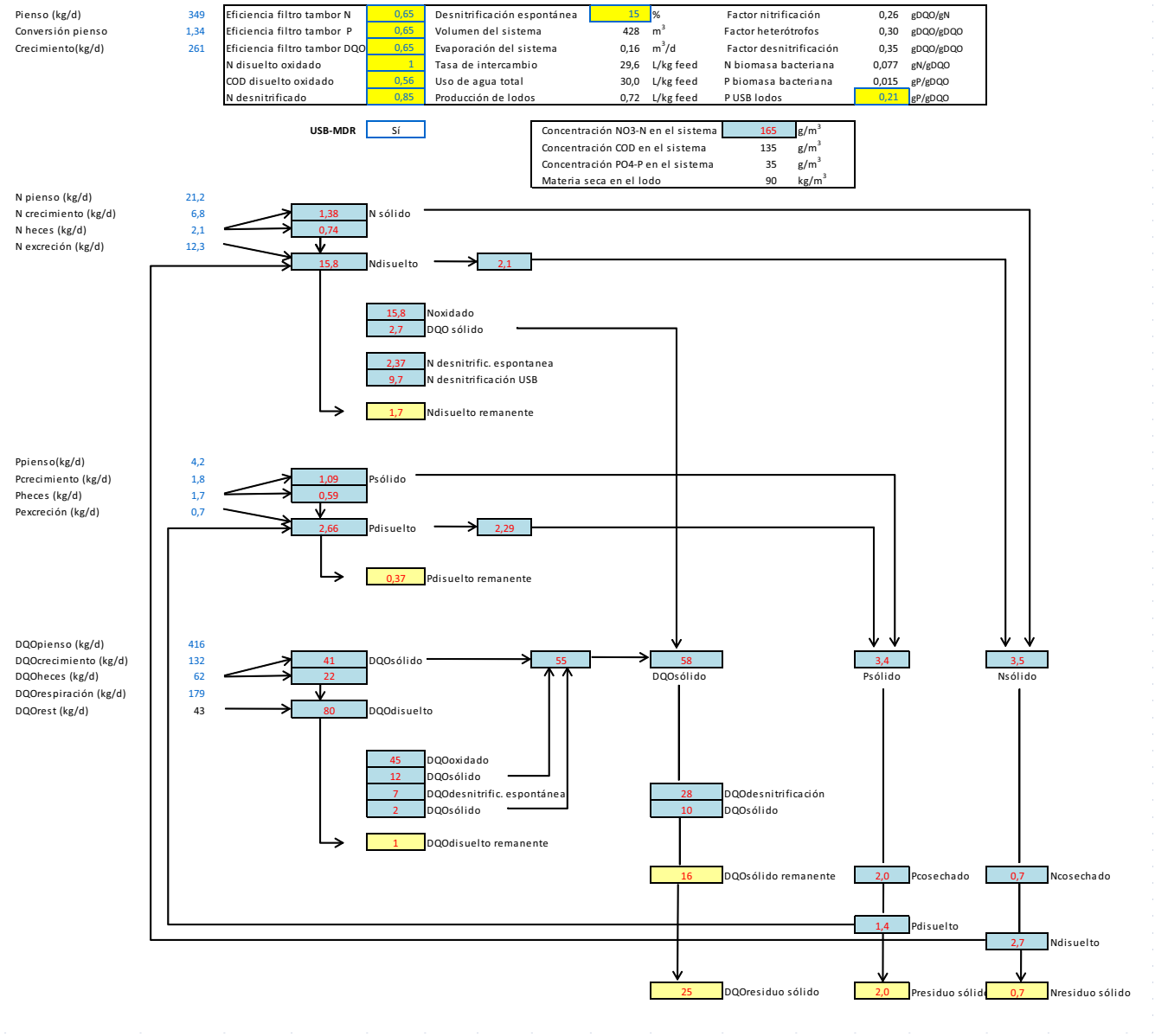
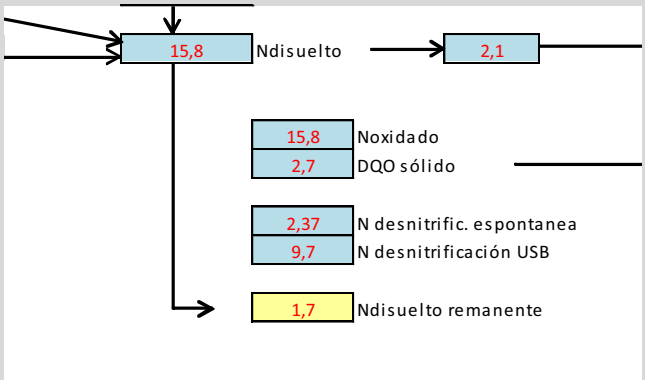
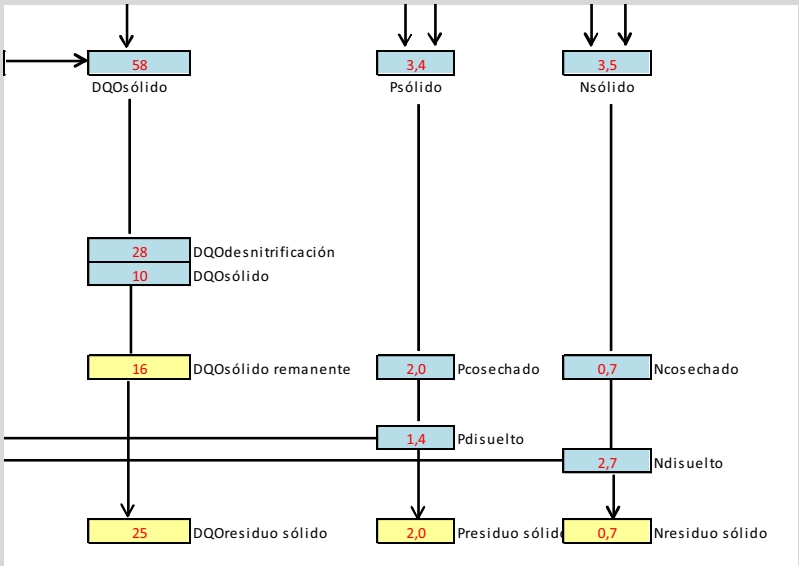



*Figura 38: Diagrama de flujo de N,P, y DQO en el SAR-USB-MDR*

**Marco 10. Efecto de la desnitrificación en los flujos de N, P y DQO con un SAR-USB-MDR**




A diferencia del SAR convencional, cuando se incorpora una unidad de tratamiento USB-MDR se consigue que 2.7 kg más de N sean re-disueltos con lo cual, la fracción N-disuelta es de 15.8 kg la cual se asume que se oxida completamente. Después de la desnitrificación espontánea (15%,2.4kg), y teniendo en cuenta que todo el N se incorpora en la biomasa bacteriana (2.1kg), el resto de $NO_3$-N (11.4kg) se supone que el 85% se desnitrifica, quedando un resto de 1.7kg $NO_3$-N. Para mantener una concentración de $NO_3$-N de 165 g/m$^3$ en el sistema, el recambio de agua en el mismo debe ser de 1 700 / 165 = 10 m$^3$ / d, o 10.000 / 349 = 30 L / kg de pienso. Nota: De hecho se eligió la cifra de 85% para mantener un sistema de intercambio de agua de aprox. 30 L / kg de pienso tal como se observa en la práctica.




En el SAR-USB-MDR también hay más DQO- sólida disponible (58kg). La proporción de residuos DQO/$NO_3$-N en el afluente de la USB-MDR es 58/11.4 = 5,1 g DQO/ gN. Nota: También se puede observar que los residuos DQO-sólidos en el afluente de la USB-MDR se componen de 70% (41kg/58kg) de residuos de heces “frescas” y el 30% de residuos “reciclados” (biomasa bacteriana).

Los 9.7kg $NO_3$-N desnitrificados, “oxidan” 28kg DQO (9.7 * 2.86), produciendo [2. 86 / (1-0.35) -2.86] * 9.7 = 14.9kg de rendimiento de DQO de los cuales 65% (aprox. 10 kg) son capturados por el filtro de tambor. Junto con el resto de la fracción DQO-sólida (15 kg) esto da un total de DQO-sólida de 25kg. Un Geotube captura cerca del 95% de esta fracción. Con un lodo que contiene 95.9kg/m$^3$ (90kg/m$^3$ de materia seca, contenido en cenizas del 25%), se obtiene como resultado un flujo de lodo (25 * 0.95) / 95.9 = 0.25 m$^3$ / d, o 250/349 ≈ 0. 7 L / kg de pienso.

De la calidad del agua observada en la práctica en el SAR de ZonAquaculture con la desnitrificación, una concentración de aproximadamente DQO. 200g/m$^3$ y una concentración de fosfato P ca. 35g/m$^3$, se puede inferir que el 56% de la DQO disuelta se oxida, pero también que debe haber un sumidero de fósforo en el sistema porque el rendimiento requerido para mantener una concentración (P lodos USB = 0.21 gP / gDQO) no se ha comprobado en la práctica.

### 9.2.4. Parámetros de sostenibilidad

La Tabla 51 muestra los parámetros de sostenibilidad, el uso de los recursos por kg de peso producido, la utilización de nutrientes como % del aporte y la descarga de vertidos por kg cuando se comparan un SAR convencional con un SAR-USB-MDR. Se puede observar que la integración de un USB-MDR en el SAR reduce las necesidades de calor, agua y bicarbonato. A pesar de que el SAR-USB-MDR tiene más necesidades de electricidad, oxígeno, trabajo e inversiones iniciales, los costes reales de producción por kilo producido son 10% inferiores a los del SAR convencional. La descarga de nutrientes se reduce con la integración de un USB-MDR en 81%para N, 59% para DQO, 61% para DTO, 30% para $CO_2$ y 58% para STD.

| | ***SAR Convencional*** | ***SAR + USB-MDR*** | | ***SAR Convencional*** | ***SAR + USB-MDR*** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Uso del recurso** | | | **Vertido efluente** | | |
| Alevines (#/kg) | 1.2 | 1.2 | **Nitrógeno** | | |
| Alimento(kg/kg) | 1.22 | 1.22 | Sólido (g/kg) | 8.5 | 2.6 |
| Electricidad (kWh/kg) | 1.8 | 2.2 | Disuelto (g/kg) | 37.4 | 5.9 |
| Calor (kWh/kg) | 3.4 | 0.0 | **Fósforo** | | |
| Agua (L/kg) | 238 | 38 | Sólido (g/kg) | 4.5 | 7.2 |
| Oxígeno (kg/kg) | 1.18 | 1.26 | Disuelto (g/kg) | 3.8 | 1.3 |
| Bicarbonato (g/kg) | 252 | 107 [a] | **DQO** | | |
| Mano de obra (h/MT) | 12.5 | 13.1 | Sólido (g/kg) | 189 | 84 |
| | | | Disuelto (g/kg) | 40 | 9 |
| **Utilización de nutrientes** | | | **DOT** | | |
| | | | Sólido (g/kg) | 227 | 95 |
| Nitrógeno (% entrada) | 32 | 32 | Disuelto (g/kg) | 48 | 11 |
| Fósforo(% entrada) | 43 | 43 | **$CO_2$** (kg/kg incl. gas) | 1.58 | 1.10 |
| DQO (% entrada) | 32 | 32 | **Sólidos totales disueltos STD** (g/kg) | 62 | 28 |
| DOT (% entrada) | 32 | 32 | **Conductividad** (µS/cm) | 1060 | 2000 |

a) En la práctica la necesidad de bicarbonato (alcalinidad) es prácticamente nula (despreciable) cuando se aplica la desnitrificación.

*Tabla 51: Parámetros de sostenibilidad, uso del recurso por kg producido, eficiencia de utilización en % del aporte, descarga de residuo por kg producido.*

## *9.3. Módulo – Reactor de perifiton (PTS[40])*

### 9.3.1. Descripción general del estudio de caso

El perifiton es un conjunto heterogéneo de microorganismos (incluidas las microalgas y bacterias) que se desarrolla naturalmente al colonizar una superficie sumergida en un ambiente fototrófico. Los microorganismos adjuntos tienen una alta tasa de crecimiento relativo y se regeneran rápidamente después de cualquier perturbación. En este entorno dominan las diatomeas bentónicas[41] (céntricas, pennadas, unicelulares y filamentosas), los cocoides[42] y cianobacterias filamentosas[43] y algas verdes filamentosas[44] asociados a bacterias, protozoos y metazoos (nematodos, pequeños anélidos y microcrustáceos). El perifiton es una excelente fuente de alimento para muchas especies de peces en el ambiente natural. Los nutrientes disponibles en el entorno son aprovechados por estos organismos constituyendo un alimento de gran calidad nutritiva. Al tiempo que se desarrolla, el perifiton atrapa partículas inorgánicas y materia orgánica y mantiene la calidad del agua favorable para el resto de los organismos acuáticos.

El PTS es un "reactor" que favorece el desarrollo del biofilm de perifiton mediante un diseño simulador de olas para proporcionar constante aireación (suficiente oxígeno) y favorecer la nitrificación. Entre los beneficios del PTS se incluye la mejora de la calidad del agua y también la producción de perifiton adicional para la alimentación de los peces.

