



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

**RECUPERACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO
POR LA MACROALGA *Ulva lactuca* EN UN
SISTEMA ACUÍCOLA DE RECIRCULACIÓN (SAR)
INTEGRADO CON JUREL *Seriola rivoliana*.**

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
Orientación Acuicultura

Presenta

BERNARDO ANTONIO BARBOSA ROMO

La Paz, Baja California Sur, Noviembre de 2019

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., Siendo las 13:00 horas del día 14 del Mes de Octubre del 2019, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Recuperación de nitrógeno y fósforo por la macroalga *Ulva lactuca* en un sistema acuícola de recirculación integrado con jurel *Seriola rivoliana*"

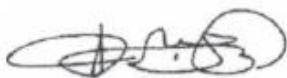
Presentada por el alumno:

Bernardo Antonio Barbosa Romo

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Acuicultura**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Francisco Javier Magallón Barajas
Co-Director de tesis



Dr. Juan Carlos Pérez Urbiola
Co-Director de tesis



Dr. Alberto Peña Rodríguez
Co-Tutor



Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle
Co-Tutor



Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos

Comité tutorial

Dr. Juan Carlos Pérez Urbiola

Co-Director de tesis.

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR)

Dr. Francisco Javier Magallón Barajas

Co-Director de tesis.

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR)

Dr. Alberto Peña Rodríguez

Co-tutor

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR)

Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle

Co-tutor.

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR)

Comité revisor de tesis

Dr. Juan Carlos Pérez Urbiola

Dr. Francisco Javier Magallón Barajas

Dr. Alberto Peña Rodríguez

Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle

Jurado de examen de grado

Dr. Juan Carlos Pérez Urbiola

Dr. Francisco Javier Magallón Barajas

Dr. Alberto Peña Rodríguez

Suplente

Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle

Resumen

En Baja California Sur, México, existe un creciente interés por la producción del jurel *Seriola rivoliana* debido a la factibilidad de su comercialización. Como en toda industria acuícola, la generación de desechos, como el nitrógeno y fósforo, que son vertidos en las aguas costeras y marinas; favorecen fenómenos naturales como la eutrofización, lo que representa un problema ambiental y de sanidad. Por ende, es de suma importancia que la industria acuícola implemente una alternativa para la disminución de la contaminación por nutrientes como la acuicultura multitrófica integrada y así, cumplir con las nuevas regulaciones internacionales, mantener la calidad del agua en el sistema de cultivo, generar un menor impacto ambiental y obtener un subproducto de valor comercial. Dicho lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo el diseñar, aplicar y evaluar un sistema de recirculación mediante la integración del cultivo de *S. rivoliana* y la macroalga *Ulva lactuca* que se identificó como el candidato ideal para la biofiltración y aprovechamiento de los compuestos residuales en el agua.

Mediante una evaluación en sistemas cerrados con diferentes tasas de alimentación (2, 2.5 y 3 % respecto a su biomasa), se determinó que la tasa de excreción de amonio del jurel alimentado con 0.030 kg de alimento (46 % de proteína) produce 293.9 mg de amonio por un kilogramo de biomasa. Se diseñaron dos sistemas acuícolas: un sistema de recirculación y uno abierto que incluyeron un tanque para el cultivo de peces, un sedimentador y un biofiltro conformado por *U. lactuca*. El sistema fue evaluado a partir de parámetros de calidad de agua, salud del pez y el incremento de biomasa. El biofiltro mejoró la calidad de agua en el sistema, mantuvo los niveles de los compuestos nitrogenados (Amonio 0.5 mg/L, nitrito 0.4 mg/L y nitrato 0.4 mg/L) y de fósforo (0.3 mg/L) por debajo del nivel crítico (amonio 1 mg/L y fósforo 1.10 mg/L). El alga presentó una capacidad de remoción del 95 % de amonio, 92 % de fósforo, 52 y 53 % de remoción de los nitritos y nitratos respectivamente. El diseño del sistema que se propone para el cultivo de *S. rivoliana* permite la expansión de la piscicultura al disminuir las cargas de nutrientes en los efluentes. Reduce los posibles impactos al ambiente y permite disminuir significativamente el recambio de agua (90 %), sin afectar el rendimiento productivo del pez ni su composición bioquímica. Finalmente, esto podría verse reflejado en el ahorro de energía y en la bioseguridad del sistema.

Palabras Clave: Cultivo multitrófico, SAR, nitrificación, asimilación de nutrientes, nutrientes disueltos.



Dr. Juan Carlos Pérez Urbiola

Co-Director



Dr. Francisco Javier Magallón Barajas

Co-Director

Abstract

There is a growing interest in the production of *Seriola rivoliana* In Baja California Sur, Mexico due to the feasibility of its national and international industry growth. As in any aquaculture industry, the generation of wastes, such as nitrogen and phosphorus contain in the effluents are directly delivered to coastal and marine waters; which causes natural phenomena such as eutrophication that impacts the environments health. Therefore, it is compulsory for the aquaculture industries to implement new strategies to reduce the nutrient contamination. One of the alternatives is the integrated multitrophic aquaculture and thus, complies with the new international regulations, also maintain the water quality in the culture system, generate a lower environmental impact and obtain a sub-product of commercial value. The present research aims to design, apply and evaluate a recirculation system through the integration of *S. rivoliana* and *Ulva lactuca* which was identified as the ideal candidate for biofiltration.

Through an evaluation in closed systems with different feeding rates (2, 2.5 y 3 %), it was determined that the rate of excretion of *S. rivoliana* feed with 0.030 kg (46 % protein) produces 293 mg per one kilogram of biomass. Two aquaculture systems were also designed: a recirculation system and an open system that included a tank for fish farming and a biofilter by the macroalgae. The system was evaluated based on parameters of water quality, fish health, and production yield. The biofilter improved the water quality in the system, maintaining the levels of the nitrogen compounds (ammonium 0.5 mg/L, nitrite 0.4 mg/L, and nitrate 0.4 mg/L) and phosphorus (0.3 mg/L) below the critical level (Ammonium 1 mg/L and 1.10 mg/L). The seaweed had a removal capacity of 95 % ammonium, 92 % phosphorus and for nitrites and nitrates it showed a removal capacity of 52 and 53 %, respectively. The design of the system proposed for the cultivation of *S. rivoliana* allows the expansion of fish farming by reducing nutrient loads in the effluents. Reducing the possible impacts on the environment and also reduces significantly the need for water replacement (90 %), without affecting the productive yield of the fish or its biochemical composition. Finally, this could be reflected in the energy savings and the biosecurity of the system.

Keywords: Multitrophic aquaculture, RAS, nitrification, nutrient uptake, dissolved nutrients.



Dr. Juan Carlos Pérez Urbiola
Co-Director



Dr. Francisco Javier Magallón Barajas
Co-Director

Dedicatoria

Este trabajo de investigación lo dedico a mis padres José Alberto Barbosa Cruz y Angélica María Romo Romo, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

A mis hermanas, Kiki y Milancita por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A toda mi familia, especialmente a mi abuelito Nayo y a mi tío Obdulio por confiar en mí y por llenarme de motivación para alcanzar mis metas.

También dedico este trabajo a todas las personas que se involucraron en mi trabajo de tesis, a aquellos que me abrieron las puertas y me compartieron sus conocimientos.

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste por ser mi casa de estudios durante la maestría y brindarme las facilidades tanto en equipo como en infraestructura para desarrollar mi tema de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca (No. 636366) otorgada que me permitió finalizar mis estudios de maestría y realizar la presente tesis.

A la empresa acuícola Cabo Kampachi y al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas por proporcionarme el material biológico.

A mi comité tutorial, al Dr. Juan Carlos Pérez Urbiola por sus recomendaciones durante la fase experimental, por preocuparse por cada elemento dentro de los bioensayos.

Al Dr. Francisco Javier Magallón Barajas por su apoyo y su visión en el trabajo de investigación.

Al Dr. Alberto Peña Rodríguez por el tiempo que invirtió en mí y su paciencia para explicarme puntos fundamentales en la fase de experimentación. También por orientarme en la fase de análisis y redacción.

Al Dr. Felipe de Jesús Ascencio Valle por sus recomendaciones para robustecer el trabajo de investigación.

Al Dr. Masato Endo de la Universidad de Ciencias Marinas y Tecnología de Tokio y a todos los integrantes del Laboratorio de Cultivos Multitróficos: especialmente a Lic. Shuma Sempai y Lic. Ryusei Sempai por acogerme durante tres meses y medio para instruirme en las técnicas de laboratorio relacionadas a mi tema de investigación y también les agradezco por haberme brindado su amistad.

A los técnicos como el Lic. Jorge León Sandoval Soto responsable del Laboratorio Experimental de Cultivo Larvario; Ing. Mario Osuna responsable del Laboratorio de Producción de Zooplancton; M. C. Francisco Javier Ramírez responsable del Laboratorio de Recepción de Peces Marinos que siempre estuvieron pendientes

de los bioensayos durante la fase experimental; Lic. Pablo Monsalvo Spencer encargado del Laboratorio Experimental de Larvicultura de Peces Marinos; Ing. Pesquero Julian Alfonso Garzon Favela y a la I.B.Q. Adriaba Greene Yee encargados del Laboratorio de Alimento Vivo.

Al Ing. Horacio Sandoval Gómez responsable del Laboratorio de Cómputo por apoyarme con descargas de softwares para análisis de datos y explicarme cómo manejar los softwares cuando tuve complicaciones. Además, disipó muchas de mis dudas durante la elaboración de la tesis.

Al Laboratorio de Biotecnología Ambiental donde realicé parte de los análisis espectrofotométricos, a las personas que laboran en él. Particularmente, a la Dra. Melissa López Vela por apoyarme en todo momento durante la fase de análisis.

Al Laboratorio de Ecofisiología donde realicé la mayor parte de los análisis de espectrofotometría y los análisis proximales, a las personas que laboran en él. En especial al Lic. Roberto Hernández Herrera por tener la paciencia y amabilidad de guiarme durante la fase de análisis.

A la Dra. Silvi Dumas y M.C. Mauricio Contreras del CICIMAR por haber llevado acabo el larvicultivo del lote de juveniles de *S. rivoliana* que se utilizaron en los experimentos.

Al Dr. Deneb Maldonado García, catedrático CONACYT por su asesoría y la revisión de esta tesis.

A los estudiantes que realizaron sus prácticas profesionales o servicio social: a la Lic. Marycruz Espinoza Quiñones, Ing. Aldahir Núñez Rondero, Ing. Jazmín Guadalupe Arellanos Sánchez. Porque fueron muy responsables en apoyarme durante la fase de experimentación, su colaboración en el trabajo zootécnico fue excepcional.

A mi amigo y colega, Biól. Mar. Luis Alfredo Barra González por apoyarme en las biometrías.

A mis compañeros de maestría porque siempre nos mantuvimos juntos y proactivos.

A mi querida novia M.C. Yenith Paola Anaya López porque se involucró de lleno en mi tema de investigación, por estar presente en todas las biometrías del experimento, y contagiarme de su actitud positiva. Le agradezco por ser mi compañera en la vida cotidiana, porque su compañía también es parte fundamental de mi estabilidad que se refleja en mi trabajo.

Finalmente, agradezco a mi familia, porque siempre estamos dispuestos a aconsejarnos y buscar el bienestar familiar. A mis padres por darme una preparación personal y académica de calidad, a mis hermanas porque siempre nos mantenemos unidos en los momentos equilibrados y en las situaciones poco favorables, porque no somos los logros que obtenemos sino lo que superamos.

Contenido

Resumen.....	i
Summary.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	vii
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1. Panorama acuícola mundial	4
2.2. Diversificación de la piscicultura	5
2.3. Biología del jurel <i>Seriola rivoliana</i> y su situación actual en México	7
2.4. Clasificación taxonómica del jurel <i>Seriola rivoliana</i>	8
2.5. Reproducción del jurel <i>Seriola rivoliana</i>	8
2.6. Distribución y hábitat del jurel <i>Seriola rivoliana</i>	9
2.7. Requerimientos nutricionales del jurel <i>Seriola rivoliana</i>	9
2.8. Valor nutricional del jurel <i>Seriola rivoliana</i>	11
2.9. Infraestructura y parámetros de cultivo	11
2.10. Excreción de peces de cultivo y efectos adversos	13
2.11. El amonio como factor limitante de la acuicultura	16
2.12. Algas marinas, componentes biológicos clave para una economía azul	19
2.13. Acuicultura multitrófica integrada	20
2.14. Biología del género <i>Ulva</i>	21
2.15. Clasificación taxonómica de <i>U. lactuca</i>	23
2.16. Reproducción de <i>U. lactuca</i>	23
2.17. Productos derivados de <i>U. lactuca</i>	26
3. JUSTIFICACIÓN	28
4. HIPÓTESIS	29

5. OBJETIVOS	30
5.1. Objetivo general	30
5.2. Objetivos particulares	30
6. METODOLOGÍA	31
6.1. Obtención de material biológico	31
6.2. Caracterización de los sistemas acuícolas	33
6.3. Condiciones de cultivo	35
6.4. Análisis de la excreción de amonio en un cultivo de <i>Seriola rivoliana</i>	37
6.5. Capacidad de fijación de fósforo y nitrógeno inorgánico de la macroalga <i>U. lactuca</i> en un cultivo integrado con <i>S. rivoliana</i>	38
6.6. Determinación de los índices de rendimiento productivo de <i>Seriola rivoliana</i> y <i>Ulva lactuca</i> en un sistema acuícola de recirculación	40
6.7. Determinación de la composición bioquímica del músculo de <i>Seriola rivoliana</i> y <i>Ulva lactuca</i> en un cultivo integrado	43
6.8. Pruebas estadísticas	44
7. RESULTADOS	45
7.1. Parámetros de cultivo	45
7.2. Cuantificación de la producción de amonio en un cultivo de <i>Seriola rivoliana</i>	46
7.3. Estimación de la capacidad de fijación de fósforo y nitrógeno inorgánico de la macroalga <i>Ulva lactuca</i> en un sistema acuícola de recirculación integrado con <i>S. rivoliana</i>	47
7.4. Índices de rendimiento productivo de <i>S. rivoliana</i> y <i>U. lactuca</i> en un sistema acuícola de recirculación	54
7.5. Composición bioquímica del músculo de <i>Seriola rivoliana</i> y tejido de <i>Ulva lactuca</i> en un cultivo integrado	58
8. DISCUSIÓN	60
9. CONCLUSIONES	71
10. LITERATURA CITADA	73

Lista de figuras

- Figura 1.** Producción mundial de la pesca por captura y acuicultura en millones de toneladas4
- Figura 2.** Fotografía de un ejemplar adulto de *Seriola rivoliana*, su cuerpo presenta una forma alargada, fusiforme, la forma del hocico es redonda, el dorso es de color aceitunado, el vientre presenta un color blanquecino-plateado y la línea lateral bien marcada, entre otras características morfológicas externas que se pueden observar en la fotografía.....8
- Figura 3.** Esquema de excreción de nitrógeno y fósforo liberados al ambiente acuático, modificado de Folke y Kaustsky14
- Figura 4.** Fotografía de *Ulva lactuca*, la macroalga se encuentra completa, cuenta con un disco basal, ramificaciones laminares. Presenta una coloración verde, característica de las algas clorofitas22
- Figura 5.** Ciclo de vida de *Ulva* sp., ejemplo de alternancia de generaciones isomórficas.....24
- Figura 6.** Fotografía del sistema de cultivo del laboratorio húmedo de genómica. Se observa el drenado del exceso de agua de la macroalga *U. lactuca* utilizando una red de captura, con el motivo de pesarla y sembrarla en los biofiltros de los sistemas de experimentación32
- Figura 7.** Diseño a escala de los sistemas acuícolas acondicionados para la integración de las especies *Seriola rivoliana* y *Ulva lactuca*.33
- Figura 8.** Fotografía de sistema acuícola cerrado acondicionado en el área de recepción de peces marinos34
- Figura 9.** Fotografía de sistemas acuícolas del grupo B y C acondicionados en el área de recepción de peces marinos.....35