El empleo de un PTS en un sistema acuícola de recirculación (SAR) es innovador. En este proyecto, se estudiaron los criterios de diseño de un PTS para su integración a un SAR. Hasta el momento, la tecnología PTS para la depuración del agua en un RAS no es viable debido a las enormes necesidades de espacio (superficie iluminada) y de mano de obra (necesita ser cosechado regularmente) lo cual condiciona altos costes de electricidad y mantenimiento. Sin embargo, hay indicios de que las algas reducen las bacterias coliformes en los tratamientos terciarios de aguas residuales y esto podría ayudar al mantenimiento de la calidad microbiológica del agua en los tanques de peces de un SAR. Con la integración de un pequeño PTS (experimental) a un SAR se puede prevenir el desarrollo bacteriano excesivo al tiempo que las otras unidades de tratamiento (biofiltración y eliminación de sólidos) mantienen la calidad del agua. Por lo tanto, los parámetros de diseño desarrollados permitirán integrar la tecnología PTS en los SAR a pequeña o gran escala.

### 9.3.2. Principios del módulo

En los experimentos desarrollados se utilizaron cuatro SAR idénticos a escala de laboratorio. Cada sistema consta de:

- un tanque de 70 l para la producción de peces,
- un sumidero de idéntica capacidad (70 l) con una bomba sumergida (tipo EHEIM 1250219, 28W, 230V/50Hz, capacidad máxima de 20 l / m) para suministrar el agua al filtro biológico
- un filtro biológico percolador ( de goteo, con un flujo de 6 l / m )

[40] PTS = Periphyton Turf Scrubber (Depurador de césped/turba de algas)

[41] Las diatomeas son organismos fotosintetizadores que viven en agua dulce o marina constituyendo una parte muy importante del fitoplancton. Uno de los rasgos característicos de las células de diatomeas es la presencia de una cubierta de sílice (dióxido de silicio hidratado) llamado frústulo. Los frústulos muestran una gran diversidad de formas, algunos muy bellos y ornamentados y generalmente constan de dos partes asimétricas o valvas con una división entre ellas, de ahí el nombre del grupo. (http://es.wikipedia.org/wiki/Diatomeas)

[42] El nombre *Prochlorophyta* designa a un grupo de cianobacterias, denominadas *cloroxibacterias*. Son formas cocoides (esféricas) que aparecen asociadas. Son fisiológicamente como las algas verdes, puesto que realizan la fotosíntesis oxigénica, con los mismos pigmentos principales. Sin embargo, morfológicamente se parecen a las cianobacterias o algas verdeazuladas.

[43] Cyanobacteria (del griego *ciano* = azul) es el nombre de un filo del reino *Bacteria* (único del dominio del mismo nombre) que comprende a las cianobacterias y, en algún sentido, a sus descendientes por endosimbiosis, los plastos. Las cianobacterias se caracterizan por ser los únicos procariotas que llevan a cabo fotosíntesis oxigénica, por ello también se les denomina oxyphotobacteria. Las cianobacterias fueron designadas durante mucho tiempo como cianófitas (*Cyanophyta*, literalmente *plantas azules*) o cianofíceas (*Cyanophyceae*, literalmente *algas azules*), castellanizándose lo muy a menudo como **algas verdeazuladas**. Cuando se descubrió la distinción entre célula procariota y eucariota se constató que éstas son las únicas algas procarióticas, y el término *cianobacteria* (se había llamado siempre bacterias a los procariontes conocidos) empezó a ganar preferencia. Los análisis genéticos recientes han venido a situar a las cianobacterias entre las bacterias gramnegativas (http://es.wikipedia.org/wiki/Cyanobacteria)

[44] **Alga verde** es un término usado para denominar a un grupo informal de algas estrechamente relacionadas con las plantas terrestres. Taxonómicamente, incluye a los grupos de algas Chlorophyta y Charophyta. Como algas verdes se han descrito hasta ahora unas 10.000 especies diferentes, siendo las más diversas de todas las algas. Aunque se encuentran también en los mares, son más diversas en las aguas continentales (agua dulce) abarcando una amplia variedad de hábitat. Muchas son unicelulares, frecuentemente flageladas, pero otras desarrollan talos pluricelulares que nunca son muy complejos. La presencia de pigmentos (clorofila) y sustancias de reserva (almidón) como en las plantas terrestres (reino Plantae s.s.), revela su parentesco con ellas. Hoy en día se admite que las plantas terrestres derivan de algas verdes dulceacuícolas de la clase Charophyceae. (http://es.wikipedia.org/wiki/Alga_verde)

- un calentador eléctrico (tipo Heizer 300, 300W, 230V) para mantener la temperatura del agua a 25 ± 2 °C
- y un PTS de 40 l.

El tanque se colocó de tal manera que las vibraciones del PTS (debido a las salpicaduras de agua) no alcanzaran a los peces. La aireación se suministro mediante piedras difusoras. Además a cada sistema se añadió otro pequeño biofiltro percolador para evitar picos en las concentraciones de $NO_2$-. Cada sistema tiene un volumen total de 185 l.

El PTS en todos los sistemas tiene una superficie de 1,96 $m^2$ y una profundidad de alrededor de 1 cm. Cada tanque estaba provisto de una pantalla de malla de acero inoxidable de 3mm para soportar el crecimiento del perifiton y un pequeño deposito plástico (apoyado sobre un balancín) que se llena y vacía alternativamente cada 4 minutos ( recibe caudal de 6 l/m) creando ondas sobre la superficie de acero .

El agua efluente de los peces se aporta directamente al depósito PTS y de ahí al depósito sumidero desde el cual se bombea al biofiltro percolador antes de regresar al tanque.

Para realizar los experimentos se emplearon ejemplares de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) con peso medio inicial de 30-70 g y a una densidad de 2-5 kg/ tanque. Se alimentaron con pienso comercial a razón de 8 - 11 g $kg^{-0,8}$ $d^{-1}$ con 43-47% de proteínas.

### 9.3.3. Factores de éxito y limitaciones

Los experimentos realizados para comparar el efecto de la luz (altas y bajas intensidades) sobre el desarrollo del perifiton han mostrado que la luz afecta a la composición del mismo (mayor concentración de diatomeas y cianofíceas a bajas intensidades y algas verdes a altas intensidades) y también a la calidad de agua en el sistema pero en menor medida que la cantidad de perifiton producida. Los experimentos HSL[45] destinados a averiguar la influencia del flujo sobre la producción de perifiton así como los experimentos para averiguar la influencia de la relación C/N fueron ejecutados a bajas intensidades de luz.

En los estanques, cuando el perifiton crece en los extremos y en los fondos someros, los lodos no son atrapados y la mayoría se deposita en el fondo donde hay menos oxígeno disponible. Además, la acumulación excesiva de la materia orgánica puede derivar en condiciones anóxicas. Incrementando la relación C/N de 10 a 20, la mineralización de la materia orgánica se produce más rápidamente y por tanto menos cantidad se acumula en el fondo. Por lo tanto, se puede recomendar para PTS operativos.

Por cada kg de pienso (91% de materia seca) se obtuvieron 70 g de perifiton a bajas intensidades de luz y 150g a altas intensidades. El valor medio obtenido para proteína fue del 52% lo que indica su buena calidad como alimento para los peces. El índice de conversión de este alimento puede llegar a 1.34 y considerando la productividad del perifiton, un estanque de 1 ha con un área de sustrato igual a la superficie del estanque se podría alcanzar una producción de 5000 kg $ha^{-1}$ $año^{-1}$ (suponiendo una productividad de 2.5 g $m^{-2}$ $d^{-1}$ y una utilización del 75%).

En todos los experimentos, la combinación del PTS y el biofiltro percolador fue suficiente para mantener la calidad del agua favorable para la producción de tilapia del Nilo. La nitrificación en el filtro de goteo y el PTS han contribuido a la nitrificación en el sistema, y en todos los casos el cambio de agua fue necesario para mantener la concentración de $NO_3$-N por debajo de 150 mg $l^{-1}$. El N suministrado en la alimentación (20-30%) fue liberado con la renovación del agua.

Pequeñas cantidades de P y N se recuperaron como biomasa de perifiton; 3% N en el experimento sobre la influencia de la relación C/N, 9% N en el experimento de la influencia de la carga hidráulica (HSL) y 5,6 - 9,0% N en estudio sobre la influencia de la intensidad de la luz. El fósforo recuperado como biomasa de perifiton fue de 1,6% P en el experimento sobre la relación C / N, 12% P en el estudio HSL y entre 3,2 - 4,9% P en el experimento sobre influencia de la intensidad de luz. Aparentemente la producción de perifiton fue muy diferente en los tres estudios incluso a la misma intensidad de luz. Especialmente en el estudio sobre la relación C/N la producción de perifiton bajó con el tiempo y no en el caso de alta intensidad de luz. La razón no está clara.

### 9.3.4. Beneficios de la implantación

La acumulación de lodos en el sistema es una fuente importante de nutrientes. Aproximadamente un 50% de los lodos se acumulan en el PTS y el otro 50% en el depósito sumidero. La eliminación de los lodos al final del experimento o a intervalos semanales se tradujo en tasas similares de acumulación. En relación al

[45] HSL= Hidraulic surface load. (cantidad de agua aportada al PTS, flujos de 3,6 L/min y 7,3 L/min). No se observaron diferencias significativas para ninguno de los parámetros (producción de materia seca, cantidad de perifiton, cenizas, proteína bruta, energía, clorofila y fosforo fijado) en relación a las diferencias de flujo (caudal) ni tampoco en relación a la cantidad de lodos acumulados ni en relación al valor medio de los parámetros de calidad del agua, aunque en este caso las diferencias fueron significativas en relación al tiempo.

balance de nitrógeno, 7% del suministrado (entrada al sistema) se eliminó con los lodos del PTS en el experimento sobre influencia de carga hidráulica (HSL) comparado con el 10% sobre la relación C/N y entre 5-9% en el estudio sobre intensidad de luz. Para las entradas del fósforo,11%, 7-8% y 13-17% fueron eliminadas en el PTS, en los experimentos sobre la relación C/N y en el estudio de intensidad de luz respectivamente. Cuando se combinan la eliminación de los lodos y el perifiton del PTS, se puede recolectar entre el 15-30% del N o P que entraron en el sistema y podrían ser procesados para su uso futuro. Esta es una ventaja frente a los sistemas abiertos, donde los nutrientes desaparecen del sistema, sin la posibilidad de reutilización.

## *9.4. Del estudio de caso a la explotación: Cómo gestionar un modelo de estanque de peces para producir 5Tm por año con el módulo PTS*

Con el estudio realizado sobre el reactor de algas (PTS) se ha calculado la producción de perifiton y el efecto sobre la calidad del agua por $m^2$ de biofilm. El efecto del perifiton sobre la producción extensiva en estanques ha sido probado ampliamente por el equipo de investigación de Wageningen. Los parámetros de rendimiento del estudio de caso PTS se utilizaron para conceptualizar un estanque intensivo como parte de la unidad de recirculación.

### 9.4.1. Descripción de la unidad de producción

Los parámetros para un estanque intensivo de producción de carpa común como parte de una unidad de recirculación se muestran en la Tabla 52. La densidad máxima de peces en el tanque/estanque será de 15 kg/$m^3$ y un tamaño de 333 $m^3$. La profundidad del agua es 80-100 cm. La aireación, la circulación y el flujo del agua se realizan por bombas elevadoras de aire (airlifts) dirigidas por aire a presión. La corriente de agua generada por la bomba elevadora de aire es suficiente para hacer circular el agua en todo el sistema. Del estanque el agua fluye a una balsa de sedimentación con una fosa que se vacía semanalmente (un volumen de aproximadamente 10 $m^3$ al mes) para ser empleado como fertilizante. De la fosa de sedimentación el agua fluye por gravedad (desbordamiento) a un estanque de perifiton que tiene una superficie (sustrato) igual al doble de la superficie del estanque. La máxima densidad de peces en este estanque será de 0.5 kg / $m^2$.

| | |
|---|---|
| Tanque de peces | 333 m2 |
| Balsa de sedimentación | 300 |
| Estanque de perifiton | 1000 |
| Superficie de sustrato | 2000 |
| Flujo ( caudal) | 15 l/sec |
| Producción de peces | Tanque peces: carpa común |
| | Perifiton: tilapia/carpa |

*Tabla 52: Parámetros de la unidad de producción*

El ciclo de producción tiene una duración de 6 meses. Los lotes de carpa común se alojan en el estanque con un peso medio de 50 g a razón de 28 ejemplares /$m^3$ (1 400 g/$m^3$). Los peces crecen hasta 500-550 g en 180 días con una dieta rica en proteínas (40%) y un aporte inicial de 10.1 kg $d^{-1}$ hasta 67.8 kg $d^{-1}$. La biomasa final producida es de ± 5000 kg.

Después de mes y medio de iniciado el ciclo de producción, se coloca un lote de tilapias macho de 25 g en el estanque de perifiton a una densidad de 2 peces/$m^2$. Los peces crecen hasta un tamaño máximo de 300 g en 4.5 meses. No se administra alimentación.

| **Descripción** | **kg** | |
|---|---|---|
| Pienso total (40% prot, 1.2% P) | 6 200 | |
| N Total en pienso | 397 | |
| N en lodo | 77 | |
| N en perifiton | 40 | |
| N en fitoplancton | 24 | |
| P Total en pienso | 74 | |
| P en lodo | 17.5 | |
| P en perifiton | 3.6 | |
| P en fitoplancton | 3.3 | |
| N recuperado en carpa | 136 | |
| P recuperado en carpa | 40 | |
| N recuperado en tilapia | 16 | |
| P recuperado en tilapia | 4.8 | % |
| N remanente ( no contabilizado) | 104 | 26 |
| P remanente ( no contabilizado) | 5.7 | 8 |

*Tabla 53: Datos de N y P para carpa/tilapia en la unidad de producción intensiva*

### Balance de nutrientes

Los lodos retirados de la balsa de sedimentación, ricos en N y P se pueden utilizar como enmienda para suelos.

El alimento proporcionado al sistema es 6200 kg con 40% de proteínas. 17% del aporte de N y 23% del aporte de P se recuperarán en los lodos. En el estanque de perifiton, el N y P se asimilan por el fitoplancton y el perifiton, que, al ser ramoneado por la tilapia se mantiene en un estado productivo (Tabla 53)

**Uso del agua**

Excepto por el lodo, el agua no sale de la piscifactoría. Además, se compensa la pérdida de agua de evaporación. La construcción de nuevos estanques ha de hacerse en línea para que las pérdidas por filtración sean mínimas. La superficie total es cerca de 2000 $m^2$ y se asume que las pérdidas por evaporación son de 3000 m3.

### 9.4.2. Ventajas y desventajas de la producción intensiva en estanques combinada con perifiton

**Ventajas:**

- La retención de nutrientes y la recuperación de N y P en el sistema es muy alta. El 38% del aporte de N y 60% del aporte de P se recuperan en la biomasa de los peces y además una gran parte también se recupera como abono en los lodos.
- La gran superficie de biofiltro en el sistema (superficie del estanque y en las zonas de los extremos) estabiliza la calidad del agua. El índice de renovación en el estanque es de 4 veces al día, mientras que el tiempo de retención hidráulica en el estanque de perifiton es de 1.6 días. Este tiempo es relativamente corto para el desarrollo de fitoplancton (no deseado) mientras que no suponen ningún problema para el desarrollo del perifiton.
- Impacto ambiental por vertidos es prácticamente nulo.
- Bajo riesgo de infecciones con patógenos y parásitos.
- Menores necesidades de medicamentos y tratamiento químico.
- Ciclo de producción anual, con población de tilapia durante los meses más calurosos del año.
- Si se dispone de tierras adyacentes a los tanques de sedimentación, los ingresos adicionales pueden ser generados a partir de cultivos de hortalizas.
- Riesgo de intoxicación por amoníaco insignificante.
- La producción de 5 a 10 veces superior a la de un estanque tradicional extensivo. Más tierra disponible para el desarrollo de otras actividades.

**Inconvenientes:**

- Área de producción grande, alta inversión inicial.
- Necesidades constantes de aireación, alto coste de energía.
- Necesidad de fuente de energía externa.
- Una unidad de 5Tm es muy pequeña. Es necesario probar a otra escala.

# 10. Producción tropical basada en el concepto de sistema integrado "Tropenhaus" - Estudio de caso en Suiza

## *10.1. Introducción - Concepto general de "Tropenhaus" en Suiza*

El concepto *Tropenhaus* fue desarrollado para hacer un uso económico del calor residual generado a partir en una estación compresora de gas que sirve al gasoducto que va desde los Países Bajos a Italia. Está ubicado en el cantón de Lucerna, en Suiza. La producción anual de calor residual es de unos 100 GWh al año.

La crianza de peces frescos (tilapia) asociada al cultivo orgánico de frutas tropicales (papaya, guayaba, plátano, carambola) a partir del calor y residuos orgánicos como materia prima hacen de *Tropenhaus* un modelo de ingeniería ecológica y sostenibilidad. Los principales objetivos del proyecto son:

- Considerar los "residuos" como un "recurso" y utilizarlo racionalmente en consecuencia
- Buscar los conceptos de diseño basados en los ecosistemas y su funcionamiento,
- Conseguir un alto nivel de diversificación
- Procurar el máximo nivel de integración
- Emplear energías renovables o, en su defecto, neutras en emisiones de $CO_2$

*Figura 39: Planta de densificación de gas como fuente de calor residual para el sistema integrado Tropenhaus-Ruswill*

En el año 1999 se puso a prueba un invernadero de 1 500 $m^2$, basado en el enfoque productivo de los sistemas integrados del sur de Asia para asociar la crianza de peces al cultivo de frutas tropicales. Desde entonces se están realizando trabajos de investigación aplicada para desarrollar el sistema y optimizar la producción en términos de cantidad y calidad.

Un elemento fundamental de Tropenhaus es el módulo de acuicultura sostenible para la producción de tilapia. El agua rica en nutrientes derivada de la producción de tilapia se usa para el riego y sirve como fertilizante para las frutas tropicales cultivadas en el invernadero.

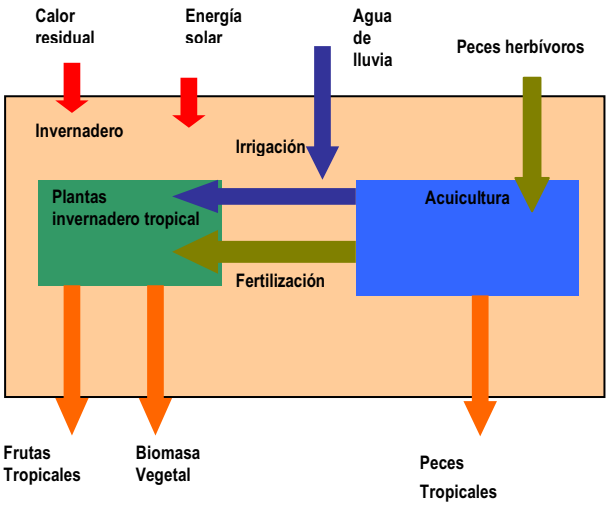



*Figura 40: Esquema funcional del sistema integrado Tropenhaus Ruswil*

Los 10 años de experiencia adquirida con el proyecto Tropenhaus Ruswil claramente demuestran que se puede producir de forma integrada, sostenible y económicamente rentable peces y frutas tropicales aprovechando el calor residual como principal fuente de energía. Además se han optimizado los tiempos de recolección y el transporte a corta distancia entre Tropenhaus y el cliente final (particulares, restaurantes, supermercados, etc.) y la calidad de los productos (en términos de sabor) es mayor en comparación con los procedentes de importación.

En vista de los prometedores resultados del proyecto piloto, dos grandes proyectos con una inversión total de aprox. 40 millones de € se han desarrollado recientemente. Ambos están actualmente en la fase de construcción y se prevé que empezará a funcionar a mediados de 2009. Uno de los mayores minoristas en Suiza (cadena de supermercados Coop) está convencido del concepto Tropenhaus y del enfoque del proyecto SustainAqua y promueve activamente sus productos. De esta manera, se puede iniciar un desarrollo de mercado para apoyar las decisiones de los acuicultores en cuanto a las inversiones para producir de forma más sostenible. El nuevo *Tropenhaus* servirá de plataforma para difundir el concepto de acuicultura sostenible y los resultados de SustainAqua a una audiencia más amplia en los próximos años. Por lo tanto, como un estudio de caso muy atractivo y modélico, contribuye a crear conciencia de producción sostenible entre los acuicultores, consumidores, minoristas, etc.

### Condiciones previas para la ejecución de un sistema "Tropenhaus":

- Calor residual gratuito. Aprovechamiento de los residuos de calor procedente de plantas industriales, centrales eléctricas, plantas de generación de biogás, instalaciones de energía geotérmica, etc. (1.5 - 2 MW / 10 000 $m^2$).
- Acceso al mercado de frutas y peces tropicales
- Suelo: Sin requisitos específicos, pero no se recomiendan suelos fríos.
- Topografía: plana a ligeramente inclinada
- Radiación: Buena exposición a la radiación solar

En el proyecto SustainAqua, el sistema Tropenhaus se ha investigado y desarrollado especialmente en relación a los siguientes temas:

- Integración de los crustáceos en la producción de tilapia
- Alimentación de los peces con subproductos generados en Tropenhaus
- Aplicabilidad de los filtros acuapónicos

Después de presentar brevemente los resultados con respecto a los crustáceos y los peces forrajeros, que todavía no están desarrollados a escala comercial, se presenta en detalle el filtro acuapónico y su aplicabilidad.

## *10.2. Integración de crustáceos en la producción de tilapia y alimentación de los peces con plantas tropicales*

### 10.2.1. Descripción general de la innovación

### Crustáceos

Las plantas tropicales (entre otras la papaya, guayaba, plátano y carambola) cultivadas en Tropenhaus prosperan bien y producen una gran cantidad de material vegetal que no ha sido utilizado hasta ahora de forma intensiva. Los crustáceos en general se alimentan bien de material vegetal y residuos de la acuicultura (lodos, heces y peces muertos). La integración de los crustáceos en la producción actual de tilapia tiene el potencial de:

- Diversificar la producción
- Mejorar la gestión de los nutrientes
- Utilizar el agua de forma más eficiente y
- Aumentar el rendimiento económico del sistema

El crustáceo isópodo *Asellus aquaticus* es muy tolerante a la mala calidad del agua y el déficit de oxígeno. Su crianza en tanques integrados en sistemas de reciclaje, suministrados con aguas residuales de la acuicultura es bastante fácil y puede ser suministrado como alimento natural a los peces herbívoros aportando su riqueza en compuestos bioactivos. De este modo, los residuos de la acuicultura intensiva, tales como los sólidos en suspensión y nutrientes disueltos pueden contribuir al propio desarrollo de los peces por una vía trófica alternativa. Los alimentos naturales proporcionan aminoácidos esenciales, ácidos grasos y otros nutrientes necesarios para el adecuado desarrollo de los peces. Estudios realizados con trucha arco iris en estanques, alimentadas de forma artificial con alguna proporción de alimento natural han mostrado que su carne era significativamente de mejor calidad cuando comparada con peces producidos en sistemas intensivos de circuito abierto alimentadas exclusivamente con piensos granulados.

### Alimentación con la biomasa vegetal de Tropenhaus

Las condiciones climáticas en el invernadero no son favorables para el compostaje de los subproductos vegetales y esto tiene como consecuencia costos adicionales para la manipulación y el reciclaje de este

material. Utilizar la biomasa vegetal como alimento para los peces tiene el potencial de mejorar el ciclo de nutrientes del invernadero y reducir los costes de alimentación (cantidad de pienso comercial aportado)

### 10.2.2. Principios de los módulos

#### Crustáceos

*Asellus aquaticus* fue mantenido en un tanque somero (de poca profundidad) junto con algas filamentosas. Una pequeña parte del agua que circula en el sistema tanque-filtro se desvió para el tanque de *Asellus* desde donde se drena de vuelta al circuito de agua los peces pasando por los filtros vegetales. Los *Asellus* fueron alimentados con los lodos (materia fecal de peces, peces muertos, etc) acumulados en el agua de los peces con un cultivo de algas filamentosas que se desarrolla en el mismo tanque y con aporte extra de subproductos de papaya (hojas, frutos sobremadurados, etc).

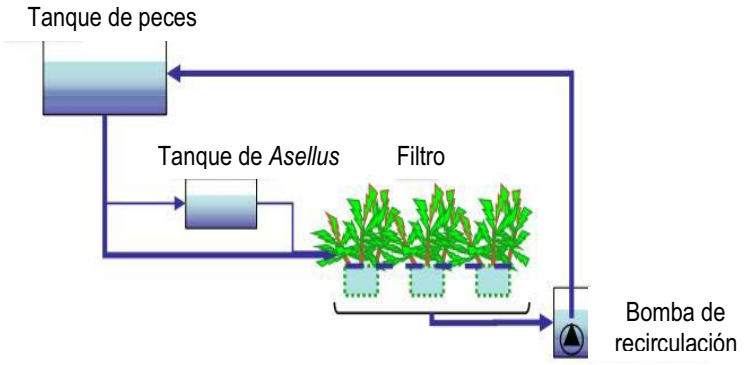



*Figura 41: Esquema de flujo del subsistema Asellus*

#### Alimentación con la biomasa vegetal de Tropenhaus

Diferentes subproductos de las plantas tropicales cultivadas en Tropenhaus fueron picados en trozos pequeños o pre-tratados por compostaje. En los experimentos de alimentación, una parte del pienso comercial se sustituye por este material para la alimentación de los peces o cangrejos.

### 10.2.3. Evaluación de los experimentos

#### Crustáceos

La población de *Asellus* se ha desarrollado bien y así se mantuvo estable. La comparación de los diferentes sustratos adecuados para este módulo puso de manifiesto que la integración de la crianza de crustáceos en unidades de reciclaje también puede producir otros beneficios. Con mucha diferencia, la mayor producción de *Asellus* se obtuvo al utilizar algas filamentosas (*Cladophora*) como sustrato. El beneficio de este sustrato también reside en su idoneidad para la alimentación directa de las tilapias junto con los *Asellus* que crecen sobre las algas. Además las densas esteras de *Cladophora* también puede servir como un agente eficaz en la eliminación de sólidos en suspensión (partículas orgánicas) que proporcionan una excelente base para la alimentación de *Asellus* e incluso alimentos adicionales adecuados para la tilapia cuando se utiliza la biomasa de *Cladophora* directamente para la alimentación.