Figura 10. Fotografía de siembra de macroalga en los biofiltros	38
Figura 11. Fotografía de biometría de peces	41
Figura 12. Fotografía de cosecha de las macroalgas	41
Figura 13. Producción de amonio en un cultivo de <i>S. rivoliana</i> con distintos porcentajes de alimentación: 2, 2.5 y 3 % (57, 71 y 85 g respectivamente)	46
Figura 14. Concentración de amonio en los diferentes tratamientos (RP: recirculación peces y CP: control peces, RA: recirculación algas y CA: control algas) durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas.....	49
Figura 15. Concentración de fósforo en los diferentes tratamientos (RP: recirculación peces y CP: control peces, RA: recirculación algas y CA: control algas) durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas.....	50
Figura 16. Concentración de nitritos en los diferentes tratamientos (RP: recirculación peces y CP: control peces, RA: recirculación algas y CA: control algas) durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas.....	51
Figura 17. Concentración de nitratos en los diferentes tratamientos (RP: recirculación peces y CP: control peces, RA: recirculación algas y CA: control algas) durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas.....	53
Figura 18. Esquema de balance de nitrógeno del sistema acuícola de recirculación con 30 % de recambio.....	54
Figura 19. Esquema de balance de nitrógeno del sistema acuícola abierto con 300 % de recambio.....	55

Figura 20. Fotografía de cosecha de macroalgas (16.69 kg) cultivada con efluentes generados por el cultivo de *S. rivoliana*.....57

Lista de tablas

Tabla 1. Análisis de composición bioquímica de <i>S. rivoliana</i> en peso seco	11
Tabla 2. Promedios de los parámetros registrados de cada tratamiento durante los 3 ciclos (Oxígeno disuelto, temperatura, salinidad y pH)	46
Tabla 3. Promedios de las concentraciones de nutrientes (amonio, nitratos, nitritos y fósforo) de cada tratamiento, durante los tres ciclos de experimentación	48
Tabla 4. Indicadores de rendimiento productivo de <i>S. rivoliana</i> para los tratamientos RP (recirculación peces) y CP (control peces)	55
Tabla 5. Indicadores de crecimiento de <i>U. lactuca</i> para los tratamientos (RA: tratamiento de recirculación, CA: tratamiento control).....	57
Tabla 6. Composición bioquímica del músculo de <i>S. rivoliana</i> en un sistema integrado con <i>U. lactuca</i>	58
Tabla 7. Composición bioquímica de <i>Ulva lactuca</i> en un sistema integado con <i>S. rivoliana</i>	59

1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura ha incrementado su producción mediante el cultivo de nuevas especies marinas, como es el caso de *Seriola rivoliana* que ha sido cultivada exitosamente en diferentes partes del mundo (Japón, Taiwán, Corea, China, Australia, Estados Unidos, entre otros) (Sicuro y Luzzana, 2016). En México, existe un creciente interés por la producción de esta especie debido a la factibilidad de su producción. Lo anterior se debe a que es una especie nativa y a las características biológicas que posee (Espinoza *et al.*, 2009). Principalmente, su rápido crecimiento que da como resultado un factor de conversión de 1 kilo de biomasa por 2 de alimento. También, es considerado un ejemplar de alto valor nutricional (humedad 74-76, proteína 21-22 gr, grasa 1-1.5 gr y cenizas 3-0,409) y su filete tiene un rendimiento de 48%. Por ende, la demanda de este organismo es elevada y le brinda un alto valor económico (7.76-12 US\$/kg) (Espinoza *et al.*, 2009).

Por otro lado, la actividad acuícola representa una preocupación constante por la generación de aguas residuales cargadas de nutrientes que puede afectar el ambiente. El nitrógeno y fósforo son los principales productos de desecho generados por la cría de peces. Existen cuatro fuentes principales de desechos nitrogenados: urea, ácido úrico, restos orgánicos de organismos muertos y aminoácidos excretados por los peces (Ebeling, 2006). Esta última, es la fuente más significativa, debido a que los peces de cultivo incluyendo *S. rivoliana* aprovechan solo entre el 30 y 20 % del nitrógeno total ingerido en el alimento (Porter *et al.*, 1987; Handy y Poxton, 1993; Krohnert, 2006). Con respecto al fósforo ingerido mediante la dieta, los peces cosechados logran incorporar tan solo el 23 % del fósforo, el resto es desechado en forma disuelta (11 %) y sólida (66 %) (Folke y Kaustky. 1992). La descomposición de estos compuestos es de suma importancia en sistemas acuícolas de recirculación (SAR) por la toxicidad del

amonio, nitrito y hasta cierto punto, el nitrato. Comúnmente, el proceso de eliminación de amonio (nitrificación), se lleva a cabo por un filtro biológico (que contiene bacterias marinas oxidadoras de amonio, bacterias nitrificantes y heterótrofas) que consiste en la oxidación sucesiva de amonio a nitrito y finalmente a nitrato (Fernandez-Polanco *et al.*, 2000; Ebeling, 2006). Sin embargo, el filtro microbiológico no remueve el nitrato, y tampoco el fósforo.

Lo anterior, representa un problema económico para el productor y nuestro país (FAO, 2016) ya que el 60% de los gastos de producción provienen del alimento balanceado de los organismos. Aunado a esto, las industrias acuícolas en México no poseen sistemas capaces de aprovechar los nutrientes de los efluentes del cultivo. En consecuencia, las aguas ricas en materia orgánica son vertidos directamente a las zonas costeras (Plascencia *et al.*, 2012; Salas *et al.*, 2016).

Esto nos obliga a repensar el manejo de los residuos con una visión sostenible, mediante la creación de sistemas que nos permitan recuperar los nutrientes de los efluentes generados por el cultivo de peces (Carpenter y Bennett, 2011). De esta necesidad surgen los sistemas acuícolas de recirculación y la acuicultura multitrófica integrada (ITMA, por sus siglas en inglés), que consisten en la integración de especies de diferente nivel trófico en un sistema acuícola que permite mejorar la utilización de nutrientes, donde los nutrientes no utilizados o desechados por el cultivo de organismos de nivel superior, son aprovechados por otros organismos de nivel inferior que sean de interés comercial y ofrezcan un subproducto a la acuicultura, manteniendo la calidad del agua (Neori *et al.*, 2004; González-Henríquez *et al.*, 2015).

La lechuga de mar (*Ulva lactuca*) se ha propuesto como el candidato ideal para la biofiltración, debido a que posee una alta capacidad de absorción de nutrientes disueltos en el agua. Particularmente, fósforo y nitrógeno inorgánico con una eficiencia arriba del 95% (Msuya y Neori, 2002; Naldi y wheeler, 2002; Nielsen *et*

al., 2012), capacidad que le confiere un rápido crecimiento (Magnusson *et al.*, 1996; Naldi y Wheeler, 2002; Msuya y Neori, 2002). Además, esta especie tiene potencial para su comercialización, porque representa una fuente importante de proteína y fibras dietéticas, principalmente solubles (Herrero y Ibáñez, 2016). Inclusive, *U. lactuca* ha sido utilizada en la nutrición de cultivos acuícolas como bivalvos, crustáceos y holoturoideos; también se está trabajando para sustituir la harina de pescado para alimento de peces marinos (Naidoo *et al.*, 2006; Robertson Anderson *et al.*, 2009; Marinho *et al.*, 2013) y camarón (Elizondo-González *et al.*, 2018). Por tanto, la presente investigación tiene como objeto diseñar un sistema de recirculación mediante la integración del cultivo de jurel *Seriola rivoliana* y la macroalga *Ulva lactuca* para aprovechar los nutrientes de los efluentes provenientes del cultivo y mantener la calidad de agua.

2. ANTECEDENTES

2.1. Panorama acuícola mundial

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2016) elaboró un análisis sobre el estado de la acuicultura y pesca a nivel mundial. En el cual se reporta que, ante la estabilidad de la producción de la pesca de captura desde finales de la década de 1980, la acuicultura ha suministrado alimentos de origen acuícola para el consumo humano (figura. 1). Si bien la acuicultura proporcionó el 39% del pescado para el consumo humano en el 2004, así mismo, se hace mención que la acuicultura ha aumentado a un ritmo anual medio del 3.2 % en el periodo 1961-2013 posicionándola como una de las industrias de producción de alimento con más rápido crecimiento.

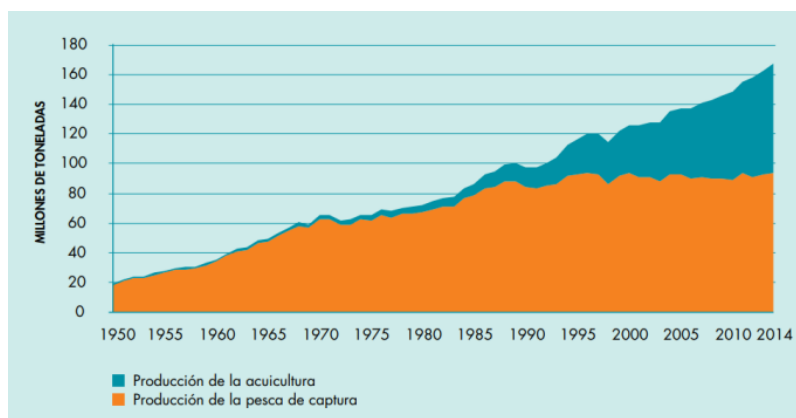


Figura 1. Producción mundial de la pesca por captura y acuicultura en millones de toneladas. Modificado de (FAO, 2016).

De esta manera, en México, la acuicultura participó en la producción pesquera nacional con poco más de 15.83 % de la producción nacional y se reportó que en los últimos 20 años esta actividad ha tenido un crecimiento del 3.44 % (SAGARPA, 2011). Por lo mencionado anteriormente, la acuicultura se ha convertido en una de las principales industrias de muchos países costeros de la franja tropical y subtropical, destinándose la mayor parte de su producción a la

exportación. En nuestro país, la acuicultura es una actividad que representa una alternativa real para ampliar la oferta alimentaria, generación de divisas y crear fuentes permanentes de empleo, estimulando el desarrollo regional (FAO, 2016).

2.2. Diversificación de la piscicultura en México

En México la piscicultura inicia a fines del siglo XIX, cuando se formó un proyecto para el cultivo de trucha arcoíris en el estado de México en el año 1883. Se le dio el nombre de Vivero Nacional Chimalapan, que se inició con un lote de 500 000 huevos importados de Estados Unidos (Arredondo y Lozano, 1996).

En ese entonces, el desarrollo de la Piscicultura en nuestro país estaba concentrado en el cultivo de pocas especies dulce acuícolas. No fue hasta finales de la década de los 80, cuando la acuicultura mexicana (centros de investigación y algunas empresas privadas del sector) desarrolló diferentes investigaciones con nuevas especies marinas potencialmente cultivables (Avilés, 2000). Iniciando con la engorda del pámpano (*Trachinotus paitiensis*) en jaulas flotantes en Baja California Sur, detonando así la producción de varias especies marinas como es el caso de la totoaba, *Totoaba macdonaldi* (True, 2012), el huachinango, *Lutjanus peru* (Cabrera-Mancilla *et al.*, 2015), el medregal o pez fuerte, *Seriola rivoliana* (Burgoin-Cota, 2015). Se continúan las investigaciones para el cultivo de otras especies, que son buenos candidatos para su producción (Avilés 2000). Por ejemplo, el robalo, *Centropomus sp.* (INAPESCA, 2018); el lenguado, *Paralichthys californicus* (Fuentes-Quesada y Lazo, 2018), el jurel de castilla, *Seriola lalandi* (Martínez, 2016), la cabrilla, *Paralabrax maculatofasciatus* (Anguas-Velez *et al.*, 2003) por mencionar algunas.

Para la elección de las especies potencialmente cultivables se tomó como criterio inicial que tuvieran un alto valor económico en el mercado y además que

poseyeran características biológicas adecuadas, que permitan el desarrollo en todas las etapas del cultivo. Con el objetivo de inducirlos a la reproducción en cautiverio y así obtener un suministro constante de alevines que permita tener una producción estable con métodos estandarizados (Abellán y Basurco ,1999).

Abellán y Basurco (1999) resaltan que la selección de nuevas especies cultivables es responsabilidad de instituciones públicas con base a estudios experimentales de un lote proveniente del medio natural, adaptación a cautiverio, y el ciclo de vida. Con la finalidad de tener un enfoque ambientalista. Es decir, minimizar los efectos ambientales adversos que son ocasionados por la producción acuícola y proteger a la biodiversidad de los ecosistemas marinos y costeros. Por esta razón es de gran importancia que las especies seleccionadas sean especies endémicas, evitando la introducción de especies exóticas que muy probablemente causarían un desequilibrio en la red trófica y pueden introducir enfermedades.

Cabe destacar que, para fortalecer la piscicultura en México, se requiere promover la diversificación de las líneas de producción y tecnificación de la misma, orientándola a incrementar su eficiencia productiva y como anteriormente se mencionaba, reducir los posibles impactos.

Con este orden de ideas, el cultivo del género *Seriola* comenzó como actividad artesanal en Japón en 1927 y se ha tecnificado progresivamente con el paso de los años. En México, el cultivo de este género es relativamente nuevo, con poco menos de una década de experiencia. La secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2011) reporta cinco concesiones de acuicultura comercial en la península de Baja California, una en Baja California y cuatro en Baja California Sur. Sin duda estas especies son candidatos emergentes para la diversificación del cultivo de peces marinos en México.

2.3. Biología del jurel *Seriola rivoliana* y su situación actual en México.

Dentro del género *Seriola* existen 47 especies (FAO, 2016), de las cuales las más producidas y capturadas a nivel mundial son *Seriola quinqueradiata*, *Seriola dumerili*, *Seriola lalandi* y recientemente *Seriola rivoliana*. Cabe mencionar que la mayor parte de las especies de carángidos son gregarias y forman cardúmenes. Algunas se concentran a lo largo de las plataformas continentales y son comunes en ambientes de agua salobre (Smith, 1990). Los carángidos, se distribuyen en todos los mares templados y tropicales, representan una de las familias de peces de mayor importancia comercial, y la mayoría de sus especies se utilizan para su consumo en fresco (sashimi, sushi). No obstante, el género *Seriola* aún no figura como pieza fundamental en las actividades acuícolas de México, solo en algunas regiones a nivel mundial se mantienen granjas para engorda, producción y captura de semilla; como E. U. A. y Japón por mencionar algunos países (Nakada, 2008). En México, el jurel se captura en varios estados, en Baja California Sur, en temporadas de pesca se capturaron 16.525 toneladas para consumo humano directo, que generaron \$137.069.962 MXN (CONAPESCA, 2013). Actualmente, se han consolidado dos empresas acuícolas (Rancheros del Mar y Cabo Kampachi) para la producción de *Seriola rivoliana* en Baja California Sur. Son empresas que están en crecimiento por lo que su producción aún no es estable y no es posible estimar su producción actual.

La especie *Seriola rivoliana*, también llamada medregal, kampachi, long-fin o amberjack, es un pez marino-oceánico de gran fuerza y nado veloz, que tiende a ser migratorio. Como características externas, presenta un cuerpo comprimido lateralmente, de forma fusiforme (Figura 2). El jurel presenta tres espinas anales. La aleta caudal es ampliamente bifurcada, con pedúnculo caudal delgado y con dos aletas pélvicas. El color de *Seriola rivoliana* es marrón–violáceo, en el dorso con lados y vientre plateado y una línea negra entre la nuca y el dorso (Nelson, 1984).



Figura 2. Fotografía de un ejemplar adulto de *Seriola rivoliana*, su cuerpo presenta una forma alargada, fusiforme, la forma del hocico es redonda, el dorso es de color aceitunado, el vientre presenta un color blanquecino-plateado y la línea lateral bien marcada, entre otras características morfológicas externas que se pueden observar en la fotografía.

2.4. Clasificación taxonómica de jurel *Seriola rivoliana*

Reino: animalia; Phylum: chordata; Subphylum: Vertebrata; Clase: Actinopterygii; Orden: Perciformes; Familia: Carangidae; Género: *Seriola*; Especie: *revoliana*. (Nelson, 1984).

2.5. Reproducción del jurel *Seriola rivoliana*

Su reproducción en cautiverio inicia con un cortejo de parte de los machos a las hembras, donde las hembras nadan en círculo y los machos nadan tras ellas dándoles ligeros golpes en los laterales. Finalmente, las hembras expulsan los ovocitos y estos son fertilizados por los machos (fertilización externa). Los huevos son pelágicos, de forma esférica, con gota de aceite, sin coloración y forman parte del plancton. Su gestación dura alrededor de 25 horas (Roo *et al.*, 2012) y luego

se abren para que salgan las larvas, las cuales antes de llegar a ser peces adultos atraviesan varios estados postlarvarios y juveniles. En cautiverio, la reproducción está semicontrolada mediante fotoperiodo (12 a 14 horas luz) y temperatura (25 °C). Al tratarse de una especie muy activa sexualmente, no se requiere de suministros de hormona. Sin embargo, existen investigaciones de inducción hormonal (Roo *et al.*, 2009).

2.6. Distribución y hábitat del jurel *Seriola rivoliana*

El jurel es una especie pelágica, demersal y epibentónico marino, es cosmopolita por lo que presenta un amplio rango de distribución en el globo, se distribuye en aguas tropicales, subtropicales y algunas templadas (Chirichigno y Martín, 2001). En el continente americano se distribuye desde Baja California hasta el norte de Perú. Se encuentra comúnmente en aguas abiertas con temperaturas entre 18 y 24 °C, a profundidades cercanas a 50 m. sin embargo, pueden ser encontrados en profundidades superiores a los 300 m (Froese-Pauly, 2019).

2.7. Requerimientos nutricionales del jurel *Seriola rivoliana*

Los peces del género *Seriola* son carnívoros oportunistas. Se les considera oportunistas debido a que su dieta varía en función a su tamaño, además de cazar cuando se presentan un comedero de varias especies. En el medio natural, Cuando tienen una talla de 1 cm su alimentación consiste principalmente en copépodos y a medida que crecen comienzan a alimentarse de moluscos, crustáceos, sardinas, macarelas, entre otros peces pequeños (Chele *et al.*, 2005).

En los cultivos acuícolas de *Seriola* spp., se ha logrado suministrar el alimento balanceado peletizado extruido, el cual ha dado buenos resultados para el cultivo de estas especies (Espinoza *et al.*, 2009). De hecho, la alta eficiencia del alimento

formulado se refleja en el factor de conversión, se reporta dos kilogramos de alimento por un kilogramo de biomasa (Mazzola *et al.*, 2000), lo cual es muy similar a lo reportado para *Seriola lalandi*, que el factor de conversión oscila de 0.9 a 2.6 con peletizado extruido. Sin embargo, el alimento que se suministra a especies del género *Seriola* está formulado para peces marinos en general. Por tanto, se han realizado investigaciones para establecer los requerimientos nutricionales.

En el caso de *Seriola lalandi* se ha investigado sobre la cantidad óptima de proteína y niveles de grasa (Jirsa *et al.*, 2011; Aguilera *et al.*, 2013 Jirsa *et al.* 2014), esta especie requiere un alimento formulado con 40 a 50% de proteína y un nivel de grasa inferior al 20 %. En cuanto a las cantidades óptimas de nitrógeno (Fernandez y Tanner, 2008) reportan que retiene del 14 a 16 % de nitrógeno suministrado en el alimento formulado. Lo anterior lo atribuyen a la rápida tasa metabólica que presenta el género *Seriola*, las cuales son muy similares a las tasas metabólicas de los túnidos y doblan el valor de otras especies.

Dentro del género *Seriola* una de las especies que más se ha estudiado es *Seriola dumerilii*. Esta especie demostró mayor incremento de biomasa (factor de conversión 2.7-3.3) y supervivencia con una dieta que incluye 50% de proteína y 14 % de grasa (García-Gómez, 2000) estos resultados coinciden con los requerimientos nutricionales de las demás especies del género. Por otra parte, la especie *Seriola rivoliana* es el candidato más reciente para la acuicultura, de ahí que existe muy poca información sobre su nutrición. No obstante, los requerimientos dietéticos para el crecimiento que fueron mencionados anteriormente, deberían ser comparables con lo reportado para otras especies del género.

2.8. Valor nutricional del jurel *Seriola rivoliana*

Dentro de las características que hacen que *Seriola rivoliana* sea una posibilidad real de diversificación es que es considerado un ejemplar de alto valor nutritivo (tabla 1), entre las características organolépticas referenciales del jurel, se encuentra una carne de excelente calidad, suave, compacta y de buen sabor, así como un alto rendimiento de filete del orden de 46-48 %. Otro factor importante son los altos precios que se pagan por este pez sobre todo en los mercados internacionales (6-12 dólares por kg dependiendo de la época); además, presenta un alto rango de crecimiento y supervivencia (Martínez, 2005).

Tabla 1. Análisis proximal de un ejemplar completo de *S. rivoliana* en peso seco, los datos en la tabla se encuentran en porcentajes.

Humedad:	74,6 - 76,3
Proteína:	21,4 - 22,5
Grasa:	1,2 - 1,6
Cenizas	3 - 0,409

Fuente: Manual de pesca Blanca (Martínez, 2005).

2.9. Infraestructura y parámetros de cultivo

Para desarrollar un cultivo de *Seriola rivoliana* es necesario asemejar las condiciones de cautiverio a las condiciones naturales en las que habita. Por lo tanto, se recomienda un rango de temperatura de 18 a 29 °C, ya que a temperaturas debajo de los 15 °C o superior a 31 °C esta especie se muere. Soportan salinidades altas (39 salinidad) y no resisten concentraciones menores (16 salinidad.) (Espinoza *et al.*, 2009).

El consumo de oxígeno en esta especie es sumamente alto alrededor de 500 mg de oxígeno por kg de peso corporal en una hora bajo condiciones normales. El agua marina contiene más de 5-6 mg/L de oxígeno disuelto. El nivel óptimo de oxígeno en estos peces debe ser mayor a 4 mg/L. de agua en el tanque (Espinoza *et al.*, 2009).

A nivel mundial, los sistemas de cultivo actuales para el cultivo de *Seriola spp.*, varían según las condiciones del área donde se pretende cultivar. Por lo anterior, se tomaron en cuenta distintos trabajos con especies del género de interés comercial. Así como *Seriola quinqueradiata* (Pacific yellow tail) cultivada en Japón, *Seriola dumerili* (greater amberjack) cultivada en Europa, *Seriola lalandi* (yellowtail amberjack, jurel de castilla) cultivada en Australia, Chile y México y *Seriola rivoliana* (pez fuerte o medregal) cultivada en España por mencionar algunos (Sicuro y Luzzana, 2016).

Generalmente, el proceso de cultivo se compone de dos fases. La primera fase se desarrolla en tierra (in-shore); incluye el mantenimiento de reproductores, larvicultura y preengorda. Se utilizan tanques de fibra de vidrio y su capacidad dependerá del número de reproductores que se manejen, o la cantidad de larvas que se pretenden sembrar. Por otro lado, la etapa de preengorda se puede llevar a cabo tanto en tanques de fibra de vidrio como también en estanque en tierra cubiertos de geomembrana (Espinoza *et al.*, 2009).

También se necesita un sistema de aireación que mantenga el nivel de oxígeno adecuado para la especie (4 mg/L), un sistema de bombeo que permita mantener un recambio de agua de 600 a 800 % y así mantener la calidad de agua. Por otra parte, también es posible usar sistemas acuícolas de recirculación como se pretende abordar en esta investigación, con el propósito de disminuir los recambios de agua y los costos de producción. Sin embargo, es importante

mencionar que las características de la infraestructura dependerán estrictamente del lugar que se ha elegido para desarrollar el cultivo (Espinoza *et al.*, 2009; Sicuro y Luzzana, 2016).

La etapa de engorda inicia en la segunda fase (off-shore), en condiciones de maricultivo. Una vez los peces alcanzan 110-150 gr de peso, estos son trasladados a jaulas flotantes o sumergibles en mar abierto o en aguas profundas (la profundidad dependerá del tamaño de las jaulas) tomando en cuenta que la profundidad debe doblar la altura de la jaula (Halwart *et al.*, 2008). La tecnología para el cultivo de peces marinos se actualiza continuamente, lo que facilita el cultivo cada vez más. Por lo anterior, existe una amplia gama de materiales y formas para las jaulas. Actualmente, las jaulas más utilizadas son hechas de aleación de cobre, debido a que difícilmente se le adhieren organismos como parásitos, algas, etc. Lo que implica menos inversión en mantenimiento. Además, la jaula tiene forma cilíndrica, lo que permite que los peces aprovechen toda la columna de agua. Otro de los beneficios es el mecanismo que permite sumergir la jaula para protección del cultivo ante fenómenos naturales o depredación y se puede llevar a la superficie para, alimentar, cosechar o darle mantenimiento a la jaula (Halwart *et al.*, 2008).

2.10. Excreción de amonio y fósforo en peces de cultivo

Del 1 al 30 % del alimento balanceado que es suministrado a los cultivos no es ingerido, por sobrealimentación, por diseño del sistema o mala gestión. Del alimento que, si es consumido, la fracción no digerida es eliminada por los animales acuáticos en forma de heces sólidas, mientras que aquellos nutrientes absorbidos en exceso son excretados junto a los productos finales del catabolismo de las proteínas en forma de amonio y disueltos a través de las branquias y ureas, principalmente por difusión pasiva (Krohnert, 2006).

El amonio es el mayor producto final del catabolismo de nitrógeno en peces marinos incluyendo los teleósteos como resultado de la degradación de las proteínas y ácido nucleicos o dietéticos que llevan la formación y excreción de diferentes compuestos nitrogenados. Representa aproximadamente del 70 al 95 % del nitrógeno total excretado, mientras que la excreción de nitrógeno en forma de urea es relativamente bajo (10–15 %) (Handy y Poxton, 1993; Krohnert, 2006).

En términos generales, la cantidad de nutrientes desechados por los peces dependerá en la calidad del pienso, alrededor de $\frac{1}{4}$ de los nutrientes aportados a través de la alimentación, son incorporados al peso corporal del pez, mientras que $\frac{3}{4}$ partes serán vertidas de una u otra manera al ambiente (figura 4) (Folke y Kaustsky, 1992; Krohnert, 2006).

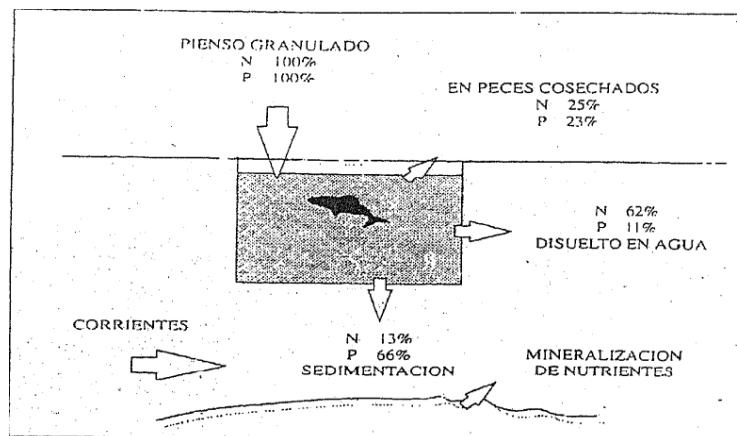


Figura 3. Esquema de excreción de nitrógeno y fósforo liberados al ambiente acuático, modificado de Folke y Kaustsky (1992).

Como se mencionó anteriormente, el amonio se forma principalmente del catabolismo de aminoácidos. La mayoría del NH_4 se produce en el hígado. Tres principales procesos están envueltos en la formación del amonio en teleósteos: desaminación directa, trans-desaminación de aminoácidos y ciclo de nucleótidos de purina. La desaminación directa se limita a algunos aminoácidos. El proceso de trans-desaminación involucra un traslado del grupo amino a un aceptor ceto-ácido con la formación de un ceto-ácido y ácido glutámico que son oxidativamente

desaminados por glutamato deshidrogenasa (GDH) para formar amonio, este proceso es generalmente reconocido como el más importante en la amoniogénesis en teleósteos (trans-desaminación) (Van Waarde, 1983; Batrel y Regnault, 1987; Cowey y Walton, 1989). En teleósteos, se forma también amonio en músculo esquelético por el ciclo de nucleótidos de purina, la importancia es relativa debido a que puede ser modificado por los niveles de oxígeno ambiental.

Otro proceso importante para la excreción de amonio es la ureagénesis aunque la excreción de urea es pequeña. También se conocen tres vías diferentes para la formación de urea: ciclo ornitina-urea, catabolismo de arginina y degradación de nucleótidos de purina (NRC, 1993). En teleóstos, el rompimiento de nucleótidos de purina ha sido propuesto como la principal fuente de urea (Vellas y Sertafy, 1974)

La mayor parte del amonio producido por los peces se excreta a través del epitelio branquial, utilizando alguno de los tres posibles procesos: difusión pasiva de iones NH_4^+ contra un gradiente de concentración, mecanismos de intercambio que involucran captación de Na^+ y eliminación de NH_4^+ , y la difusión pasiva de NH_3 . El transporte activo de cationes y aniones. Mecanismos específicos de intercambio, situados sobre el borde apical y/o basal de las membranas del epitelio branquial, uniendo Na^+ y Cl^- externos con la excreción de cationes (NH_4^+) y aniones (HCO_3^-) (Maetz, 1972; Kaushik, 2000). Falta por documentarse la importancia cuantitativa de tales mecanismos de intercambio de eliminación del amonio formado. Actualmente, se reconoce que la difusión pasiva de NH_3 por las branquias es cuantitativamente la ruta más importante de eliminación en teleósteos. La excreción de urea también es continua y parece ocurrir principalmente a través de las branquias y secundariamente a través de la orina (Kaushik *et al.*, 1982)

Con respecto al fósforo, varios autores han reportado que se trata de un componente esencial del sistema óseo en los peces teleósteos. Además, este nutriente participa en los procesos de transformación de energía y el metabolismo

celular, incluyendo la síntesis de ácidos nucleicos, fosfolípidos entre otras biomoléculas (Rueda-Uribe *et al.*, 2012; Ramos-Páez y Vasquéz-Torres, 2012). La principal fuente de fósforo para los peces de cultivo es el alimento balanceado, sobre todo si los ingredientes son de origen animal donde se pueden encontrar proporciones del 4 a 5 % de la materia seca. Sin embargo, la proporción varía de acuerdo a la especie ya que el factor que define el requerimiento del fósforo es la digestibilidad (Cho y Bureau, 2001).