La producción de *Asellus* fue inferior aunque eficaz cuando se utilizaron los lodos resultantes de los filtros como substrato.La ventaja de utilizar los lodos como sustrato consiste en su tratamiento eficaz y la utilización de determinados residuos de la recirculación aunque en proporciones muy bajas. La producción de *Asellus* fue similar cuando fueron criados en un acuario con plantas ornamentales acuáticas (*Ludwigia* , *Eichhornia*) como sustratos. Además de los beneficios de la producción de Asellus y retención de sólidos en suspensión (por *Eichhornia* en particular) y de la reutilización de nutrientes, estas plantas también pertenecen a los subproductos comercializables.

#### Alimentación con la biomasa tropical de Tropenhaus

La Figura 42 resume los resultados de este estudio. La sustitución del pienso comercial (Skreeting) por compost, EM compost, Bokashi[46], Taro (ñame, *Colocasia esculenta*)[47] o papaya ha mostrado notables

[46] "Bokashi" es una palabra japonesa que significa "materia orgánica fermentada"; o en este caso, abono orgánico fermentado. Para la preparación del "bokashi", los agricultores japoneses usan materias orgánicas como la semolina de arroz, torta de soya, harina de pescado y el suelo de los bosques (contenido de varios microorganismos benéficos que aceleran la preparación de este abono), como inoculante de microorganismos.El "Bokashi" ha sido utilizado por los agricultores japoneses para aumentar la diversidad microbiana, mejorar la condición física y química del suelo, prevenir sus enfermedades y suplirlo con nutrientes para el desarrollo de los cultivos. A diferencia del compost (50°C - 70°C), la fermentación se hace a más baja temperatura (50°-55° C.) Fuente: http://www.inforganic.com/node/709

[47] *Colocasia esculenta*, comúnmente llamado *taro* (del tahitiano), raramente llamado *kalo* (del hawaiano) o *cará* en Brasil y *ñame* en Canarias, es una planta tropical que se usa principalmente como vegetal por su cormo comestible, y también como legumbre. Sus flores son raramente comidas. El taro está emparentado con las especies de plantas *Xanthosoma* y *Caladium*, usadas como plantas ornamentales, llamadas a veces oreja de elefante. El taro y las especies *Xanthosoma* cultivadas comparten sustancialmente los

resultados. No obstante, se recomienda utilizar estas mezclas aptas para peces herbívoros solo como "co-alimentación", es decir, como aporte complementario al pienso comercial.

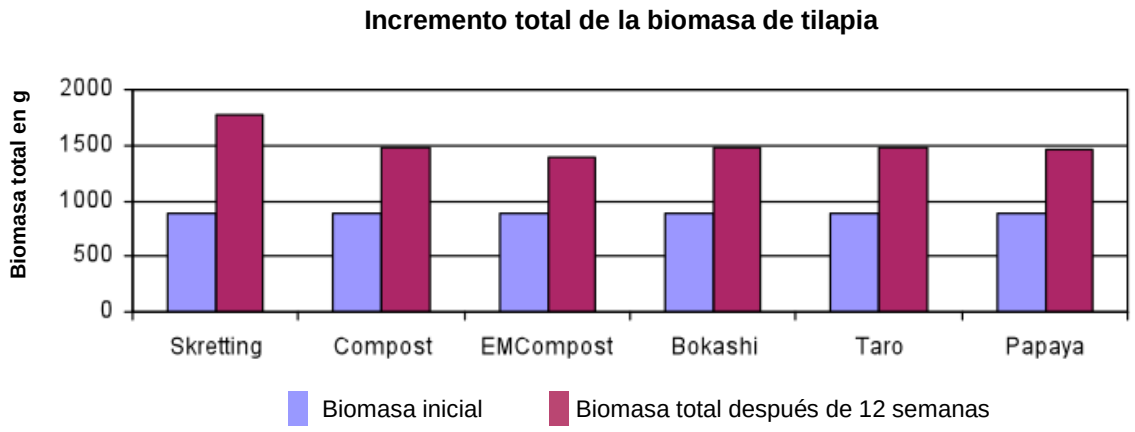



*Figura 42: Resultados del experimento de alimentación con biomasa vegetal*

### 10.2.4. Factores de éxito y limitaciones

Es necesario investigar aun mucho más ambos módulos. Posibles factores de éxito y limitaciones que se indican a continuación.

#### Crustáceos

La experiencia en Tropenhaus unida a los experimentos de substrato muestran que la producción de *Asellus aquaticus* es factible en un agua cálida. Tiene un gran potencial como alimento vivo, rico en compuestos bioactivos para complementar la dieta habitual de los peces cultivados. *Asellus* puede ser alimentado con los lodos en suspensión del agua de los peces y también con restos de plantas. Cuando se utiliza como sustrato las algas filamentosas se obtienen mejores resultados y además tambien sirven como alimento para la tilapia. Las densas matas de *Cladophora* pueden servir también como un agente eficaz en la retención de sólidos en suspensión (partículas orgánicas) que proporcionan una excelente base para la producción de *Asellus* e incluso alimentos adicionales adecuados para la tilapia cuando se utiliza la biomasa de *Cladophora* junto con *Asellus* para la alimentación directa.

#### Alimentación de los peces con la biomasa vegetal de Tropenhaus

El uso de la biomasa vegetal producida en Tropenhaus para la alimentación de los peces es una opción prometedora para diversificar su dieta. Sin embargo, no se puede sustituir totalmente el pienso convencional aunque puede ser una fuente adicional de alimento natural que contribuye con compuestos bioactivos. Dado que la capacidad del estomago de la tilapia no se alcanza con el alimento convencional, los alimentos frescos no compiten con los alimentos secos, pero si diversifican y completan la dieta.

## *10.3. Filtros acuapónicos de agua cálida en el sistema integrado "tropical"*

### 10.3.1. Descripción general de la innovación

Cada módulo de acuicultura en el sistema Tropenhaus consiste en:

- Un tanque para criar peces
- Un filtro biológico hidropónico[48] en cada estanque
- Una bomba para recircular el agua

mismos usos y algunos nombres, incluyendo mafafa, malanga, callaloo, pituca, chonque, bore, papa china, coco o cocoñame. Fuente : http://es.wikipedia.org/wiki/Colocasia_esculenta

[48] La acuaponía se puede definir como *la tecnología recientemente probada que integra la piscicultura con el cultivo vegetal en un sistema simbiótico de recirculación de agua que canaliza los efluentes de la cría de pescado hasta las raíces de la planta.* Los sistemas acuapónicos se caracterizan por la optimización en el uso de los recursos (agua, espacio, y desechos generados) asumiendo que la unificación de ambos componentes deriva en un doble beneficio, económico y ambiental. En sentido estricto, todos los filtros empleados en Tropenhaus son acuapónicos. No obstante llamamos “hidropónico” al antiguo sistema de filtración situado encima de cada tanque que producía vegetales directamente sobre el agua, sin ningún tipo de sustrato. El tipo de filtro investigado en este módulo, que llamamos acuapónico, corresponde a cajas plásticas situadas en el suelo que utilizan como sustrato arcilla expandida.

En uno de los módulos, se instaló y evaluó un nuevo filtro acuapónico consistente en una caja de plástico con ranuras en el fondo y laterales rellena de gránulos de arcilla expandida como sustrato en la que se cultivan directamente plantas tropicales. El agua procedente de los tanques de peces se libera en la parte superior de las cajas expandiendo los gránulos de arcilla. Las ranuras favorecen la aireación del filtro y por tanto evitan las condiciones anaeróbicas. Las raíces de las plantas que crecen en la parte inferior del filtro ayudan a mejorar el rendimiento mecánico del mismo y proporcionan un hábitat idóneo para los microorganismos.

*Figura 43: Sistema de filtros acuapónicos con plantas de frutas tropicales (Foto: IEES)*

### 10.3.2. Principios del módulo

Se configuraron experimentos para evaluar los resultados individuales de dos tipos de filtros acuapónicos (el antiguo sistema hidropónico de estanque y el nuevo de caja con arcilla expandida). Cada uno de estos sistemas tiene asociado un tanque circular (con pared metálica y tela impermeable de PE) y un sistema de calefacción en el suelo. Los tanques tienen un diámetro de 5,5 m. y una capacidad de 10 $m^3$ de agua que se mantuvo a una temperatura de 25 °C. El agua se bombea desde el desagüe hasta los filtros hidropónicos dos veces por hora. La variación diaria de temperatura fue de 5 °C (23 °C durante el día y 18 °C en la noche). El agua residual de los tanques (efluente) se usó para irrigar el invernadero. Un depósito situado en el techo del invernadero recoge agua de lluvia que se emplea para el abastecimiento de los tanques.

El filtro acuapónico consiste en 40 cajas plásticas ranuradas en las paredes y fondo. Cada caja se llena con 60 L, de gránulos de arcilla expandida con un diámetro de 13 mm - 20 mm. El volumen total de filtro fue de 2,4 $m^3$. El agua residual de los peces se suministra a cada caja mediante una tubería.

El filtro acuapónico incluye los siguientes principios de innovación:

- Tratamiento del agua: los gránulos de arcilla expandida actúan como sustrato sustituyendo el agua
- Cultivos: las plantas acuáticas son sustituidas por frutas tropicales
- Construcción: Es posible hacerlo a nivel del suelo con lo cual se facilita el manejo.

El sistema se ilustra en la Figura 44.

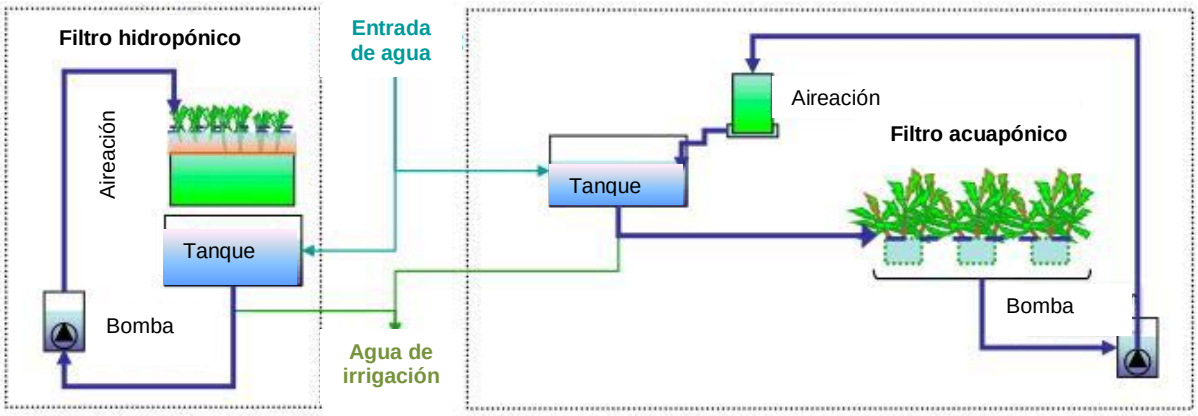



*Figura 44: Esquema de flujo que muestra las diferencias entre el antiguo filtro hidropónico (filtro de estanque) y el nuevo filtro acuapónico*

### 10.3.3. Evaluación de los indicadores de sostenibilidad seleccionados en SustainAqua

La Tabla 54 resume los resultados en relación a los indicadores de sostenibilidad seleccionados en SustainAqua comparando ambos tipos de filtro, mostrando claramente las mejoras obtenidas en relación a la eficacia de utilización de nutrientes y producción así como en el aumento de la productividad que deriva en menores costos de mano de obra.

| Parámetros | **Sistema con filtro acuapónico (cajas)** | | **Sistema con filtro hidropónico (tanques)** | |
|---|---|---|---|---|
| Eficiencia energética | Consumo de energía por tilapia producida [kWh/kg]<br>Total<br>Calor<br>Electricidad | <br>214.43<br>214.38<br>0.05 | Consumo de energía por tilapia producida [kWh/kg]<br>Total<br>Calor<br>Electricidad | <br>157.41<br>157.36<br>0.05 |
| Entrada de agua | Entrada de agua por tilapia producida [m3/kg] | 1.4 | Entrada de agua por tilapia producida [m3/kg] | 1.4 |
| Salida de agua | Salida de agua por tilapia producida [m3/kg] | 1.4 | Salida de agua por tilapia producida [m3/kg] | 1.3 |
| Eficiencia en la utilización de nutrientes | N en la biomasa de tilapia /N entrada al sistema [kg/kg]<br>P en la biomasa de tilapia /P entrada al sistema [kg/kg] | 0.28<br>0.32 | N en la biomasa de tilapia /N entrada al sistema [kg/kg]<br>P en la biomasa de tilapia /P entrada al sistema [kg/kg] | 0.24<br>0.27 |
| Salida de nutrientes | N vertido en agua de salida / N entrada (esqueleto) [kg/kg]<br>P vertido en agua de salida / P entrada (esqueleto) [kg/kg] | 0.21<br>0.17 | N vertido en agua de salida / N entrada (esqueleto) [kg/kg]<br>P vertido en agua de salida / P entrada (esqueleto) [kg/kg] | 0.22<br>0.29 |
| Reciclaje de nutrientes en productos comercializables | N retenido en subproductos/ N entrada (esqueleto) [kg/kg]<br>P retenido en subproductos/ P entrada (esqueleto) [kg/kg] | 0.01<br>0.01 | N retenido en subproductos/ N entrada (esqueleto) [kg/kg]<br>P retenido en subproductos/ P entrada (esqueleto) [kg/kg] | 0.00<br>0.00 |
| Incremento de productividad por unidad de mano de obra | Tiempo invertido en el manejo del sistema/ productos [h/kg] | 0.04 | Tiempo invertido en el manejo del sistema/ productos [h/kg] | 0.27 |

*Tabla 54: Principales resultados del filtro acuapónico.*

### Fluctuaciones en amoníaco, nitrito, nitrato, $O_2$ y DQO

Como se observa en la Figura 45, las concentraciones de amoniaco siguieron una evolución similar y permanecieron relativamente bajas en ambos tanques durante un periodo bastante prolongado de tiempo. A finales de agosto, se observó un incremento en ambos sistemas. Sin embargo, las concentraciones de amoníaco en el sistema con filtro hidropónico se mantuvieron más altas que las del filtro acuapónico. Las concentraciones de nitrito también se mantuvieron en niveles bajos. Sin embargo se observaron mayores fluctuaciones en el filtro hidropónico (tanque) que en el acuapónico en el cual se mantuvieron más equilibradas (cajas). Las concentraciones de nitrato mostraron variaciones de aproximadamente la misma magnitud en ambos sistemas. Las concentraciones de oxígeno variaron entre 1.5 y 7.2 mg/l en el sistema de tanque, y entre 5.9 y 7.9 mg/l con el sistema de filtro acuapónico. Los niveles de DQO fueron aproximadamente los mismos excepto en ambos sistemas con la excepción de un pico en el sistema acuapónico a mediados del mes de abril.