Por esta razón, los piensos utilizados en la piscicultura incluyen niveles altos de fósforo con el propósito de satisfacer las necesidades de cada especie. No obstante, al superar los requerimientos de los peces, el fósforo no puede ser acumulado en el organismo y consecuencia son devueltos al sistema como productos de excreción, mediante las heces (Rueda-Uribe *et al.*, 2012). Del total de fósforo ingerido mediante la dieta, los peces cosechados logran incorporar tan solo el 23 % del fósforo, el resto es desechado en forma disuelta (11 %) y sólida (66 %) (Figura 3) (Folke y Kaustky. 1992).

2.11. El amonio y fósforo como factor limitante de la acuicultura

La piscicultura, como todo cultivo animal puede provocar la degradación de los ecosistemas (Espinosa y Bermúdez, 2012) mayoritariamente por la excreción de los peces y alimento no ingerido. En los últimos años se han publicado artículos que abarcan temas como el impacto de cultivo de peces en la química de la columna de agua (Hernández, 2017), efectos en los nutrientes y plancton (Krohnert, 2006), acumulación de materia orgánica en los sedimentos debajo de las jaulas de granjas de peces (Doglioli *et al.*, 2004; Fernandes y Tanner, 2008; Hernández, 2017) y los efectos adversos en los organismos bentónicos (Borja, 2002; Krohnert, 2006). Por esta razón, los impactos en el ambiente por causa de actividades acuícolas han recibido mucha atención por la comunidad científica en

los últimos años, ya que la industria continúa en crecimiento y los efectos adversos son cada vez más notorios.

Previamente se hizo mención de las fases y tecnologías de cultivo para especies de interés comercial del género *Seriola*. En ambas fases se vierten efluentes cargados de nutrientes (fósforo y nitrógeno) a los cuerpos de agua adyacentes a los sistemas. Contribuyendo a la degradación de los ecosistemas costeros. Sin embargo, en la fase de engorda (Doglioli *et al.*, 2004; Fernandes y Tanner, 2008; Hernandez, 2017) se aumenta la ración y las tasas de alimentación para conseguir el aumento de biomasa en el menor tiempo posible. Por esta razón, la etapa de engorde tiene un impacto más significativo (Krohnert, 2006).

No se cuenta con la información de la excreción de amonio y fósforo de *Seriola rivoliana*. No obstante, es relevante mencionar que se ha estudiado la excreción total de amonio en distintas especies de peces marinos como por ejemplo la especie *Pagrus pagrus*, se reporta (García, 2002) que su excreción oscila entre 240 a 270 mg por kilogramo de pez y por gramo de alimento ingerido. También se ha descrito que en *S. lalandi*; su excreción va de 0.43 a 0.58 mg/L (Fernandes y Tanner, 2008; Armuelles, 2016) pero es importante mencionar que los análisis se realizaron cuando los tanques presentaban un recambio del 300 % lo que pudo diluir la cantidad de amonio, inclusive expulsar del sistema una cantidad significativa. Este último dato debería ser muy similar al de *S. rivoliana* ya que son especies del mismo género y presentan un metabolismo similar.

Por otra parte, Kaushik (2000) reporta que la producción de amonio puede ser afectada por múltiples factores. Como el ambiente físico-químico (salinidad, temperatura, pH, amonio ambiental y niveles de oxígeno disuelto), factores bióticos (peso del cuerpo, fases fisiológicas, factores de estrés) y cambios

inducidos por la dieta (disponibilidad de comida o ayuno, suministro cuantitativo de proteína, calidad de la proteína del alimento y equilibrio de aminoácidos).

Se conoce bien, que el amonio afecta a los peces de cultivo cuando se presenta en concentraciones altas (1 mg/L) debido a que puede provocar estrés, un crecimiento reducido, daño a las branquias y tejidos epidérmicos, y por consecuencia mayor susceptibilidad a patógenos (Krohenert, 2006). Sin embargo, se conoce poco sobre los efectos negativos directos del fosfato en los organismos acuáticos incluyendo los peces, aunque es muy conocido el papel que éste ejerce en la eutrofización (Rueda-Jasso *et al.*, 2013)

Aunado a lo anterior, las industrias acuícolas no cuentan con un sistema capaz de brindar un tratamiento de aguas residuales, en consecuencia, son vertidas directamente a las zonas costeras. Los impactos ambientales generados por esta mala práctica cubren varias escalas espaciales y temporales, Silvert (1992) clasificó a dichos impactos como internos (efectos particulares de la granja en sí misma y su ambiente inmediato), local (los impactos que afectan las granjas cercanas y las poblaciones salvajes dentro del orden de un kilómetro) y regional (impactos involucrados en escalas espaciales de muchos kilómetros y escalas temporales que van de un solo ciclo de marea a una estación completa).

La mayoría de estos estudios indicaron que los efectos visibles de la acuicultura en el ambiente de los bentos son encontrados dentro de una distancia corta, normalmente no excede los 25 a 30 m del borde de las jaulas de peces. Se conoce bien que las granjas descargan una cantidad sustancial de nutrientes en el ambiente marino, por lo consiguiente sería razonable esperar efectos a escalas espaciales más grandes, particularmente cuando un grupo de granjas se establece en una bahía costera (Pohle *et al.*, 2001). De esta manera, el exceso de materia orgánica tanto particulada como la disuelta favorece a que las condiciones

ambientales sean propicias para el crecimiento y desarrollo de organismos fitoplanctónicos como algas y cianobacterias. Por ende, su desarrollo en masa (eutrofización) puede presentarse en las costas, lagos, estuarios, etc (Cirerol, 2004; Buschmann y Fortt, 2005) que al morir es degradado por bacterias heterótrofas que, en el proceso, consumen oxígeno reduciendo su nivel en el agua. Esto produce malos olores y la muerte de especies acuáticas que necesitan aguas bien oxigenadas. De hecho, se han reportado cambios en las comunidades bentónicas y señales de estrés para la macro fauna de los bentos a distancias de 200 m a la redonda de cualquier granja de cultivo en esa área, lo que desequilibra al estado oligotrófico del ambiente (Pohle *et al.*, 2001; Espinosa y Bermúdez, 2012).

2.12. Algas marinas, componentes biológicos clave para una economía azul.

El crecimiento acelerado de la acuicultura representa un reto en México, sobre todo por los posibles impactos al ambiente. Los impactos adversos pueden ser mayores y de carácter irreversibles, comprometiendo así, nuestro bienestar y la de generaciones futuras. Por tanto, es de vital importancia repensar el manejo de los residuos con una visión sostenible, entendido como el crecimiento ordenado de las actividades humanas, con mínimo impacto sobre los sistemas naturales, que permite el mantenimiento de sus funciones vitales, evite la extinción de especies y prolongue el uso de los recursos y servicios que se desprenden de su utilización (Espinosa y Bermudez, 2012).

Bajo esta premisa se plantea que el uso de las aguas residuales provenientes de la acuicultura se utilice para el cultivo de algas marinas. Dicha propuesta se convierte en una de las soluciones más prometedoras para reducir los impactos

negativos de esta actividad, así como una forma de obtener biomasa de algas para diferentes usos (Balina *et al.*, 2017).

2.13. Acuicultura multitrófica integrada

De esta necesidad surgen los IMTA que basan el cultivo, en un mismo sistema, de organismos de distintos niveles tróficos (peces, crustáceos, moluscos, algas), donde la excreción de los organismos de nivel superior se convierte en un recurso utilizado por los niveles inferiores (Neori *et al.*, 2004). En un sistema IMTA, la mitigación del impacto de estas excreciones se realiza de forma primordial por el nivel trófico más bajo, principalmente algas, debido a su capacidad de biofiltración que mejora la calidad del agua al absorber los nutrientes disueltos. Esto reduce el costo de producción y se crea un cultivo ecológico y sostenible. Además, los subproductos tienen valor económico (Carpenter y Bennett, 2001; Cubillo *et al.*, 2016).

La organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, 2016) estima que este sector presenta uno de los crecimientos más rápidos en cuanto a la producción de alimentos. En 2012 se produjeron casi 23.8 millones de toneladas de algas a nivel mundial con un incremento de producción del 116% respecto a los 9.3 millones de toneladas producidas diez años antes. Esta industria tiene un valor anual de 5.5 millones de dólares, de los cuales el 83.33 % proviene de productos para la alimentación humana. Parte de este rápido crecimiento se debe a que las macroalgas, en particular, son un componente importante de biofiltración en industrias acuícolas, ya que estas son excelentes captadores de nutrientes disueltos en el agua, en especial de nitrógeno y fósforo (Cohen y Neori, 1991; Ben-Ari *et al.*, 2014).

El principal uso de las macroalgas es el aprovechamiento de su capacidad para fijar y acumular tanto nutrientes y contaminantes como metales pesados. Esto hace que tengan un papel importante como biofiltros para aguas residuales de industrias acuícolas o inclusive otras industrias como la agrícola (Neori *et al.*, 2007; Ben-Ari *et al.*, 2014). Por esta misma razón, las macroalgas son de gran utilidad para evitar la eutrofización en ecosistemas costeros (Neori *et al.*, 2007; Espinosa y Bermúdez, 2012).

A medida que la popularidad de las algas marinas aumenta y el uso de especies menos tradicionales con aplicaciones novedosas se hace evidente, es de vital importancia asegurar la sostenibilidad del recurso. De este modo, los sistemas IMTA se proponen como un método ventajoso para lograrlo. Integrando el concepto de acuicultura ecológica, el uso de tecnologías verdes, y el concepto de biofiltración para obtener biomasa útil de algas, estaríamos dando pasos correctos para encaminarnos hacia una economía azul.

2.14. Biología del género *Ulva*

Como se ha descrito anteriormente, las macroalgas son una alternativa prometedora para la biofiltración de los efluentes provenientes de cultivos acuícolas en tierra (in-shore) y en condiciones de maricultivo (off-shore) (Neori *et al.*, 2003). En numerosos estudios las macroalgas, particularmente *Ulva lactuca* y otras especies del género, presentaron una alta capacidad de asimilación de nutrientes, empero, un rápido crecimiento. También demostraron ser resistentes al manejo y a la cosecha. Además, son un subproducto del cultivo con valor económico (Cohen y Neori, 1991; Neori *et al.*, 2003; Neori *et al.*, 2007; Ben-Ari *et al.*, 2014;)

El género *Ulva* incluye macroalgas clorofitas que pueden ser diferenciadas por su color verde, la gran mayoría son laminares. Presentan una amplia distribución que abarca aguas tropicales y subtropicales alrededor del planeta, siendo la zona del sudeste asiático donde tiene mayor proliferación. Presentan una gran plasticidad fenotípica y esto depende de muchos factores como la salinidad, corrientes de agua o la presencia de nutrientes. Estas macroalgas pueden vivir ancladas al sustrato o flotando libremente (Hayden *et al.*, 2003).

La especie *Ulva lactuca* habita en la zona intermareal y submareal, del nivel de marea hasta los 20 m de profundidad. Se puede observar con facilidad en aguas estancadas cerca de la costa y adheridas en rocas y otros sustratos rígidos (Villalobos-Medina, 2012). Esta alga puede desarrollar un disco basal que lo utiliza para anclarse al sustrato, soporta largos periodos de desecación. Sin embargo, muestra sensibilidad a la radiación solar directa (Cohen y Neori, 1991; Hayden *et al.*, 2003), en cuanto a la morfología, se caracteriza por presentar ramificaciones laminares que se forman a partir de la división periclinal y anticlinal de las células (Figura 4), mide entre 30 cm y 1 m de largo, y de ancho llega a medir 40 cm.



Figura 4. Fotografía de *Ulva lactuca*, la macroalga se encuentra completa, cuenta con un disco basal, ramificaciones laminares. Presenta una coloración verde, característica de las algas clorofitas.

Clasificación taxonómica de *U. lactuca*

Reino: Plantae; Phylum: Chlorophyta; Clase: Ulvophyceae; Orden: Ulvales; Familia: Ulvaceae; Género: *Ulva*; Especie: *Ulva lactuca* (Guiry, 2012).

2.15. Reproducción de *U. lactuca*

Dentro del ciclo de vida de la *Ulva* existe una alternancia de dos generaciones, una que se produce sexualmente y otra asexualmente, aunque los miembros maduros llamados esporofitos y gametofitos son isomórficos, es decir, son indistinguibles a simple vista y se requiere observar mediante el microscopio sus estructuras reproductivas. La primera generación presenta dos juegos de cromosomas (diploide) y la segunda generación tiene un solo juego de cromosomas (haploide) llamado esporofito, el cual lleva a cabo la reproducción asexual; el esporofito forma células diminutas reproductoras que se convierten en organismos maduros llamados gametofitos. Estos gametofitos producen gametos que se fusionan para así producir un cigoto diploide ($2n$) que es un organismo con dos juegos de cromosomas y que se convertirá posteriormente, en un esporofito para así completar el ciclo vital de la *Ulva* (Figura 5) (Macaya, 2011).



Figura 5. Ciclo de vida de *Ulva sp.*, ejemplo de alternancia de generaciones isomórficas (Macaya, 2011).

Los investigadores pioneros del estudio de *Ulva lactuca* como alternativa para la biofiltración de efluentes de cultivos acuícolas, fueron Debusk y colaboradores (1986), Vandermuelen y Gordin (1990), Cohen y Neori (1991), entre otros. Estos científicos desarrollaron diversos experimentos donde cultivaron a *U. lactuca* con aguas residuales provenientes de distintos cultivos intensivos de peces. En primera instancia, los hallazgos científicos permitieron conocer a fondo la biología de la *Ulva*, como los requerimientos nutricionales, ciclo de vida, entre otros, pero más importante, descubrieron que esta especie tiene un mayor rendimiento y crecimiento siendo cultivada con aguas efluentes que con agua marina, debido a que los efluentes contienen altas concentraciones de nutrientes inorgánicos (fosforo, nitratos y nitritos) que son aprovechados por *U. lactuca*. Esto permite obtener una densidad de hasta 2 kg m^{-2} . De hecho, la biomasa producida de esta macroalga con efluentes de cultivos acuícolas contiene de dos a cuatro veces más proteína (hasta un 40% en peso seco) que una en el medio natural. Sin embargo, es relevante destacar que la cantidad óptima en un cultivo de *U. lactuca* es de 1 kg m^{-2} de biomasa, ya que al superar esta cantidad el rendimiento y crecimiento de *U. lactuca* se ve afectado.

Cohen y Neori (1991) reportan haber cultivado 1 kilogramo de *U. lactuca* (biomasa húmeda) en estanques de 1 m^2 y 10 cm de profundidad (600 L). Ellos Experimentaron con distintas tasas de recambio de agua y bombearon pulsos de efluentes con distintas cantidades de amonio, donde obtuvieron que la mayor eficiencia de remoción por el alga fue de 96% con un recambio mínimo de agua (40%). En contraste, la eficiencia de remoción disminuyó hasta el 39% con la mayor tasa de recambio (120%). Es decir, si hay un mayor recambio de agua, los nutrientes se diluyen o también pueden ser expulsados del sistema y es más difícil para el alga estar en contacto con estos y, por ende, asimilarlos.

También cultivaron el alga a distintas densidades (1, 2, 4 y 6 kg por m²) donde obtuvieron que la eficiencia de remoción no variara de acuerdo a dichas densidades. Sin embargo, el porcentaje de N en el tejido de la macroalga fue mayor en la densidad de 1 kg. Finalmente, concluyen que la macroalga *Ulva lactuca* fue eficiente removiendo casi total de nitrógeno (10 mmoles L/h o 0.14 moles/ m²/día). Mientras que la tasa de remoción incrementó a mayor concentración de nitrógeno (28 mmoles/L/h o 0.4 moles/m²/día) y calculan que 10 m² de alga puede asimilar todo el amonio generado por 1 kg de alimento dado a 75 kg de pez.

En el mismo año, estos autores (Cohen y Neori, 1991) hacen público que en uno de sus experimentos en el cual cultivan a *Ulva lactuca* con efluentes de peces tuvo una mayor tasa de crecimiento específico (18% /d) y eficiencia de remoción (96 %) que cultivada con pulsos de agua nueva y una fertilización asistida. Ambos índices mostraron una correlación positiva con la concentración de nitrógeno.

Dos años después Hirata y Kohirata (1993) realizaron un cultivo de *Ulva sp.* en condiciones de maricultura, utilizando jaulas de cangrejo acondicionadas para su cultivo. Dichas jaulas se mantuvieron a una profundidad de 60 cm, justo al lado del cultivo de *Seriola lalandi* (yellow tail). Los autores reportan una tasa de crecimiento promedio de 21.7%. Sin embargo, se obtuvo un mayor incremento de biomasa (23-30 %) cuando las temperaturas del agua eran altas (25 – 28 °C), mientras que en temperaturas menores (13 – 15 °C) mostró un incremento mucho menor (6 – 21%).

2.16. Productos derivados de *U. lactuca*

Las macroalgas contienen metabolitos muy valiosos como pigmentos, proteínas y polisacáridos únicos, entre otros; por ello, en el pasado se recolectaron de las

costas de todo el mundo para usos tradicionales, como alimentos, piensos y fertilizantes. Hoy en día, aproximadamente el 90 % de las algas marinas usadas provienen de cultivo, con una producción de 26 millones de toneladas anuales valoradas en 7,3 millones de dólares. Son muy versátiles por lo que se utilizan en diversas actividades industriales como fuente de hidrocoloides (agar, carragenina y alginato), cosméticos, fármacos, complementos alimenticios, También se ha estudiado el potencial de las algas en el desarrollo de biocombustibles, convirtiéndolas en candidatas de producción de biogás como fuente renovable (Bansemir *et al.*, 2006; Abdel *et al.*, 2016; Peñuela *et al.*, 2018)

Así mismo, la capacidad de asimilación de los nutrientes inorgánicos como fosforo y nitrógeno dan lugar a una elevada proporción de proteína en las macroalgas, permite utilizarlas en la fabricación de diversos productos (Peña Rodríguez *et al.*, 2011). Como se comentó, la mayor parte de la producción de algas es empleado para consumo humano (FAO, 2016; Gutiérrez-Cuesta *et al.*, 2017) dentro de esta industria destacan diferentes antioxidantes, vitaminas, proteínas, ácidos grasos y polisacáridos (Ordóñez, 2012; Gutierrez-Cuesta *et al.*, 2017). Cabe destacar la presencia de un polisacárido con múltiples usos presente sobre todo en el género *Ulva*, al que se conoce como ulvan. Este polisacárido presenta muchas aplicaciones en diferentes industrias como la producción de anticoagulantes, antioxidantes, inmunomoduladores, antihipercolesterorémicos, antihiperlipidémicos, antivirales, antitumorales. Además, se utiliza en la fabricación de biomateriales como nanofibras, macropartículas, medios de cultivo celular e hidrogeles, etc (FAO, 2016; Gutierrez-Cuesta *et al.*, 2017).

3. JUSTIFICACIÓN

La incorporación de la macroalga *Ulva lactuca* como biofiltro en un sistema de cultivo de jurel *S. rivoliana* no se ha llevado a cabo con anterioridad, lo que, en primera instancia, esta investigación aportará al conocimiento científico y al ser algo innovador requiere del desarrollo de nuevas estrategias tecnológicas para encontrar el mejor diseño de integración.

Por otra parte, favorecerá al ambiente ya que la integración de estas dos especies permitirá la reutilización de aguas residuales y minimizará los efectos del exceso de nutrientes inorgánicos en zonas costeras. Este desarrollo es fundamental para la acuicultura, que tiende a ser cada vez más sostenible.

Adicionalmente, el aprovechamiento de las aguas residuales funcionará como una medida de bioseguridad en los sistemas acuícolas ya que disminuirá las necesidades de recambio de agua en el sistema, limitando así la entrada de agentes externos lo que se traduce en ahorro de dinero al no tener que invertir en la aplicación de tratamientos en el cultivo por enfermedades provenientes de agentes patógenos y disminuye los costos de bombeo. También, mediante la integración de nuevos organismos se pretende sentar precedentes e impulsar a la diversificación de cultivos y diferenciación de productos en granjas acuícolas en el país, contribuyendo a una mayor producción de alimentos de calidad nutricional, y a su vez generará posibilidades de empleo y nuevos negocios. Lo anterior, beneficiará al desarrollo social de la población al cubrir parte de la demanda alimenticia y diversificará la economía de la región.

4. HIPÓTESIS

La macroalga, *Ulva lactuca* posee una alta capacidad de absorción de nutrientes inorgánicos disueltos en el agua, por lo tanto, al integrarla en un sistema acuícola de recirculación con *S. rivoliana*, mejorará la calidad de agua y reducirá significativamente los niveles de nitrógeno y fósforo de los efluentes provenientes del cultivo y disminuirá las necesidades de recambio de agua.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

- Evaluar el uso de la macroalga *Ulva lactuca* en un cultivo integrado con jurel *Seriola rivoliana*.

5.2. Objetivos particulares

- Cuantificar la producción de amonio en un cultivo de *Seriola rivoliana*.
- Estimar la capacidad de fijación de fósforo y nitrógeno inorgánico de la macroalga *Ulva lactuca* en un sistema acuícola de recirculación integrado con *S. rivoliana*.
- Determinar los índices de rendimiento productivo de *Seriola rivoliana* y *Ulva lactuca* en un sistema acuícola de recirculación.
- Analizar la composición bioquímica de *Seriola rivoliana* y *Ulva lactuca*.

6. METODOLOGÍA

6.1. Obtención de Material Biológico

El material biológico (150 peces juveniles de *S. rivoliiana*) fue proporcionado por la empresa Cabo Kampachi que se encuentra ubicada en la Bahía de La Paz, del estado Baja California Sur, México. La fase de larvicultura de estos peces se llevó a cabo en el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional (CICIMAR, IPN), para posteriormente ser trasladados a las instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) donde se realizó la presente investigación.

El traslado de los 150 ejemplares de un peso promedio de 50 g se realizó mediante transporte terrestre, dentro de un tanque de 500 L. Durante el traslado, se realizaron mediciones de los niveles de oxígeno disuelto del agua con el propósito de mantener como mínimo 5 mg/L utilizando un difusor de oxígeno. También se verificó la temperatura, la cual se mantuvo a 28 °C.

Una vez en las instalaciones del CIBNOR, los peces fueron trasladados a un tanque de 7 m³ ubicado en el laboratorio de recepción y mantenimiento de peces marinos. El tanque fue acondicionado previamente con oxigenación utilizando piedras de aireación, y un recambio diario de 200 %. A los organismos se le proporcionó con alimento balanceado de la marca skretting (2 mm) (46 % proteína y 12 % lípidos). Estas condiciones se mantuvieron hasta el inicio de los bioensayos de integración.

La macroalga *Ulva lactuca*, se obtuvo de un sistema de cultivo en el CIBNOR (laboratorio húmedo de genómica) (Figura 6), la cual previamente fue aislada a partir de un gametofito colectado en la zona intermareal de la playa “El Comitán”

ubicada justo al frente de las instalaciones del CIBNOR. Se aseguró que las macroalgas recolectadas estuvieran completas, es decir, con la mayoría de las ramificaciones y el disco basal.



Figura 6. Fotografía del sistema de cultivo del laboratorio húmedo de genómica. Se observa el drenado del exceso de agua de la macroalga *U. lactuca* utilizando una red de captura, con la finalidad de pesarla y sembrarla en los biofiltros de los sistemas de experimentación.

Posteriormente, las macroalgas fueron aclimatadas con agua marina en tanques de 500 L y se suministró 100 ml diarios de un fertilizante compuesto por 12 g de fertilizante fosfonitrato (NH_4NO_3) y 8 g del fertilizante comercial Miracle-Gro (cada 100 g de fertilizante contiene 24 g de N, 8 g P, 0.15 g Fe, 0.05 g Mn, 0.02 g B, 0.06 g Zn, 0.07 g Cu y 0.0005 g Mo). De esta manera se aumentó la biomasa de la macroalga hasta 8 kg y se mantuvo para su utilización en los experimentos de integración. Omont y colaboradores (2018) realizaron el mantenimiento de la macroalga con un método muy similar, donde cultivan a *U. lactuca* en tanques de 750 L con aireador de 3 pulgadas y se fertilizó con medio f/2 y con una concentración de nitrógeno de 0.5 ppm.

Caracterización de los sistemas acuícolas

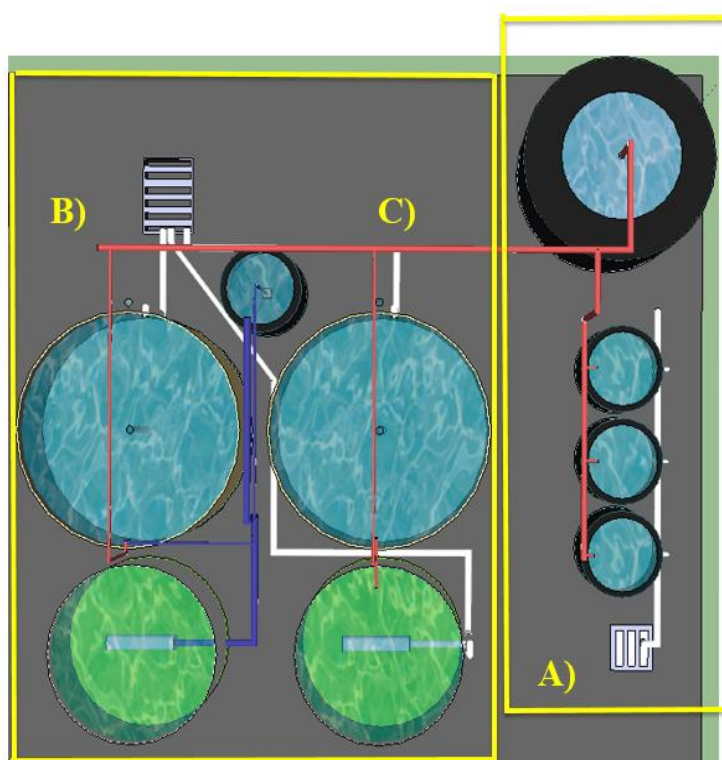


Figura 7. Diseño a escala de los sistemas acuícolas acondicionados para la integración de las especies *Seriola rivoliana* y *Ulva lactuca*. Grupo A) sistema abierto de flujo continuo conformado por tres tanques con capacidad de 438 L para el cultivo de *S. rivoliana*. Grupo B) sistema de recirculación conformado por un tanque principal con capacidad de 6000 L para el cultivo de *S. rivoliana* (RP: recirculación-peces), un sedimentador de 200 L y un biofiltro con capacidad de 3750 L conformado por la macroalga *U. lactuca* (RA: recirculación-algas). Grupo C) sistema abierto de flujo continuo que incluyó 2 tanques independientes, uno con capacidad de 6000 L para el cultivo de *S. rivoliana* (CP: control-peces) y un biofiltro de 3750 L conformado por *U. lactuca* (CA: control.algas) que fue fertilizado.

Para evaluar el uso de la macroalga *Ulva lactuca* en un cultivo integrado con *Seriola rivoliana*; se desarrolló la fase de experimentación en las instalaciones del CIBNOR durante el periodo febrero-abril 2019. Los sistemas acuícolas fueron acondicionados en el laboratorio de recepción y mantenimiento de peces marinos.

Los sistemas fueron diseñados mediante el software Sketchup Make, el cual es una herramienta de modelación a escala. Los sistemas fueron divididos en grupos como puede ser apreciado en el diseño (Figura 6): El grupo “A” consistió en un sistema cerrado conformado por tres tanques con capacidad de 500 L llenados a 438 L que fueron utilizados para el mantenimiento de *S. rivoliana* (Figura 8).



Figura 8. Fotografía de sistema acuícola cerrado acondicionado en el área de recepción de peces marinos. Se observan los tanques de cultivo de *S. rivoliana* con capacidad de 438 L utilizados para la determinación de la excreción de amonio.

El grupo “B” es un sistema de recirculación conformado por un tanque principal con capacidad de 7 mil L llenado a 6 mil L para el cultivo de *S. rivoliana*, seguido de un sedimentador de 500 L para capturar los sólidos que se encuentran suspendidos en la columna de agua, generados por el cultivo de peces. Finalmente, un biofiltro con capacidad de 5 mil L llenado a 3750 L conformado por la macroalga *U. lactuca* encargada de remover los nutrientes disueltos en el agua (Figura 9). Es de gran importancia destacar que este sistema solo tuvo el 30 % de recambio diario, cuando lo recomendado para el cultivo de *S. rivoliana* es del 200 % diario o superior.

El grupo “C” consistió en un sistema abierto de flujo continuo que incluyó 2 tanques independientes: uno con capacidad de 7 mil L llenado a 6 mil para el cultivo de peces y el tanque restante con capacidad de 5 mil L llenado a 3750 L donde se cultivó la macroalga mediante fertilización asistida. Cabe mencionar que es un sistema abierto convencional utilizado por las industrias, no presenta ningún tipo de tratamiento de efluentes y tuvieron un recambio del 300 %.



Figura 9. Fotografía de sistemas acuícolas del grupo B y C acondicionados en el área de recepción de peces marinos. En la izquierda, se encuentra uno de los biofiltros y a la derecha, los tanques de cultivo de *Seriola rivoliana*.

6.2. Condiciones de Cultivo

Para desarrollar un cultivo de *Seriola rivoliana* es necesario asemejar las condiciones de cautiverio lo más posible a las condiciones naturales en las que habita. Se mantuvo un rango de temperatura de 20 a 23 °C, ya que a temperaturas debajo de los 17 °C y superiores a 27 °C causan estrés a los peces y empieza a utilizar las reservas de energías para sobrevivir y no para crecer. Por otra parte, a una temperatura de 15 °C o superior a 31 °C esta especie puede llegar a estresarse y presentar mortalidad (Espinoza *et al.*, 2009).

No toleran salinidades por arriba de 40 y así como concentraciones menores de 12 ppt. Dicho parámetro se mantuvo estable, 37 ppt al iniciar el ciclo y a 38 ppt al finalizar el ciclo, esto por efecto de la evaporación de agua que permite que se acumule la sal en los sistemas de recirculación.

El consumo de oxígeno en esta especie es sumamente alto alrededor de 500 mg de oxígeno por kg de peso corporal en una hora, bajo condiciones normales. El agua marina a 35 salinidad y 25 ° C puede contener más de 5 a 6 ml/L de oxígeno disuelto. Por ende, los niveles de oxígeno siempre se mantuvieron a una concentración mayor a 4 mg/L de agua (Espinoza *et al.*, 2009).