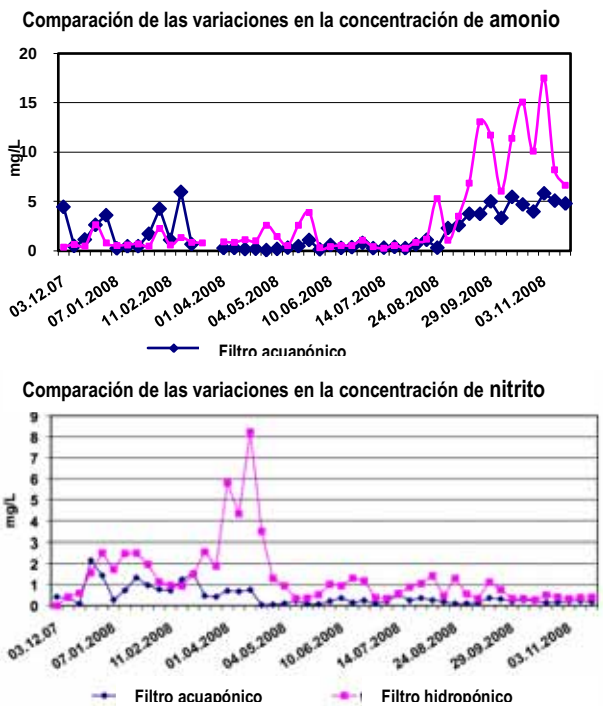



*Figura 45: Comparación de las fluctuaciones de amonio y nitrito en ambos sistemas*

### 10.3.4. Factores de éxito y limitaciones

El filtro acuapónico ha demostrado ser un tratamiento de las aguas residuales muy eficaz y rentable para sistemas como Tropenhaus, en los cuales la acuicultura se combina con la producción vegetal. Puede ser instalado en el área de cultivo del invernadero proporcionando la misma productividad que el resto de la superficie cultivada. Comparado con el filtro hidropónico, se necesita menos trabajo de mantenimiento (en particular para la retirada de lodos) y no más para la producción vegetal. El filtro acuapónico también muestra un mejor rendimiento biológico (mayor estabilidad) que el filtro hidropónico, especialmente para los parámetros de amonio y nitritos, que son tóxicos para los peces.

Cuando el filtro acuapónico no pueden integrarse en la superficie cultivada, se necesita un espacio adicional que puede ser una desventaja en comparación con el filtro hidropónico (situado por encima del estanque de peces). Otro inconveniente es la distribución de agua necesaria para cada caja (complejidad del sistema de canalización).

### 10.3.5. Beneficios de la implantación

En comparación con el filtro hidropónico, el filtro acuapónico ha mostrado algunas ventajas:

- Mayor valor añadido de los subproductos (frutas tropicales frente a plantas acuáticas)
- Menos fluctuaciones en las concentraciones de nutrientes en los tanques de peces
- Mayor facilidad para integrarlo en el sistema existente (área cultivada) sin incremento en los costes de construcción
- Mantenimiento y manejo facilitado, menor necesidad de mano de obra.

El nuevo filtro acuapónico es un caso modelo de ingeniería ecológica en el cual “los conceptos ecosistémicos se han empleado para servir a la sociedad” y “los residuos se han empleado como recurso”. El caro trabajo manual del técnico para eliminar los lodos ha sido reemplazado por procesos naturales. El agua residual de los tanques de tilapia se ha usado para generar productos de alta calidad (frutas tropicales y verduras) mejorando el rendimiento económico de la producción integrada al sistema. El plan de negocios de la nueva ampliación del proyecto *Tropenhaus* que incluye el nuevo filtro acuapónico basado en la producción de fruta, da prueba de ello.

## *10.4. Del estudio de caso a la explotación: El diseño del filtro acuapónico de agua cálida en el sistema "Tropenhaus Wolhusen"*

### 10.4.1. Introducción: "Tropenhaus Wolhusen"

El *Tropenhaus Wolhusen* es una nueva empresa que se basa en los diez años de experiencia del *Tropenhaus Ruswil* donde los residuos de energía industrial (calor residual) se utilizan para operar un sistema tropical integrado en su interior. El *Tropenhaus Wolhusen*, es un invernadero construido en 2009, con un área de de 5 400 $m^2$ que sirve como unidad de producción. También hay un edificio para organización de eventos con capacidad para recibir 55 000 visitantes por año.

El sistema integrado comprende un jardín tropical para el cultivo de frutas (papayas, plátanos y otros cultivos) asociado a la producción de tilapia mediante filtros acuapónicos. Las instalaciones son alimentadas con calor residual y energía solar y los residuos de los peces herbívoros sirven como suministro de nutrientes. El agua de lluvia que abastece el sistema es recolectada en el techo del invernadero. El agua de producción de los peces, enriquecida con sus residuos (restos de alimento, heces, etc.) se usa para la irrigación del jardín tropical y fertiliza las plantas. Este sistema produce frutas tropicales, peces y biomasa vegetal.

El edificio de eventos cubre una superficie de 2 100 $m^2$ y consta de un jardín tropical, las instalaciones para la producción de tilapia, un restaurante y las infraestructuras para visitar las plantas ornamentales tropicales y las mismas plantas que se utilizan en la producción de invernadero.

El *Tropenhaus Wolhusen* está situado a una altitud de 680 m snm en un área montañosa de Suiza central, antes de la zona alpina. La región se caracteriza por la producción agrícola y el invernadero está rodeado de tierras de cultivo. El régimen climático se puede considerar moderado. Las horas de insolación al año equivalen a aproximadamente 1 300-1 400h. La media de precipitación anual en la región asciende a unos 1 200 mm.

El invernadero está conectado a una fuente de suministro de calor industrial residual que proporciona agua caliente a 60 °C, que se utiliza para calentar el invernadero, y el agua de los peces. El objetivo de temperatura para el invernadero es de 23 °C durante el día y 18 °C por la noche. La temperatura del agua los peces es de 26 °C.

La superficie cultivada es de aproximadamente 4 000 $m^2$ y la producción anual de frutas tropicales (papaya y el plátano principalmente) se estima en alrededor de 60 toneladas.

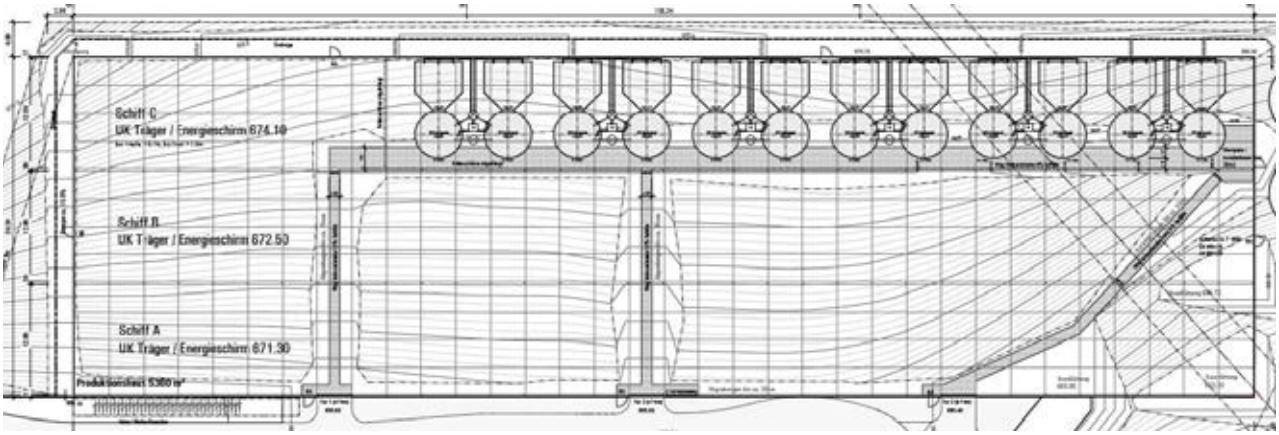



*Figura 46: Planos de la sección de acuicultura de Tropenhaus Wolhusen*

### 10.4.2. Descripción de la unidad de acuicultura

La unidad de producción de peces se compone de seis módulos independientes, cada uno equipado con dos tanques y dos filtros acuapónicos. El área necesaria para cada módulo es de unos 180 $m^2$, incluyendo los 32 $m^2$ necesarios para cada filtro acuapónico.

Los dos tanques de producción de peces de un mismo módulo están interconectados con un tubo de compensación hidráulica. El agua residual que se emplea para la fertilización (para el riego de todo el invernadero) se capta de uno de los tanques y se controla mediante un equipo de riego informatizado. El control de agua en los tanques se hace por un dispositivo de nivel que abastece de agua de lluvia al tanque que suministra agua para el riego (Figura 51).

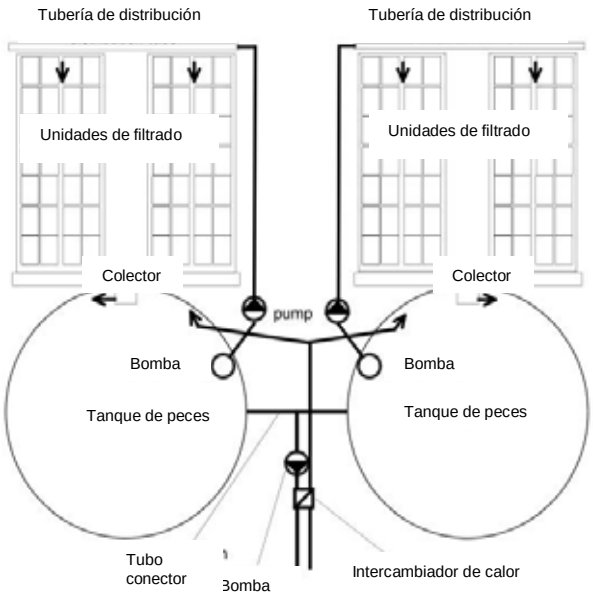



*Figura 48: Esquema de los módulos de producción de peces*

*Figura 47: Modulo de acuicultura (filtro acuapónico) en construcción (Foto: IEES)*

Los tanques de peces tienen una estructura de acero y una membrana de PE, con sección circular. El diámetro es de 5,5 m. y la altura es de 1,6 m., la profundidad del agua es de 1,3 m. y su volumen (capacidad de agua) es de 30 $m^3$. La densidad es de 20 kg de peces/$m^3$ y la producción es de 920 kg al año/tanque (producción total aproximadamente 12 Tm/año).

*Figura 49: Tanque de producción de peces en construcción (Foto: IEES)*

### 10.4.3. El filtro acuapónico desarrollado de acuerdo con los resultados del estudio de caso

El filtro acuapónico está construido con cajas de plásticas llenas de gránulos de arcilla expandida. El fondo y las paredes de estas cajas son ranurados para facilitar el flujo de aire y agua para evitar la podredumbre de las raíces ya que las plantas tropicales se cultivan en su interior. Los principales cultivos son el plátano y la papaya, aunque también se producen varias especies de pimientas (chiles), hierba de limón (lemon grass), taro (ñane), galangal (jengibre azul) etc. La producción vegetal en la superficie del filtro es al menos la misma por $m^2$ que en el resto de la superficie del invernadero.