La macroalga *U. lactuca* es un organismo muy resistente tanto al manejo como a condiciones adversas (físicas y químicas) esta plasticidad es la que le permite distribuirse por todo el globo. Sin embargo, también se han determinado los parámetros idóneos para su desarrollo óptimo, los cuales son bastante similares a los de *Seriola rivoliana*. Para el cultivo de las macroalgas se mantuvo un rango de temperatura de 23 a 25 °C debido a que los tanques estaban ubicados a la intemperie y dependió de las condiciones ambientales. En caso del sistema de recirculación la salinidad se mantuvo en 37 ppt al iniciar el ciclo y 38 ppt al finalizar.

Es importante mencionar que se colocó un difusor de aire de tipo L cerca de la salida de agua para crear una cortina de burbujas que permitiera mantener a la macroalga suspendida en la columna de agua. De esta manera aprovechar todo el espacio del tanque y evitar que fragmentos de la macroalga se acumularan en el fondo del tanque debido a que favorece a la descomposición de las mismas.

6.3. Análisis de la excreción de amonio en un cultivo de *Seriola rivoliana*.

Para el cumplimiento del primer objetivo se llevó a cabo un experimento en el sistema "A" en cada uno de los tanques se sembraron 6 peces del mismo peso (500 gr \pm 80 gr) que sumaron un total de 2.8 kg de biomasa. El experimento incluyó tres tratamientos que consistieron en suministrar distintas cantidades de alimento: porcentajes de 2, 2.5 y 3 % de la biomasa total. Es decir, 57, 71 y 85 g respectivamente. También se incluyó un tratamiento control en el cual se mantuvo a los peces en inanición durante un día previo a la experimentación, con el propósito de conocer la cantidad de amonio generado por el metabolismo del pez. Cabe mencionar que cada uno de los tratamientos se realizó por triplicado.

Previo a cada experimentación, se sifoneo y se dejó trabajar al sistema durante 24 horas para expulsar los nutrientes excretados por los peces mediante el recambio de agua. Posteriormente, al iniciar el experimento se procedió a cerrar las válvulas y antes de alimentar se tomó una primera muestra de agua (50 ml) para conocer las concentraciones iniciales de los nutrientes. Después, se alimentaron los peces con las cantidades determinadas y se tomaron muestras de agua (50 ml) cada dos horas durante un periodo de 12 horas, lo que da un total de 21 muestras por tratamiento. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio húmedo de genómica y se colocaron en un congelador para su preservación a -80 °C y se analizaron al término de la fase de experimentación.

Finalmente, las muestras se descongelaron a temperatura ambiente y fueron analizadas por triplicado mediante un espectrofotómetro marca Hach modelo DR3900, siguiendo las técnicas del mismo (Nitrogen, Ammonia, Salicylate method 10031).

6.4. Capacidad de fijación de fósforo y nitrógeno inorgánico de la macroalga *Ulva lactuca* en un cultivo integrado con *S. rivoliana*.

El segundo experimento para integrar ambas especies. De esta manera, determinar los índices de fijación de fósforo y nitrógeno de la macroalga *U. lactuca*. El experimento consistió en dos tratamientos, el sistema de recirculación (grupo B) se utilizó para el tratamiento de integración. Se sembraron 50 ejemplares juveniles de *S. rivoliana* en el tanque de peces (RP) que equivalen a un total de biomasa inicial de 18.3 kg y se sembraron 3 kg de biomasa (peso húmedo) de *U. lactuca* en el biofiltro (RA). El sistema con taques independientes (grupo C) se utilizó como tratamiento control. De igual manera, se sembraron 50 ejemplares juveniles de *S. rivoliana* en el tanque de peces (CP), que equivale a un total de biomasa inicial de 17.6 kg y también se sembraron 3 kg de *U. lactuca* en el biofiltro (CA) (Figura 10).



Figura 10. Fotografía de siembra de macroalga *U. lactuca* en los biofiltros.

El experimento tuvo un total de 3 ciclos o réplicas en el tiempo y cada ciclo de experimentación tuvo una duración de 15 días. Los peces fueron alimentados con

el 2 % de su peso corporal con un alimento comercial marca Skretting para ambos tratamientos, la porción de alimento se suministró en dos raciones; una a las 8 am y la segunda a las 2 pm. En caso del tratamiento control al tratarse de tanques independientes, las macroalgas fueron fertilizadas a las 8 am con 100 ml de un fertilizante compuesto por 12 g de fertilizante comercial fosfonitrato (NH_4NO_3) y 8 g del fertilizante comercial Miracle-Gro (cada 100 g de fertilizante contiene 24 g de N, 8 g P, 0.15 g Fe, 0.05 g Mn, 0.02 g B, 0.06 g Zn, 0.07 g Cu y 0.0005 g Mo) durante el periodo de experimentación.

La toma de muestra se realizó a las 2 pm, antes de llevar a cabo la limpieza del tanque de cultivo de peces (sifoneo). Las muestras fueron analizadas mediante métodos espectrofotométricos siguiendo el manual de determinación de nitratos y nitritos por el método de García Robledo y colaboradores (2014) usando cloruro de Vanadio como agente reductor. Para determinar la concentración de amonio se utilizó la metodología descrita por Koroleff (1983) y las indicaciones de Lora y colaboradores (2017) para determinar los nitritos, nitratos y fosfatos por micrométodos espectrofotométricos.

Una vez obtenidos los valores de nitrato presentes en el medio, se procedió a la determinación de una tasa de eliminación mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Asimilación de nitrato} = (C_{Ni} - C_{Nf}) * \frac{V}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde: C_{Ni} hace referencia a la concentración inicial del nitrato, C_{Nf} a la concentración de nitrato final, V al volumen del tanque y Δt al periodo de tiempo transcurrido.

Una vez obtenidas las concentraciones de fósforo en el medio se realizó un balance del fósforo eliminado durante la semana. Se calculó la tasa de eliminación mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Asimilación de fósforo} = (C_{Pi} - C_{Pf}) * \frac{V}{\Delta t} \quad (2)$$

Donde: C_{Pi} es la concentración de fósforo inicial, C_{Pf} es la concentración de fósforo final, V es el volumen de medio de cultivo y Δt es el período de tiempo entre mediciones.

Por último, se determinó la eliminación de amonio:

$$\text{Asimilación de amonio} = (C_{Ai} - C_{Af}) * \frac{V}{\Delta t} \quad (3)$$

Donde: C_{Pi} es la concentración de amonio inicial, C_{Pf} es la concentración de amonio final, V es el volumen de medio de cultivo y Δt es el período de tiempo entre mediciones.

6.5. Determinación de los índices de rendimientos productivo de *Seriola rivoliana* y *Ulva lactuca* en un sistema acuícola de recirculación.

Para determinar los índices de rendimiento productivo de *S. rivoliana* se realizaron biometrías al inicio y final de cada ciclo; los peces fueron capturados utilizando una red de captura y se trasladaron a un estanque de plástico con capacidad de 150 L, al cual se le suministro de 1 a 2 ml/L de eugenol para anestésiar a los peces y así poder medirlos (longitud furcal y total) y pesarlos (Figura 11).

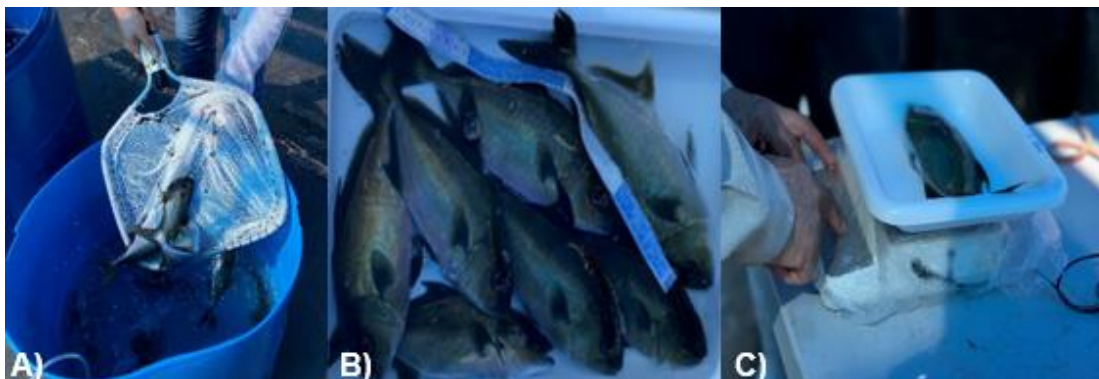


Figura 11. Fotografía de biometría de peces. El inciso A) muestra el traslado de los peces a un tanque previamente inoculado con eugenol, donde se utiliza una red de captura, B) medición de la longitud furcal y total de los peces, mediante una cinta métrica, C) pesado de los peces con el uso de una balanza analítica.

Con respecto a las cosechas de las macroalgas, también se utilizó una red de captura. Se exprimió suavemente en la misma red evitando la ruptura mecánica y posteriormente, se midió el peso húmedo de la macroalga con el uso de una balanza analítica (Figura 12).

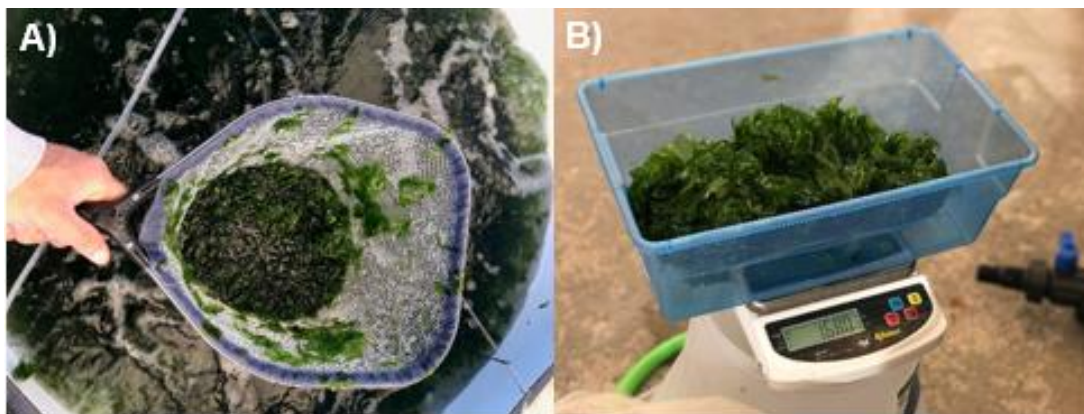


Figura 12. Fotografía de cosecha de las macroalgas. Inciso A) eliminación de exceso de agua utilizando una red de captura, B) medición de peso húmedo con el uso de una balanza analítica.

Por último, se calcularon índices de crecimiento de los ejemplares de *S. rivoliana* bajo los diferentes escenarios. Para calcular los índices se utilizaron los valores de

crecimiento obtenidos a partir de la diferencia entre peso inicial y peso final de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de ganancia en peso (\%GP)} = \frac{\text{Ganancia de peso}}{\text{Peso inicial}} * 100. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{Tasa de crecimiento específica (TCE)} \\ & = \frac{(\text{Ln}(\text{Peso final } g) - \text{Ln}(\text{Peso inicial } g))}{n \text{ de días}} * 100 \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{Tasa de conversión alimenticia (TCA)} = \frac{\text{Aumento en peso } g}{\text{consumo de alimento } g} \quad (6)$$

El consumo de alimento de los peces y la eficiencia proteica mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Consumo de alimento (CA)} = \frac{\text{Cantidad de alimento } g}{\text{número de peces}} \quad (7)$$

$$\text{Índice de eficiencia proteica (PER)} = \frac{\text{Incremento en peso } g}{\text{Proteína ingerida}} \quad (8)$$

También, se calcularon índices de crecimiento de la macroalga *U. lactuca* bajo las diferentes condiciones de cultivo. Para calcular los índices se utilizaron los valores de crecimiento, obtenidos a partir de la diferencia entre peso inicial y peso final de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \text{Porcentaje de ganancia en peso (\%GP)} \\ & = (\text{Ganancia en peso } g - \text{Peso inicial } g) * 100 \quad (9) \end{aligned}$$

$$\text{Tasa de crecimiento específico (\%SGR)} = \left(\frac{\text{Ln } PF_f - \text{Ln } PF_i}{t} \right) * 100 \quad (10)$$

Donde, PF_t es el peso fresco o húmedo del alga al final del período, PF_i es el peso fresco del alga al inicio del período y t es el número de día que dura el período.

$$\begin{aligned} &\text{Incremento de biomasa diario por unidad de superficie } (\Delta\text{BM}) \\ &= \frac{(PF_f - PF_i)}{A * t} \quad (11) \end{aligned}$$

Donde, ΔBM es el incremento de biomasa en $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, PF_f y PF_i , es el peso fresco del alga al final del período y al inicio en g , A es el área del tanque de cultivo en m^2 y t es el número de días del período.

6.6. Determinación de la composición bioquímica de *Seriola rivoliana* y *Ulva lactuca* en un cultivo integrado.

Se colectó un pez de cada tratamiento al inicio y final de cada ciclo de experimentación. Obteniendo un tamaño de muestra de 8 ejemplares, los cuales se preservaron a $-80 \text{ }^\circ\text{C}$. Al término de la fase de experimentación, los peces fueron descongelados a temperatura ambiente y con ayuda de un estuche de disección se recuperó una muestra de 50 g de musculo de cada pez. También se recolectó 100 g de muestra de *U. lactuca* de cada tratamiento con los mismos fines. Luego, las muestras fueron analizadas para conocer la composición bioquímica.

Los análisis de cuantificación de proteína, carbohidratos y lípidos se realizaron con base a materia seca, por tanto, se tuvo que liofilizar la muestra. La cuantificación

de la proteína se realizó utilizando el método del ácido bicinchoninic (BCA) según lo descrito por Brown y colaboradores (1989). La determinación de los lípidos totales se hizo según lo descrito por Barnes y Blackstock (1973) y la prueba de composición de carbohidratos se llevó a cabo como se describe en el manual de Roe y colaboradores (1949).

6.7. Pruebas estadísticas

Para la interpretación de resultados, se determinó si hubo distribución normal para satisfacer los requerimientos de normalidad y homogeneidad de la varianza y se sometieron a un análisis de varianza o t-test según sea el caso, con el objeto de saber si existía una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos, en el software STATISTICA® con nivel de confianza del 95 %

7. RESULTADOS

7.1. Parámetros de cultivo.

En general, los parámetros de cultivo se mantuvieron estables a lo largo de la fase de experimentación (Tabla 2). De los cuales podríamos destacar que no hubo necesidad de controlar el nivel de pH ya que se mantuvo a 8.2 y 7.5 en los tanques para el cultivo peces; RP: recirculación peces y CP: control peces, respectivamente. Mientras que en los biofiltros; RA: recirculación algas y CA: control algas, el pH se mantuvo a 8.1 y 9 respectivamente. La salinidad de los tanques se mantuvo bastante estable, esta osciló entre 36 y 37 salinidad. Cabe mencionar que, en dos ocasiones, se tuvo 38 salinidad en el sistema de recirculación (RP: recirculación peces y RA: recirculación algas) Sin embargo, no se trató de una concentración que pueda afectar al cultivo, además se logró adecuar la salinidad mediante el recambio de agua. La temperatura fue el parámetro que presentó mayor variación, principalmente en los biofiltros, en el biofiltro RA la temperatura promedio fue de 23 a diferencia del biofiltro CA donde la temperatura alcanzó los 25 °C. En cuanto a los tanques para cultivo de peces (RP y CP), la temperatura se mantuvo en 22 °C para ambos.

Tabla 2. Promedios de los parámetros registrados de cada tratamiento durante los 3 ciclos (Oxígeno disuelto, temperatura, salinidad y pH).