El filtro para un tanque de peces (30$m^3$) equivale a 56 cajas (aproximadamente 2 $m^3$) de dimensiones 0,60 x 0,40 x 0,32 m (0,77 $m^3$ de volumen total) y con ranuras de 5 mm. de ancho. Cada caja se llena con 60 L de gránulos de arcilla expandida con tamaño 8 - 16 mm de tamaño. Cada filtro (56 cajas) recibe un volumen de agua residual de 1 $m^3$ /min. o alrededor de 18 L /min. y caja. El agua se bombea desde el tanque de los peces a una tubería distribuidora que canaliza el agua hasta cada caja.

*Figura 50: Izquierda, filtro de caja recibiendo el agua con plantas de pimientos (chiles). Derecha: Un bananero con plátanos creciendo en un filtro de caja (Fotos: IEES)*

Los módulos de acuicultura se han construido en una zona con pendiente con los filtros situados por encima de los tanques de forma que el agua recuperada pueda fluir directamente sobre el tanque (Figura 52).

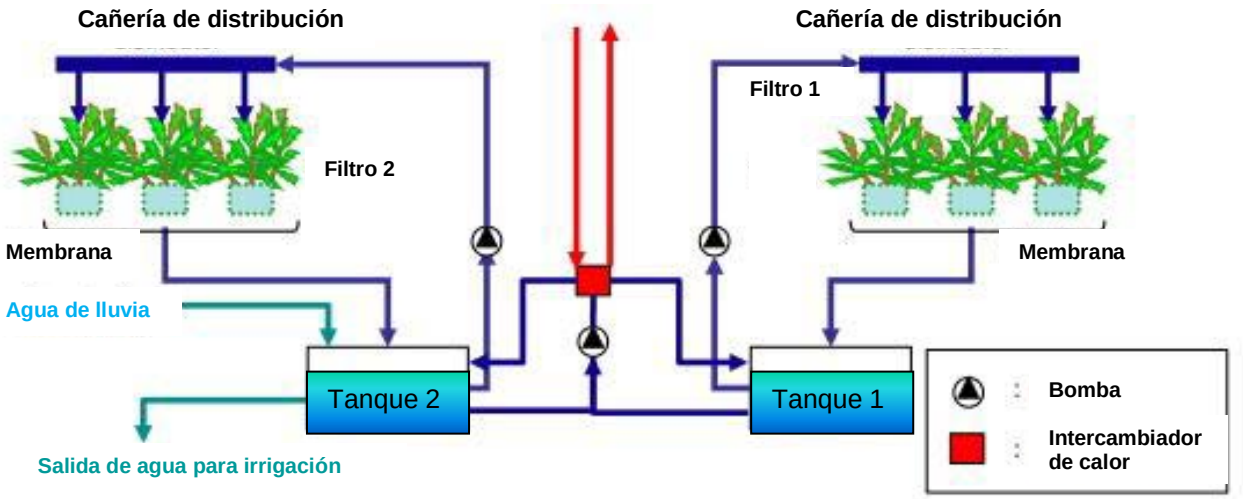



*Figura 52: Diagrama de flujo del módulo de acuicultura en Tropenhaus Wolhusen*

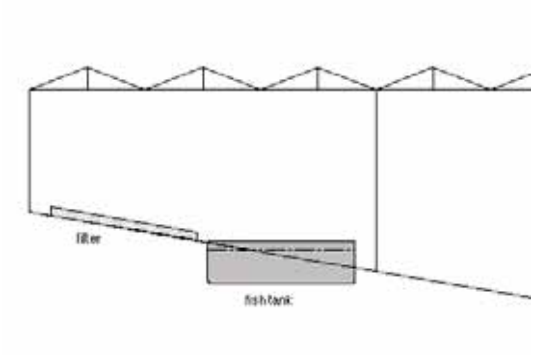



*Figura 51: Sección transversal del módulo de acuicultura en Tropenhaus Wolhusen*

### 10.4.4. Costes y mano de obra

La Tabla 55 muestra los costes de construcción de un módulo de acuicultura, tal y como se ha descrito anteriormente. Los gastos totales se han dividido en costes de material y horas de trabajo estimadas. Para la instalación se debe de considerar al menos una persona cualificada de apoyo a los trabajadores no cualificados. Los gastos de ingeniería y de movimientos de tierra necesarios para instalar los tanques de peces no están incluidos. Los costos de materiales se indican en € sin impuestos, pero pueden incluir algunos gastos de aduana.

| | € | % | h | % |
|---|---|---|---|---|
| Tanques con aislamiento interior y exterior, | 12'048 | 45% | 71 | 29% |
| Filtro acuapónico | 3'611 | 14% | 83 | 34% |
| Bomba de filtrado Accesorios y tuberías | 7'138 | 27% | 59 | 24% |
| Convertidor de calor, bombas y accesorios | 3'891 | 15% | 32 | 13% |
| Total | 26'687 | 100% | 245 | 100% |

*Tabla 55: Gastos generados en cada módulo de acuicultura de Tropenhaus Wolhusen*

### 10.4.5. Ventajas y desventajas del filtro acuapónico

En sistemas como el *Tropenhaus* donde la acuicultura se combina con la producción vegetal, el filtro acuapónico es una solución rentable para el tratamiento de las aguas residuales. Puede ser instalado en el área del invernadero y su productividad es equivalente a la del resto de la superficie cultivada. En comparación con un filtro hidropónico, demanda menos trabajo para mantenimiento del sistema de tratamiento (en especial para la retirada de lodos) y no es necesario emplear más horas de trabajo para la producción vegetal. El filtro acuapónico muestra mejor rendimiento biológico que el hidropónico en relación al amonio y al nitrato que son especialmente tóxicos para los peces. Cuando el filtro acuapónico no puede integrarse en la superficie cultivada y hay necesidad de espacio adicional, puede ser una desventaja en comparación con los filtros hidropónicos situados encima del estanque. Además, el aporte del agua residual en las cajas precisa de un complejo sistema de distribución.

*Figura 53: El nuevo filtro acuapónico después de siete meses de funcionamiento (Foto: IEES)*

# Referencias y lecturas recomendadas

### *Informaciones sobre el proyecto SustainAqua*

**Internet:**

www.sustainaqua.org – sitio web

wiki.sustainaqua.org – Herramienta Wiki para su uso en línea que proporciona información sobre los resultados del proyecto y acerca de la acuicultura sostenible en general. Se puede contribuir con experiencias propias sobre la aplicación de los módulos, otras especies, etc

### *Sostenibilidad en acuicultura*

**Internet:**

| | |
|---|---|
| CONSENSUS | www.euraquaculture.info |
| Agenda 21 | www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21toc.htm |
| International Institute for Sustainable Development (IISD). Compendium. A global directory to Indicator initiatives | www.iisd.org/measure/compendium/ |
| Hart environmental data, Indicators of sustainability | www.sustainablemeasures.com/ |
| International Sustainability Indicators Network | www.sustainabilityindicators.org/ |
| ONU-CDS: Indicators for sustainable development | www.un.org/esa/dsd/dsd_aofw_ind/ind_index.shtml |
| Sustainable Development Training course UASLP | agenda.di.uaslp.mx/htms/biblio_U2.htm |

BELL, S. & STEPHEN MORSE , (1999): Sustainability indicators: measuring the immeasurable?. Earthscan, ISBN 185383498X, 9781853834981, 175 pp. http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FZvLx3x9tYsC&oi=fnd&pg=PR7&dq=%22Bell%22+%22Sustainability+indicators:+measuring+the+immeasurable%3F%22+&ots=Fr5MxY7Ocv&sig=f6OR5AcsGy7eA_QkriVyYBjo5vA

BEVERIDGE, M.C.M.; PHILLIPS, M.J. & MACINTOSH, D.J. (1997): Aquaculture and the environment: the supply of and demand for environmental goods and services by Asian aquaculture and the implications for sustainability. In: Aquaculature Research 28, 797-807

CEC [COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES] (2005): Proposal for a Council Regulation on organic production and labelling of organic products. COM(2005)671 final. – Brussels http://www.cde.ua.es/dsi/ds/ma/ue_dap/2005/12/

CEU [COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION] (2006): Proposal for Council Regulations on organic production and labelling of organic products, amending Regulation (EC) no 2092/91, 10782/06. – Brussels http://www.cde.ua.es/

EIFAC/EC Working Party on Market Perspectives for European Freshwater Aquaculture, Brussels, Belgium, 14 – 16 May (2001): 84-94 ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/004/y2792e/y2792e00.pdf

FAO [FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS] (1988): Aspects of FAOs policies, programmes, budget and activities aimed at contributing to sustainable development. Document to the ninety-fourth Session of the FAO Council, Rome, 15-25 November 1988. Rome, FAO,CL94/6.

FAO [FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS] (1995): Code of conduct for responsible fisheries. – Rome http://www.fao.org/docrep/005/v9878e/v9878e00.htm

FAO/ICLARM/IIRR (2003): Integrated agriculture-aquaculture. A primer. FAO Fisheries Technical Paper, n 407. 149 p. ( in English). http://www.fao.org/DOCREP/005/Y1187E/Y1187E00.HTM

FAO/ICLARM/IIRR,(2003): Agro-acuicultura integrada, Manual básico. *FAO Documento Técnico de Pesca* No 407. Roma, FAO. 2003. 159 p. (en castellano) http://www.fao.org/docrep/006/Y1187S/y1187s00.htm

FEAP [FEDERATION OF EUROPEAN AQUACULTURE PRODUCERS] (2000): Code of conduct for European Aquaculture. - Boncelles, Belgium . http://www.aquamedia.info/consensus/

FOCARDI, S.; CORSI, I.; FRANCHI, E. (2005): Safety issues and sustainable development of European aquaculture: new tools for environmentally sound aquaculture. In: Aquaculture International 13, 3-17

FRANKIC, ANAMARIJA & HERSHNER, CARL (2003): Sustainable aquaculture: developing the promise of aquaculture. In: Aquaculture International 11: 517-530

HALBERG, NIELS; VAN DER WERF, HAYO M.G.; BASSET-MENS, CLAUDINE; DALGAARD, RANDI; DE BOER, IMKE J.M. (2005): Environmental assessment tools for the evaluation and improvement of European livestock production systems. In: Livestock Production Science 96, 33-50

IUCN (2006): The Future of Sustainability Re-thinking Environment and Development in the Twenty-first Century; http://cmsdata.iucn.org/downloads/iucn_future_of_sustanability.pdf

INSULL, D. Y Z. SHEHADEH (1996): Policy directions for sustainable aquaculture development. FAO Aquacult.Newsl., (13): 3-8. http://www.fao.org/docrep/005/w2410e/W2410e07.htm

SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE AQUACULTURE IN OSLO (1997): Holmenkollen guidelines for sustainable aquaculture. - Oslo

WURTS, W. A. (2000): Sustainable Aquaculture in the Twenty-First Century. In: Reviews in Fisheries Science 8 (2), 141-150

MEA, (2005): Ecosystems and Human Well-being. A Framework for Assessment. http://www.millenniumassessment.org/en/Framework.aspx

MEA, (2005): *Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación. Resumen.* Informe del Grupo de Trabajo sobre Marco Conceptual de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio. World Resources Institute (En Castellano). http://www.millenniumassessment.org/en/Framework.aspx

UNEP (1992): Rio Declaration on Environment and Development; http://www.unep.org/Documents.multilingual/Default.asp?DocumentID=78&ArticleID=1163

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME UNEP, (1997):Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augumentation in Latin America and The Caribbean. http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/techpublications/TechPub-8c/acknowledgements.asp

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME UNEP, (2004):Guideliness on Municipal Wastewater Management. UNEP Publications. 112 p. http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/guidelines_on_municipal_wastewater_english.pdf

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (1987): Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm

### *Tecnología de producción de los principales tipos de acuicultura en Europa*

**Internet:**

| | |
|---|---|
| Aquatic network | www.aquanet.com |
| AquaNIC (Aquaculture network information center) | www.aquanic.org |
| AFSIC (Alternative Farming System Information Center) | http://www.nal.usda.gov/afsic/pubs/pubsindex.shtml |
| WQIC ( Water quality information Center) | http://www.nal.usda.gov/wqic/ |
| The Fish Site | http://www.thefishsite.com/ |

BALUYUT, ELVIRA A., (1989): Aquaculture systems and practices: a selected review. ADCP/REP/89/43. FAO, Rome .http://www.fao.org/docrep/T8598E/T8598E00.htm

CAROL M. BROWN & COLIN E. NASH, (1988): Planning an aquaculture facility. Guidelines for bioprogramming and design. ADCP/REP/87/24. FAO, Rome. http://www.fao.org/docrep/S6665E/S6665E00.htm

EWART, JOHN W., JOE HANKINS, & DAN BULLOCK, (1995): State Policies for Aquaculture Effluents and Solid Wastes in the Northeast Region. NRAC Bulletin No. 300– 1995 http://www.nrac.umd.edu/publications/factSheets.cfm

FAO, (1983): Inland aquaculture engineering. Lectures presented at the ADCP Inter-regional Training Course in Inland Aquaculture Engineering, Budapest, 6 June-3 September 1983.ADCP/REP/84/21. FAO Rome. http://www.fao.org/docrep/X5744E/X5744E00.htm

FAO, (2000): Los pequeños estanques: grandes integradores de la producción agropecuaria y la cría de peces. Farm management and production economics service, inland water resources and aquaculture service (No serial publications). (En castellano) http://www.fao.org/docrep/003/x7156e/x7156e00.htm