	RP	CP	RA	CA
Oxígeno disuelto (mg/L)	8 ± 1.3	8 ± 2	9 ± 2.8	8 ± 1.4
Temperatura (°C)	22 ± 2	22 ± 2	23 ± 2	25 ± 2
pH	8.2 ± 0.3	7.5 ± 1.4	8.1 ± 0.3	9 ± 1.7
Salinidad	37 ± 1	36 ± 1	37 ± 1	36 ± 1

Se muestran las desviaciones estándar no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos n=3. Las siglas RP) representan los peces cultivados en el sistema de recirculación (recirculación-peces), CP) los peces cultivados en el sistema control (control-peces), RA) el biofiltro

del sistema de recirculación (recirculación-algas) y CA) el biofiltro del sistema control (control-peces).

7.2. Cuantificación de la producción de amonio en un cultivo de *Seriola rivoliana*.

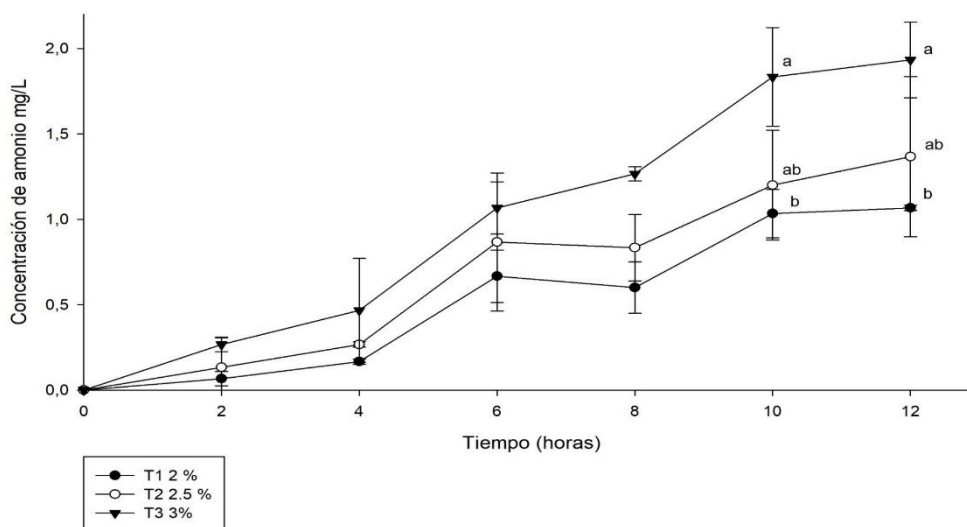


Figura 13. Producción de amonio en un cultivo de *S. rivoliana* con distintos porcentajes de alimentación: 2, 2.5 y 3 % (57, 71 y 85 g respectivamente). Se muestran desviaciones estándar mediante las barras sobre los puntos. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.005$) $n=3$, las letras sobre los puntos indican las diferencias significativas entre tratamientos.

Se puede observar la acumulación de la excreción de amonio (Figura 13), dando lugar a unos picos en los que la excreción es máxima a las 10 horas. Según los resultados obtenidos, a las 4 horas después de la ingesta ya se registra aumento de amonio. Además, se puede observar que este efecto tiene una duración de 6 horas indicado por los tiempos del experimento (hora 4 a hora 10) y posteriormente, la excreción de amonio disminuye al no observar un incremento significativo entre las 10 y 12 horas.

La excreción de amonio en los diferentes tratamientos demostró un comportamiento muy similar durante las 12 horas de experimentación, con tendencia ascendente. En las primeras 4 horas se observa que la producción de amonio aumentó gradualmente hasta una concentración de 0.5 mg/L. Después, hubo un aumento drástico hasta las 10 horas, donde el tratamiento número 3 (85 gramos de alimento) alcanzó la mayor concentración de amonio (2 mg/L) el cual presenta diferencias significativas en los tiempos 10 y 12 horas con los tratamientos 1 y 2. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en los tiempos 2, 4 y 6 horas. Por otro lado, el tratamiento 1 (57 gramos de alimento) produjo la menor cantidad de amonio con una concentración de 0.8 mg/L a las 12 horas, seguido por el tratamiento 2 (71 gramos de alimento) que produjo un total 1.2 mg/L.

7.3. Estimación de la capacidad de fijación de fósforo y nitrógeno inorgánico de la macroalga *Ulva lactuca* en un sistema acuícola de recirculación integrado con *S. rivoliana*.

Con relación al experimento de integración con duración de 3 ciclos (15 días por ciclo), las concentraciones de los nutrientes se mantuvieron estables a lo largo del experimento de integración (Tabla 3). El estadístico t de student establece que no hay diferencias significativas entre los tratamientos. Se puede notar que en todos los tratamientos el nutriente con mayor concentración fue el de amonio (0.5 mg/L) seguido por nitrato (0.4 mg/L). No obstante, las concentraciones están muy por debajo del nivel crítico para los peces de cultivo (1 mg/L). En cuanto a los nitritos y fosfatos, estos presentaron los valores de concentración más bajos (0.4 y 0.2 mg/L respectivamente). También es relevante mencionar que las concentraciones de los nutrientes, sobre todo del amonio y fósforo fueron altas (0.7, 0.4 mg/L respectivamente) en los primeros 3 días de cada ciclo de experimentación.

Tabla 3. Promedios de las concentraciones de nutrientes (amonio, nitratos, nitritos y fósforo) de cada tratamiento, durante los tres ciclos de experimentación.

	NH4 (mg/L)	NO2 (mg/L)	NO3 (mg/L)	PO4 (mg/L)
RP	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.07	0.3 ± 0.1
CP	0.5 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.1
RA	0.5 ± 0.3	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.1
CA	0.4 ± 0.2	0.2 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.1

Se muestran las desviaciones estándar n=3. Donde RP) representa los peces cultivados en el sistema de recirculación, CP) los peces cultivados en el sistema control, RA) el biofiltro del sistema de recirculación y CA) el biofiltro del sistema control.

En lo que corresponde al experimento sin recambio de agua que duró un periodo de tiempo de 14 horas; se determinó el comportamiento de los nutrientes en el sistema de recirculación (RP: recirculación peces y RA: recirculación algas) en el cual las concentraciones de los nutrientes se mantuvieron estables (Ver gráficas 14, 15, 16 y 17) y en el sistema abierto (CP: control peces) las concentraciones mostraron un comportamiento acumulativo (Ver gráfica 14, 15, 16 y 17).

Los resultados obtenidos en forma de excreción de amonio durante un periodo de 14 horas se muestran a continuación en la figura 8. En la cual podemos constatar mediante el sistema abierto (CP: control peces) que la excreción de amonio es mayor a las 4 horas después de la alimentación, llegando a una concentración máxima de 1 mg/L a las 14 horas. Dicha concentración está en el límite del nivel crítico para los peces de cultivo. En contraste, el sistema de recirculación (RP: recirculación peces y RA: recirculación algas) mantuvo los niveles de amonio por debajo de 1 mg/L. El tanque RP (recirculación peces) presentó una máxima concentración de 0.6 mg/L y el tanque RA (recirculación algas) una concentración máxima de 0.5 mg/L. Cabe mencionar que dichas concentraciones se presentaron entre las 8 y 10 horas. Con base a estos resultados, se calculó la remoción de la macroalga *Ulva lactuca* que resultó ser del 95 %.

En el caso del biofiltro que se le suministró fertilizante (CA: control algas) es notorio que la mayor concentración de amonio (0.5 mg/L) se presenta cuando se suministra el fertilizante. Es decir, a la hora 0. Posteriormente, la concentración disminuye gradualmente hasta las 10 horas donde el amonio es removido en su totalidad por la macroalga.

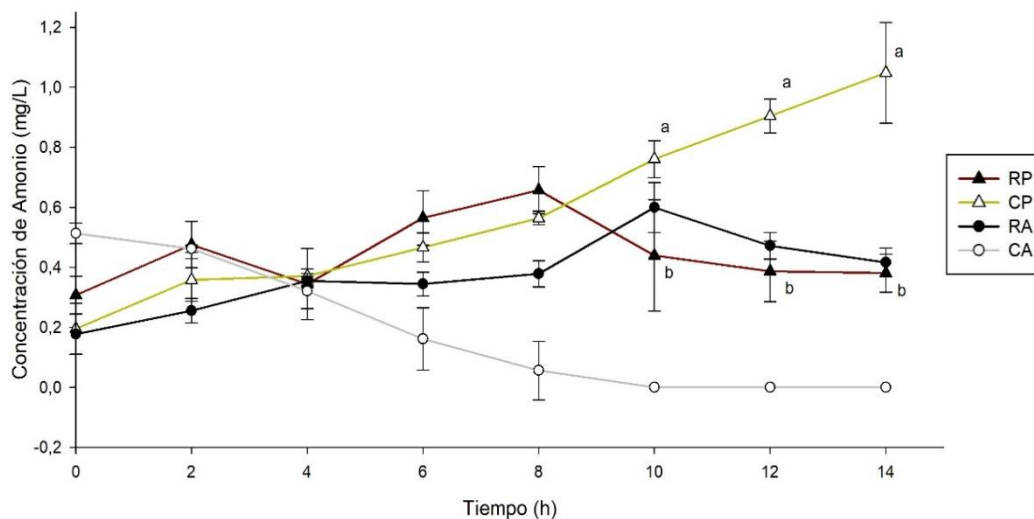


Figura 14. Concentración de amonio en los diferentes tratamientos (RP: recirculación peces y CP: control peces, RA: recirculación algas y CA: control algas) durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas. Se muestran desviaciones estándar $n=3$. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.005$). Las letras sobre los puntos indican las diferencias significativas entre los tratamientos RP y CP.

Los valores obtenidos de las concentraciones de fósforo (Figura 14) tanto en el sistema de recirculación como en el sistema abierto presentan un comportamiento muy similar a las concentraciones de amonio. Donde la mayor concentración se presentó en el tanque CP (0.8 mg/L) a las 14 horas. En cambio, el tanque RP tuvo la mayor concentración a las 12 horas (0.5 mg/L) y a las 14 horas disminuyó a una concentración de 0.4 mg/L estos dos tratamientos presentaron diferencias significativas.

En caso de los biofiltros, el RA (recirculación algas) que asimiló el fósforo proveniente del cultivo de peces, mantuvo la concentración de fósforo en un promedio de 0.2 mg/L durante las 14 horas, pero si hubo un aumento de 0.3 mg/L en la hora 6. La capacidad de remoción de *U. lactuca* resultó ser del 92 %. En contraste, el biofiltro CA (control algas) presentó la mayor concentración (0.2 mg/L) a las 0 horas cuando se le suministró el fertilizante y el fósforo fue asimilado en su totalidad por las macroalgas a las 8 horas.

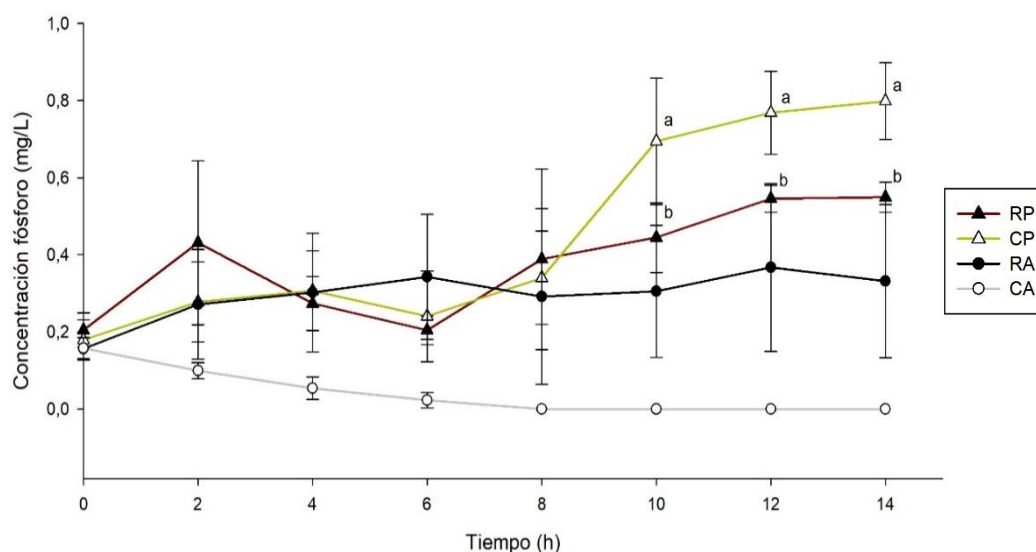


Figura 15. Concentración de fósforo en los diferentes tratamientos (RP: recirculación peces y CP: control peces, RA: recirculación algas y CA: control algas) durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas. Se muestran desviaciones estándar. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p = <0.005$) $n=3$. Las letras sobre los puntos indican las diferencias significativas entre los tratamientos RP y CP.

En el caso de los análisis de nitritos (Figura 16), no se presentaron altas variaciones durante las 14 horas de experimentación, lo cual se puede visualizar en ambos tratamientos. En el tanque CP (control peces), la concentración se mantuvo por debajo de 0.4 mg/L durante las primeras 8 horas. Después, la concentración incrementó a 0.7 mg/L a las 14 horas. A diferencia, el tanque RP (recirculación peces) mantuvo una concentración por arriba de 0.4 mg/L durante

las 14 horas de experimentación y la concentración más alta (0.5 mg/L) se presentó a las 12 horas.

El biofiltro RP (recirculación peces) muestra una tendencia ascendente durante las primeras 8 horas, donde va de una concentración mínima de 0.2 mg/L a una concentración máxima de 0.5 mg/L. Posterior a las 8 horas el biofiltro redujo la concentración a 0.4 mg/L en las horas 12 y 14. De acuerdo a estos valores se calculó la capacidad de de *U. lactuca* para remover los nitritos, que resultó ser del 52 %. Por otra parte, el biofiltro CA (control algas) pudo asimilar el total de nitritos (0.5 mg/L) a las 10 horas.

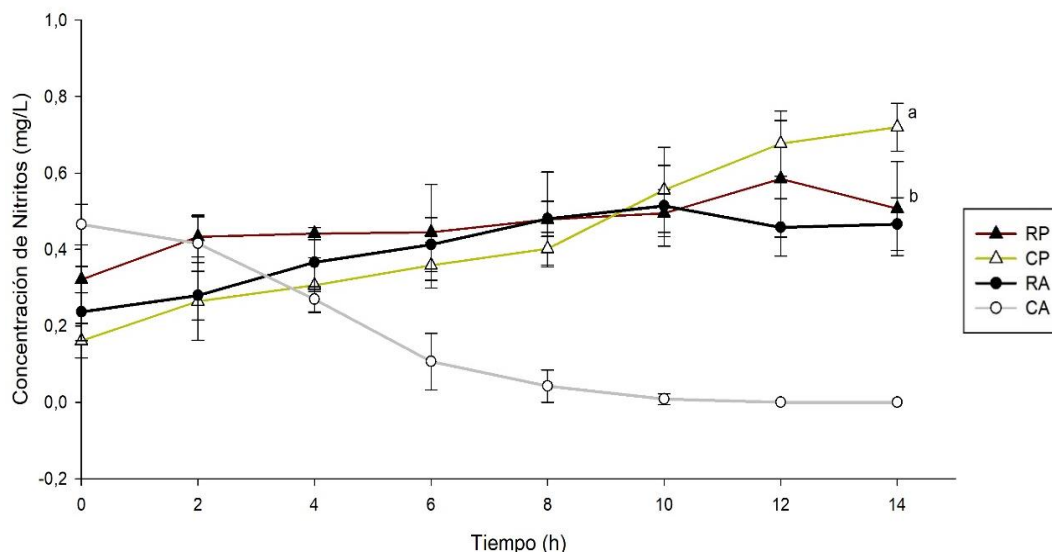


Figura 16. Concentración de nitritos en los diferentes tratamientos (RP: recirculación peces y CP: control peces, RA: recirculación algas y CA: control algas) durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas. Se muestran desviaciones estándar. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p = <0.005$) $n=3$. Las letras sobre los puntos indican las diferencias significativas entre los tratamientos RP y CP.