JACUMAR JUNTA ASESORA DE CULTIVOS MARINOS,(2008): Guía para la minimización de residuos en acuicultura. MARM, 36 p. (En castellano) http://www.mispeces.com/noticias/2008/oct/081022-jacumar-azti-guia-minimizacion-acuicultura.asp

LAZUR, ANDREW M., JOSH GOLDMAN, KENNETH J. SEMMENS & MICHAEL B. TIMMONS, (2003): Land-Based Aquaculture Production Systems, Engineering and Technology: Opportunities and Needs. NRAC Publication No. 03-002, 17 p. http://www.nrac.umd.edu/files/Whitepapers/wp_no2_land_based.pdf

MALISON, JEFFREY A. AND CHRISTOPHER F. HARTLEB, (2005): Best management practices for Aquaculture in Wisconsin and the great lakes region. http://aqua.wisc.edu/publications/PDFs/AquacultureBMP.pdf

MASSER, M.P., J. RAKOCY, AND T.M. LOSORDO. (1999): Recirculating aquaculture tank production systems: management of recirculating systems. Southern Regional Aquaculture Center Publication No. 452:12 pgs. http://aqua.ucdavis.edu/dbweb/outreach/aqua/452RFS.PDF

MILLER, D. & K. SEMMENS, (2002):Waste management in aquaculture. Aquaculture Information Series. http://www.wvu.edu/~agexten/aquaculture/waste02.pdf

SZIPER,J.,(1989): Bacyard aquaculture in Hawai, a Practical Manual. http://nsgl.gso.uri.edu/hawau/hawauh89001.pdf

### *Humedales y sistemas intensivos-extensivos integrados*

**Internet:**

| | |
|---|---|
| UNEP | http://www.unep.or.jp/Ietc/Publications/index_pub.asp |
| Global Nature Foundation. LIFE | http://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes |
| New Crop Home page | http://www.hort.purdue.edu/newcrop/ |

ADLER, P. R., S. T. SUMMERFELT , D. M. GLENN , F. TAKEDA (2002):Mechanistic approach to phytoremediation of water. Ecological Engineering 20, 251/264 http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/19310000/FTakeda/2003EcolEng20251-264.pdf

ADLER, P. R., (1998): Phytorremediation of aquaculture effluents. Aquaponics Journal, IV4, 10-15. http://www.cepis.org.pe/bvsair/e/repindex/repi84/vleh/fulltext/acrobat/phytoaqu.pdf

AZIM, M.E., VERDEGEM, M.C.J., VAN DAM, A.A., BEVERIDGE, M.C.M. (2005): Periphyton: ecology, exploitation and management. CABI Publishing, Camebridge, MA 02139, USA.

BOSWORTH,B.,B. SMALL, J. & J. AVERY, (2005): Producing Hybrid Catfish Fry: Workshop Manual. USDA – ARS Catfish Genetics Research Unit and the Mississippi State University National Warmwater Aquaculture Center May 25, 2005.http://www.msstate.edu/dept/tcnwac/HybridManual05.pdf

CELIS HIDALGO, J., J. JUNOD MONTANO Y M. SANDOVAL ESTRADA, (2005): Recent applications of waste water by means of aquatic plants . Theoria, 14(1)17-25 ( En Castellano) http://redalyc.uaemex.mx/pdf/299/29900103.pdf

COSTA-PIERCE, B.A. (1998): Preliminary investigation of an integrated aquaculture-wetland ecosystem using tertiary-treated municipal wastewater in Los Angeles County, California. Ecological Engineering, 10: 341-354.

EPA (Environmental Protection Agency), (2001):A Citizen's Guide to Phytoremediation. EPA 542-F-01-002. http://cluin.org/products/citguide/

FERNÁNDEZ GONZÁLEZ (COORD), (2005): Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en Flotación. Proyecto LIFE. Ayuntamiento de Lorca, UPM, Fundación global Nature y Caja Madrid ( Eds)(En Castellano) http://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/Manual%20sobre%20fitodepuracion.htm

FUNDACIÓN GLOBAL NATURE, (2005): Actas del Encuentro Internacional en fitodepuración (julio del 2005, Lorca, Murcia). 246-250 (En Castellano). http://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion.html

GOPAL, B. (2003): Perspectives on wetland science, application and policy. Hydrobiologia, 490: 1-10.

GÁL, D., PEKÁR, F., KEREPECZKI, É., VÁRADI, L. (2007): Experiments on the operation of a combined aquaculture-algae system. Aquaculture International, 15: 173-180.

GÁL D., KEREPECZKI É., SZABÓ P., PEKÁR F. (2008): A survey on the environmental impact of pond aquaculture in Hungary. European Aquaculture Society, Special Publication No. 37, pp. 230-231.

HAMMER, D. A., (1989): Constructed wetlands for wastewater treatment: municipal, industrial, and agricultural. CRC Press, ISBN 087371184X, 9780873711845, 831pp. http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=BCdPHXm677kC&oi=fnd&pg=PP5&dq=%22Hammer%22+%22Constructed+wetlands+for+wastewater+treatment:+...%22+&ots=KHBHP2MlXG&sig=fPGENuDWbZp-ZIWYiUpIvMQPvEI#PPP1,M1

JIANG,F. M.B. BECK, R.G. CUMMINGS, K. ROWLES, AND D. RUSSELL, (2005): Estimation of cost of Phosphorus removal in wastewater treatment facilities: Adaptation of existing facilities. Water Policy Working Paper #2005-011, 45pp. http://www.h2opolicycenter.org/pdf_documents/W2005011.pdf

KADLEC, R.H., KNIGHT, R.L. (1996): Treatment wetlands. Lewis Publishers, Boca Raton, USA.

KEREPECZKI É., GÁL D., SZABÓ P., PEKÁR F. (2003): Preliminary investigations on the nutrient removal efficiency of a wetland-type ecosystem. Hydrobiologia, 506-509: 665-670.

KEREPECZKI, E., PEKAR, F. (2005): Nitrogen dynamics in an integrated pond-wetland ecosystem. Verh. Internat. Verein. Limnol., 29: 877-879.

KOCHIAN, LEON V.(2000): Phytorremediation: using plants to clean up soils. Agricultural Research/ June 2000. http://www.ars.usda.gov/is/ar/archive/jun00/soil0600.htm

LINHART,O., LUDEˇK Sˇ TEˇCH, JAN Sˇ VARC , MAREK RODINA , JEAN PEAR AUDEBERT,JEAN GRECU , ROLAND BILLARD, (2002): The culture of the European catfish, *Silurus glanis*, in the Czech Republic and in France. *Aquat. Living Resour*. 15, 139–144 http://www.edpsciences.org/articles/alr/pdf/2002/02/alr2099.pdf?access=ok.

MOSHIRI, G. A.,(1993):Constructed wetlands for water quality improvement. CRC Press, ISBN 0873715500, 9780873715508,632 pp. http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=_PQJ7wGG_2cC&oi=fnd&pg=PA59&dq=%22Hammer%22+%22Constructed+wetlands+for+wastewater+treatment:+...%22+&ots=C3Frc-xpOW&sig=9uN1b3ZUpgdzJvFKwOVYMM3eyMw

STEDMAN, S.M. (ED).(2003):Guía para la restauración, creación y mejoramiento de humedales NOOA-EPA. (En Castellano) http://www.nmfs.noaa.gov/habitat/habitatconservation/publications/WetlandReportPagesSpanish.pdf

UNEP (2002): Integrated Watershed Management - Ecohydrology & Phytotechnology Manual. http://www.unep.or.jp/Ietc/Publications/Water_Sanitation/integrated_watershed_mgmt_manual/index.asp

UNEP,(2003): Phytotechnologies . A Technical Approach in Environmental Management. http://www.unep.or.jp/Ietc/Publications/Freshwater/FMS7/index.asp

### *Policrianza y sistemas en cascada*

BOYD, C. (1995): Bottom soils, sediment and pond aquaculture. Chapman & Hall, New York, p. 348

EL SAMRA, M., OLÁH. (1979): Significance of nitrogen fixation in fish ponds. Aquaculture, 18:367-372

MARA, DUNCAN & SANDY CAIRNCROSS, (2003): Guidelines for the Safe Use of Excreta and Wastewater in Agriculture and Aquaculture, Executive summary -UNEP- WHO Publications, 32 p. http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/who/waste1.pdf

http://bases.bireme.br/cgibin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=11401&indexSearch=ID

RAHMAN, M. M., (2006):Food web interactions and nutrient dynamics in polyculture ponds PHD. Thesis. Wageningen University, 168 p. http://library.wur.nl/wda/dissertations/dis3980.pdf

SZUMIEC, M.A., AUGUSTYN, D. (2002): Dynamics of the surface water circulation between a river and fishponds in a sub-mountain area. IN: Rizzoli A.E. & Jakeman A.J. (Eds), Integrated assessment and decision support. Proceedings of the First biennal meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, Lugano (Switzerland), 1, 358-362

WHO, (2006): Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater . Volume 3 Wastewater and excreta use in aquaculture. World Health Organization, ISBN 9241546840, 9789241546843, 158 pp. http://books.google.es/books?id=4pwn_aSZRbQC&dq=Guidelines+for+the+Safe+Use+of+Excreta+and+Wastewater+in+Agriculture+and+Aquaculture&printsec=frontcover&source=bl&ots=0d7dOlzfcx&sig=Db4Sv_XtGBCQey0zsjBnuiw5VVU&hl=es&ei=dvYISojvCcfRjAfAuYiQCw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1#PPP1,M1

YEO, S. E., BINKOWSKI F.P & MORRIS, J.P., (2004): Aquaculture Effluents and Waste By-Products. Characteristics, Potential Recovery, and Beneficial Reuse. NCRAC Publications Office North Central Regional Aquaculture Center. Iowa State University. http://www.aqua.wisc.edu/publications/PDFs/AquacultureEffluents.pdf

### *Recirculación en piscifactorías de trucha*

**Internet:**

https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=12998 - Bekendtgørelse om Ferskvandsdambrug, BEK nr. 1325 af 20/11/2006.

https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=13002 - Bekendtgørelse om Modeldambrug, BEK nr 1327 af 20/11/2006.

http://www.blst.dk/ - Data from By- og Landskabsstyrelsen 2007

AQUAETREAT, (2005): Manual on effluent treatment in aquaculture: Science and Practice Aquaetreat publications. http://www.feap.info/aquaetreat/manual_en.asp

BUREAU, D.P. AND CHO, C.Y. , (1999): Phosphorus utilization by rainbow trout (Oncorhynchus mykiss): estimation of dissolved phosphorus waste output. Aquaculture 179: 127-140.

CHO, C.Y., SLINGER, S.J., AND BAYLEY, H.S. (1982): Bioenergetics of salmonid fishes: energy intake, expenditure and productivity. Comp. Biochem. Physiol. 73B: 25–41.

DALSGAARD, J., EKMANN, K.S., PEDERSEN, P.B., AND VERLHAC, V., (2008): Effect of supplemented fungal phytase on performence and phosphorus availability by phosphorus-depleted juvenile rainhbow trout (Oncorhynchus mykiss), and on the magnitude and composition of phosphorus waste output. Aquaculture , doi:10.1016. 2008

JOKUMSEN, A. (2002): Udredning vedr. vandforbrug ved produktion af regnbueørreder i danske dambrug. DFU-rapport nr. 106-02. Report in Danish.

LOKALENERGI (2008):1: Energioptimalt design af dambrug.

PEDERSEN, P.B.; GRØNBORG, O.; SVENDSEN, L.M. (2003): Modeldambrug. Specifikationer og godkendelseskrav. Arbejdsrapport fra DMU, nr. 183, 2003. Report in Danish.

SUGIURA, S.H., DONG F.M., AND HARDY, R.W., (2000b):. Primary responses of rainbow trout to dietary phosphorus concentration. Aquacult. Nutr. 6: 235-245.

SVENDSEN, L.M., SORTKJÆR, O., OVESEN, N.B., SKRIVER, J., LARSEN, S.E., BOUTTRUP, S., PEDERSEN, P. B., RASMUSSEN, R.S., DALSGAARD, A.J.T., AND SUHR, K, (2008): Modeldambrug under forsøgsordningen. Faglig slutrapport for måle- og dokumentationsprojekt for modeldambrug "(in Danish)". DTU Aqua rapport nr.193-08 . DTU Aqua, Technical University of Denmark.

SVENDSEN, L.M., SORTKJÆR, O., OVESEN, N.B., SKRIVER, J., LARSEN, S.E., PEDERSEN, P. B., RASMUSSEN, R.S. AND DALSGAARD, A.J.T., (2008): Ejstrupholm Dambrug - et modeldambrug under forsøgsordningen. Statusrapport for 2. måleår af moniteringsprojektet med væsentlige resultater fra første måleår (”In Danish”). DTU Aqua rapport nr.188-08 . DTU Aqua, Technical University of Denmark.

### *Sistemas de recirculación en piscifactorías de tilapia*

BOVENDEUR, J., EDING, E.H., HENKEN, A.M., (1987): Design and performance of a water recirculation system for high-density culture of the African catfish, Clarius gariepinus (Burchell 1822). Aquaculture 63, 329–353

EDING, E.H., WEERD, J.H. VAN, (1999): Grundlagen, Aufbau und Management von Kreislaufanlagen. In: M.Bohl (Ed.), Zucht und Produktion von Süsswasserfischen, DLG –Verlag, Frankfurt, München, 2nd edn., pp. 436-491.

EDING, E.H., KAMSTRA, A., VERRETH, J.A.J., HUISMAN, E.A., KLAPWIJK, A.,( 2006): Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: a review. Aquaculture Engineering 34, 234–260.

HEINSBROEK, L.T.N. AND KAMSTRA, A., (1990): Design and performance of water recirculation systems for eel culture. Aquacult. Engineering 9 (3), 87–207.

van RIJN, J., TAL,Y., SCHREIER, H.J., (2006): Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. Aquacultural Engineering 34 (3), 364–376.

SCHNEIDER, O., SERETI, V., EDING, E.H., and J.A.J. VERRETH, (2005): Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. Aquacultural Engineering 32, 379–401.

TIMMONS, M.B. AND J.M. EBELING, (2007): Recirculating Aquaculture, Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, New York, p. 975

### *Tecnología PTS en estanques*

ASADUZZAMAN, M., WAHAB, M.A., VERDEGEM, M.C.J., HUQUE, S., SALAM, M.A., AZIM, M.E., (2008): C/N ratio control and substrate addition for periphyton development jointly enhance freshwater prawn Macrobrachium rosenbergii production in ponds. Aquaculture 280, 117-123.

AZIM, M.E., VERDEGEM, M.C.J., VAN DAM, A.A., BEVERIDGE, M.C.M., (2005): Periphyton : ecology, exploitation and management. CABI Publishing, Camebridge, MA 02139, USA.

RAHMAN, M.M., YAKUPITIYAGE, A., (2006): Use of fishpond sediment for sustainable aquaculture-agriculture farming. International Journal of Sustainable Development and Planning 1, 192-202.

***Hidroponía y proyecto Tropenhaus***

**Internet:**

Aquaponics Journal www.aquaponicjournal.com
Aquaponics www.aquaponics.com

ADLER , PAUL R., (1998): Phytorremediation of aquaculture effluents. Aquaponics Journal, IV4, 10-15. http://www.cepis.org.pe/bvsair/e/repindex/repi84/vleh/fulltext/acrobat/phytoaqu.pdf

ADLER, P.R., J.K. HARPER, E.W. WADE, F. TAKEDA, AND S.T. SUMMERFELT. (2000 a): Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. International Journal of Recirculating Aquaculture. Vol. 1, No. 1. p. 15–34. http://www.ijra.com/v12000/article2.html

ADLER, P.R., J.K. HARPER, F. TAKEDA, E.M. WADE, AND S.T. SUMMERFELT. (2000b): Economic evaluation of hydroponic and other treatment options for phosphorus removal in aquaculture effluent. HortScience. Vol. 35, No. 6. p. 993–999. http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/19310000/FTakeda/2000HortSci-phytoremediation.pdf

ADLER , PAUL R., STEVEN T. SUMMERFELT , D. MICHAEL GLENN , FUMIOMI TAKEDA (2002c): Mechanistic approach to phytoremediation of wáter. Ecological Engineering 20, 251/264 http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/19310000/FTakeda/2003EcolEng20251-264.pdf

DEZSERY, A.,(1999): Growing Notes--Australian Aquaponics--Whole Fresh Fish and a Side Salad Please!. The Growing Edge Magazine, 11(2) http://www.growingedge.com/magazine/back_issues/view_article.php3?AID=110217

DIVER S, (2006): Aquaponics-Integration of Hydroponics with Aquaculture. http://attra.ncat.org/new_pubs/attrapub/PDF/aquaponic.pdf?id=NewYork

HUGHEY, T. W. (2005): Barrel- Ponics. Aquaponics in a Barrel. http://www.aces.edu/dept/fisheries/education/documents/barrel-ponics.pdf

GRABER, A. & TODT, D.,(2002): Economic and ecologic potential of polyculture systems in greenhouses cultures.International conference on Urban Horticulture. Waedenswil, Switzerland, Sept 02 - 05 2002. http://www.hortikultur.ch/pub/files/155.pdf

JACKSON,L. & MYERS J., (2002): Alternative Use of Produced Water in Aquaculture and Hydroponic Systems at Naval Petroleum Reserve No. 3. http://www.gwpc.org/GWPC_Meetings/Information/PW2002/Papers/Lorri_Jackson_PWC2002.pdf

JONES S., (2002):Evolution of aquaponics . Aquaponics Journal , n 24 ( 1st Quarter, 2002). In http://www.aquaponicsjournal.com/articleEvolution.htm

LENNARD W., (2004): Aquaponics, the theory behind the integration. In GAIN (Gippsland Aquaculture Industry Network) http://www.growfish.com.au/content.asp?contentid=1060

RAKOCY, J. E., BAILEY, D. S., R. SHULTZ C. & THOMAN, E. S. (2004): Update on tilapia and vegetable production in the uvi aquaponic system**.** In: New Dimensions on Farmed Tilapia, Proc. 6th International Symposium on Tilapia in Aquaculture Philippine International Convention Center Roxas Boulevard, Manila, Philippines September 12-16, 2004. http://ag.arizona.edu/azaqua/ista/ista6/ista6web/pdf/676.pdf

RAKOCY, J. E., D.R. BAILEY, CH. SHULTZ, & J. J. DANAHER, (2006): Economical potential of aquaponic systems.www.australianaquacultureportal.com/austaqua/pdf/sessions/Monday/Rakocy_et_al.pdf

STAUDENMANN, J. & JUNGE-BERBEROVIC, R., (2003): The Otelfingen Aquaculture Project: Recycling of Nutrients from Waste Water in a Temperate Climate. Journal of Applied Aquaculture Vol 13 Issue: ½ http://www.haworthpress.com/store/ArticleAbstract.asp?sid=T55JL21XFU1L8KKKJ9WSB6CE7KKR89A6&ID=22408

STAUNDEMANN J. & JUNGE-BERBEROVIC, R.(2005): Treating Biogas Plant Effluent through Aquaculture: First Results and Experiences from the Otelfingen Pilot Plant (Switzerland). http://www.hortikultur.ch/pub/files/5.pdf

TAKEDA,F., P.R. ADLER, & D.M. GLENN. (1997): Strawberry production linked to aquaculture wastewater treatment. Acta Horticulturae. Vol. 439. p. 673–678. http://www.actahort.org/books/439/439_113.htm

TYSON, R. (2004): Water and nitrogen budgets for aquaponic systems. Seminole Co. Coop. Ext. Serv. - Vegetarian 04-09**.** http://www.hos.ufl.edu/vegetarian/04/September/Sept04.pdf

WILSON, G. (2002a): Saltwater aquaponics. The Growing Edge, Volume 13, Number 4, March/April 2002, page 26. http://www.growingedge.com/magazine/back_issues/view_article.php3?AID=130426

WILSON, G. (2002B): Aquaponics Proves Profitable in Australia http://www.aquaponicsjournal.com/articleaustralia.htm

# Autores del Manual

### *Editores*

Dr. László Váradi (Research Institute for Fisheries, Aquaculture and Irrigation - HAKI)
Tamás Bardócz (Akvapark Association)

### *Lista de autores por capítulos:*

1. **Introducción a SustainAqua**
   Alexandra Oberdieck - ttz Bremerhaven
2. **Sostenibilidad en acuicultura**
   Christian Hildmann - Martin-Luther-University Halle Wittenberg
   Alexandra Oberdieck - ttz Bremerhaven
3. **Tecnología y producción de los principales tipos de acuicultura continental en Europa**
   Tamás Bardócz - Akvapark Association
4. **Marco normativo y de gobernanza en la acuicultura continental europea**
   Tamás Bardócz - Akvapark Association
   László Váradi – Research Institute for Fisheries, Aquaculture and Irrigation (HAKI)
5. **Calidad y diversificación. Oportunidades de Mercado para los productos y subproductos de la acuicultura**
   Alexandra Oberdieck - ttz Bremerhaven
6. **Tratamiento de las aguas residuales de sistemas intensivos de acuicultura mediante humedales y estanques extensivos- Estudio de caso en Hungría**
   Dénes Gál, Éva Kerepeczki, Tünde Kosáros, Réka Hegedűs, Ferenc Pekár, Lászlo Váradi – Research Institute for Fisheries, Aquaculture and Irrigation (HAKI)
7. **Mejora de la productividad natural en estanques extensivos- Estudio de caso en Polonia**
   Maciej Pilarczyk, Joanna Ponicka, Magdalena Stanna - Polish Academy of Sciences, Institute of Ichthyobiology and Aquaculture (GOLYSZ)
8. **Nuevos métodos de crianza de truchas para reducir los efluentes en las piscifactorías-Estudio de caso en Dinamarca**
   Alfred Jokumsen, Per B. Pedersen, Anne Johanne T. Dalsgaard, Ivar Lund, Helge Paulsen, Richard S. Rasmussen, Grethe Hyldig - Technical University of Denmark, National Institute of Aquatic Resources (DTU Aqua)
   Lisbeth J. Plessner, Kaare Michelsen, Christian Laursen - Danish Aquaculture Organisation (ODA)
9. **Crianza de tilapia en sistemas acuícolas de recirculación (SAR)- Estudio de caso en Holanda**
   Ep Eding, Marc Verdegem, Catarina Martins, Geertje Schlaman, Leon Heinsbroek, Bob Laarhoven,
   Stephan Ende, Johan Verreth - Aquaculture and Fisheries Group, Wageningen University (WU-AFI)
   Frans Aartsen, Victor Bierbooms - ZonAquafarming B.V. (ROYAAL)
10. **Producción tropical basada en el concepto de sistema integrado "Tropenhaus" – Estudio de caso en Suiza**
    Johannes Heeb, Philippe Wyss - International Ecological Engineering Society (IEES)
    Zdenek Adamek - Research Institute of Fish Culture and Hydrobiology, University of South Bohemia (USB)

## Agradecimientos

Este manual es uno de los resultados del proyecto de investigación colectiva SustainAqua financiado por la Comisión Europea como parte de su Sexto Programa Marco (6PM). La investigación y la formación se ha llevado a cabo por un consorcio de veintitrés socios:

ttz Bremerhaven (ttz), Germany; International organisation for the development of fisheries in Eastern and Central Europe (EUROFISH), Denmark; Akvapark Association (AKVAPARK), Hungary; Verband der Deutschen Binnenfischerei e.V. (VDBi), Germany; Vattenbrukarnas Riksförbund (VRF), Sweden; Stowarzyszenie Producentów Ryb Lososiowatych (PTBA), Poland; Organización de Productores Piscicultores (OPP), Spain; Österreichischer Fischereiverband (ÖFV), Austria; Su Ürünleri Tanitim Dernegi (BTG), Turkey; Danish Aquaculture Organisation (ODA), Denmark; International Ecological Engineering Society (IEES), Switzerland; AquaBioTech Ltd. (ABT), Malta; Aranyponty Halászati Zrt. (ARANY), Hungary; Aquakultur Kahle (KAHLE), Germany; Hodowla Ryb "SALMO" (SALMO), Poland; Liman Enegre Balikçilik Sanayii ve Ticaret Ltd.STI. (LIMAN), Turkey; Viskwekerij Royaal B.V. (ROYAAL), Netherlands; University of South Bohemia in Ceske Budejovice (USB), Czech Republic; Wageningen University - Aquaculture and Fisheries Group (WU-AFI), Netherlands; Polska Akademia Nauk, Zakład Ichtiobiologii i Gospodarki Rybackiej (GOLYSZ), Poland; Martin-Luther-University Halle Wittenberg (MLU), Germany; Research Institute for Fisheries, Aquaculture and Irrigation (HAKI), Hungary; Technical University of Denmark - National Institute of Aquatic Resources (DTU-AQUA), Denmark

El trabajo que hay detrás de la producción de este manual es el esfuerzo conjunto de muchas personas, demasiadas para reconocer individualmente, aunque merecen mención especial las siguientes por sus excepcionales aportaciones:

Tamás Bardócz (AKVAPARK), Alexandra Oberdieck (ttz), Dénes Gál (HAKI), Alfred Jokumsen (DTU-AQUA), Maciej Pilarczyk (GOLYSZ), Ep Eding & Marc Verdegem (WU-AFI), Johannes Heeb & Philippe Wyss (IEES)

Les agradecemos su dedicado trabajo.

*SustainAqua consortium (Foto: ttz Bremerhaven)*

Diseño gráfico de la portada EUROFISH. Impresión: **Organización Productores Piscicultores**

Traducción equipo **O.P.PISCICULTORES**: Concha Jambrina, Raúl Rodríguez Blázquez. Pablo Caballero

©SustainAqua, junio 2009.Todos los derechos reservados.

Distribución libre.

Más información: ***www.sustainaqua.org.***
***info@piscicultores.net*** www.aquapiscis.org

OPP ORGANIZACIÓN PRODUCTORES PISCICULTORES

C/ General Moscardó
nº 3-5-F 28020 Madrid
Tel:91.553.06.16/64
Fax: 91.553.06.64

Por favor, citar como:

"SustainAqua–Integrated approach for a sustainable and healthy freshwater aquaculture" (2009). SustainAqua handbook – A handbook for sustainable aquaculture