Por último, se describirá la variación de las concentraciones de nitratos en el sistema de recirculación y el sistema abierto durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas (Figura 17). En primer lugar, el tanque CP (control peces) que conforma el sistema abierto, tuvo una concentración por

debajo de 5 mg/L durante las primeras 7 horas de experimentación y a medida que el tiempo fue avanzado, la concentración de nitrato aumentó gradualmente, hasta duplicar la concentración (1 mg/L) a las 14 horas. En cambio, para el tanque RP (recirculación peces) la concentración de nitratos se mantuvo en 0.4 mg/L durante todo el transcurso del experimento. Sin embargo, a las 2 y 6 horas se aprecian pequeños picos donde se presentan las concentraciones más altas (0.5 mg/L) en el tanque RP.

En lo que compete a los biofiltros, particularmente el RA (recirculación algas) muestra un comportamiento muy estable, donde la mínima concentración fue de 0.2 mg/L de nitratos a las 0 horas y la máxima concentración se presenta a las 10 horas con 0.4 mg/L. Conforme a estos valores, la capacidad de remoción de *Ulva lactuca* resultó ser del 53 %. Por otro lado, el biofiltro CA (control algas) removió 0.5 mg/L a las 10 horas transcurridas del experimento

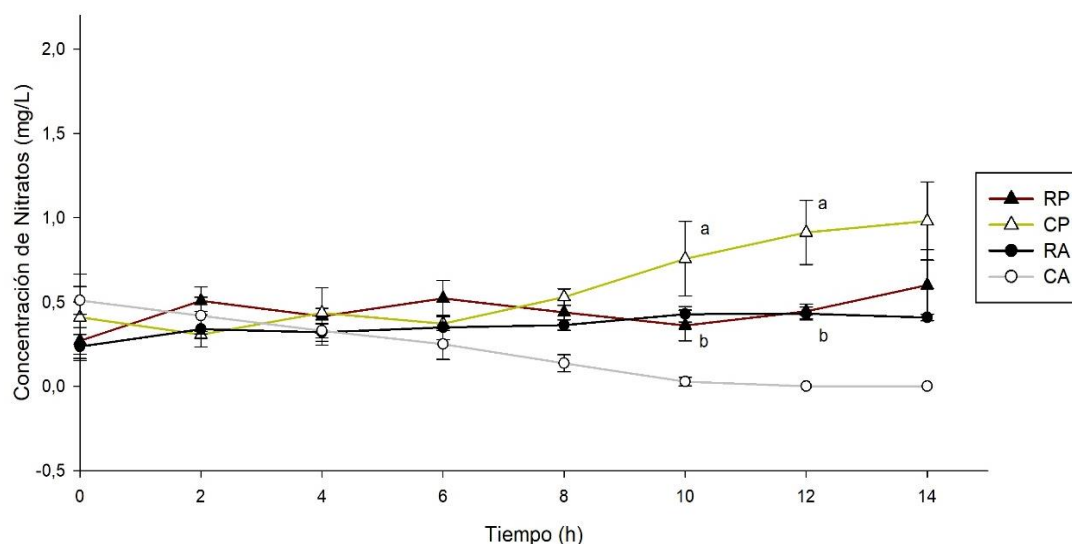


Figura 17. Concentración de nitratos en los diferentes tratamientos (RP: recirculación peces y CP: control peces, RA: recirculación algas y CA: control algas) durante el experimento sin recambio de agua con duración de 14 horas. Se muestran desviaciones estándar. Se encontraron diferencias estadísticamente

significativas entre los tratamientos ($p = <0.005$) $n=3$. Las letras sobre los puntos indican las diferencias significativas entre los tratamientos RP y CP.

Acorde con las gráficas de los macronutrientes anteriormente descritos, es posible corroborar que los tiempos de excreción de los peces (a partir de las 4 horas post alimentación) está directamente relacionado con los picos de concentración de los nutrientes, efecto que se puede observar en todas las gráficas del experimento sin recambio (Figuras 14, 15, 16 y 17).

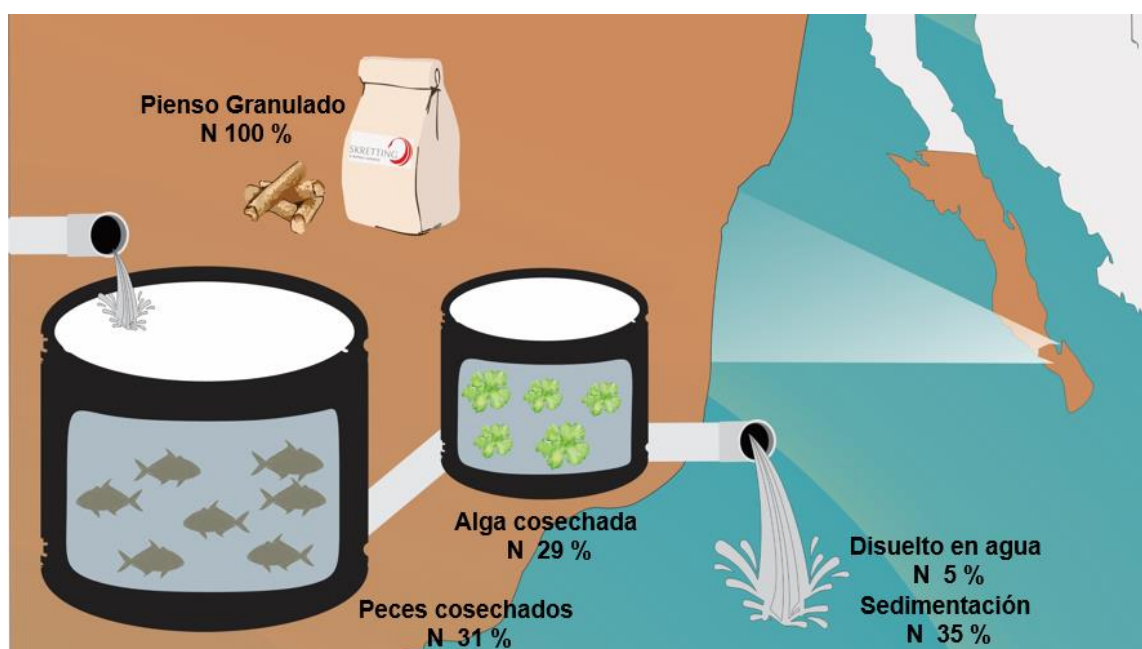


Figura 18. Esquema de balance de nitrógeno del sistema acuícola de recirculación con 30 % de recambio. Se define la cantidad de nitrógeno que ingresó (input) y salió (output) del sistema. De igual manera, las cantidades que fueron retenidas por los peces de cultivo *Seriola rivoliana* y el biofiltro conformado por *Ulva lactuca*.

Durante la fase de integración, el nitrógeno total que ingresó (input) al sistema de recirculación con 30 % de recambio de agua fue de 1080.40 g (100 %) (Figura 18), esta cantidad es la suma del nitrógeno que se suministró mediante la dieta durante los tres ciclos de experimentación. De esta cantidad, los peces de cultivo *S. rivoliana* retuvieron un total de 337.55 g que equivale al 31.24 % y el biofiltro conformado por *U. lactuca* removió un total de 313.77 g igual a 29 %. Por lo tanto,

el nitrógeno residual (output) liberado al ambiente en forma disuelta fue de 54 g (5 %) y 378 g (35 %) en sólida.

Por otra parte, el nitrógeno total que ingreso al sistema abierto fue de 1127.67 g (100 %) (Figura 19). Del cual, los peces de cultivo retuvieron un total de 388.18 g que equivale a 34 %, y debido a que el sistema no cuenta con un biofiltro, la cantidad de nitrógeno residual liberado al ambiente en forma disuelta fue de 394.4 g (35 %) y 349 g (31 %) en forma sólida.



Figura 19. Esquema de balance de nitrógeno del sistema acuícola abierto con 300 % de recambio. Se define la cantidad de nitrógeno que ingresó (input) y salió (output) del sistema. De igual manera, las cantidades que fueron retenidas por los peces de cultivo *Seriola rivoliana*.

7.4. Índices de rendimiento productivo de *Seriola rivoliana* y *Ulva lactuca* en un sistema acuícola de recirculación.

Tabla 4. Indicadores de rendimiento productivo de *S. rivoliana* para los tratamientos RP (recirculación peces) y CP (control peces).

Índices	Tratamientos	
	RP	CP
Peso inicial (kg)	20.93 ± 0.04	21.84 ± 0.07
peso final (kg)	23.90 ± 0.07	25.10 ± 0.09
Peso ganado (kg)	2.97 ± 0.27	3.26 ± 0.31
Peso ganado (%)	14.70 ± 0.32	15.49 ± 0.37
Tasa de crecimiento específica (%/día)	0.91 ± 0.43	0.95 ± 0.37
Factor de conversión alimenticia (kg)	1.98 ± 0.17	2.1 ± 0.21
Tasa de eficiencia proteica	1.28 ± 0.27	1.18 ± 0.12
Factor de condición	1.24 ± 0.3	1.24 ± 0.2
Supervivencia (%)	100%	100%

Los valores indican la media, ± D. E. No se encontraron diferencias significativas estadísticamente entre los tratamientos ($p < 0.05$) $n=3$.

Los valores del índice de conversión alimenticia que se muestran en la tabla 4 no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, ambos mostraron el mismo valor de un kilogramo de biomasa por dos kilogramos de alimento (1.98 para los peces cultivados en el sistema de recirculación y 2.1 para los peces cultivados en el sistema control). La tasa de crecimiento específica (TCE) fue similar para ambos tratamientos: CP (control peces) y RP (recirculación peces) con 0.95 y 0.91 % respectivamente. De igual manera, el factor de condición fue el mismo para ambos tratamientos (1.24). Por ende, el análisis estadístico T test no arrojó diferencias significativas entre ambos tratamientos. Es relevante destacar que en ambos sistemas acuícolas se tuvo una supervivencia del 100 %.

En lo que respecta a los índices de crecimiento de la macroalga *U. lactuca* durante el experimento de integración (ver tabla 5) ambos tratamientos RA (recirculación algas) y CA (control algas) muestran diferencias significativas. Con relación a las macroalgas en el tratamiento RA (recirculación algas), las cuales fueron cultivadas mediante los efluentes generados por el cultivo de *S. rivoliana*, presentaron una mayor ganancia en peso de 16.69 kg que equivale a un 589.56 %. En cambio, las algas cultivadas mediante fertilización asistida (CA: control algas) mostraron un aumento de 3.5 kg (116 %). Evidentemente, la tasa de crecimiento específico de igual manera fue mayor en el tratamiento RA el cual presenta 12.54 % de crecimiento por día. Mientras que el tratamiento CA solamente incrementó un 3.21 % diario.

Tabla 5. Indicadores de crecimiento de *U. lactuca* para los tratamientos (RA: tratamiento de recirculación, CA: tratamiento control).

Índices	Tratamientos	
	RA	CA
Biomasa inicial (kg)	3 ± 0	3 ± 0
Biomasa final (kg)	19.687 ± 0.53*	6.5 ± 5.16*
Biomasa ganada (kg)	16.69 ± 0.54*	3.5 ± 5.17*
Biomasa ganada (%)	589.56 ± 53.84*	116.67 ± 172.27*
Tasa de crecimiento específico (%/d)	12.54 ± 0.18*	3.21 ± 0.18*

Los valores indican la media, ± D. E. Se encontraron diferencias significativas estadísticamente en los índices de biomasa ganada y tasa de crecimiento específico, el símbolo asterisco indica las diferencias significativas entre tratamientos.



Figura 20. Fotografía de cosecha de macroalgas (16.69 kg) cultivada con efluentes generados por el cultivo de *S. rivoliana*.

7.5. Composición bioquímica del músculo de *Seriola rivoliana* y tejido de *Ulva lactuca* en un cultivo integrado.

Los resultados de la composición bioquímica de los peces cultivados en el sistema de recirculación (RP: recirculación peces) y el sistema abierto (CP: control peces) se muestran en la tabla 6. En general, se observa que los peces cultivados en el sistema de recirculación resultaron tener mayor cantidad de carbohidratos, proteínas y lípidos que aquellos en sistema abierto. Sin embargo, el único macronutriente que presentó diferencias estadísticamente significativas fue el de lípidos. Los peces cultivados en el sistema abierto mostraron el valor de 129.30 mg/g, el cual difiere considerablemente con el valor obtenido de los peces del sistema de recirculación (194.71).

Tabla 6. Composición bioquímica del músculo de *S. rivoliana* en un sistema integrado con *U. lactuca*.

	Carbohidratos totales (mg/g)	Proteínas totales (mg/g)	Lípidos totales (mg/g)
RP	7.97 ± 4.27	705.71 ± 85.52	194.71* ± 68.38
CP	6,03 ± 2.86	637.01 ± 190.93	129.30* ± 57.38

Los valores indican la media y la desviación estándar de cada macronutriente. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, los asteriscos indican la diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos.

En cuanto a los análisis bioquímicos de *U. lactuca* en un cultivo integrado con *S. rivoliana* (ver tabla 7), los valores más altos (28 mg/g de carbohidratos, 35 mg/g de proteínas y 63.91 mg/g de lípidos totales) se observaron en las macroalgas cultivadas mediante los efluentes del cultivo de peces (RA: recirculación algas). Por otra parte, las algas cultivadas mediante fertilización asistida (CA: control algas) mostraron valores similares en carbohidratos (32.15 mg/g) y lípidos totales (66.46 mg/g). Mientras que las proteínas totales (26.40 mg/g) reflejaron diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 7. Composición bioquímica de *U. lactuca* en un sistema integrado con *S. rivoliana*.

	Carbohidratos totales (mg/g)	Proteínas totales (mg/g)	Lípidos totales (mg/g)
RA	28.56 ± 37.91	35.93* ± 19.80	63.91 ± 17.60
CA	32.15 ± 77.49	26.40* ± 17.69	66.46 ± 2.33

Los valores indican la media y la desviación estándar de cada macronutriente. Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, los asteriscos señalan la diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ($p < 0.05$) $n=3$.

8. DISCUSIÓN

Los avances en la tecnificación del cultivo de *Seriola rivoliana* en distintas latitudes (Espinoza *et al.*, 2009; Sicuro y Luzzana, 2016) permitirán que, a futuro, la producción de esta especie tenga un desarrollo importante en Baja California Sur, con potencial de expandirse en otras áreas del país. De manera que, fortalecer la piscicultura en México mediante la acuicultura multitrófica se vuelve un aspecto fundamental para incrementar la eficiencia productiva y al mismo tiempo reducir los impactos ecológicos causados por los efluentes generados por el cultivo. Particularmente, los compuestos nitrogenados y el fósforo.

El amonio (N-NH_4^+) es uno de los productos finales de mayor concentración del metabolismo de la proteína en peces teleósteos (Kaushik, 2000; Krohenert, 2006). Al igual que otros peces, *S. rivoliana* usa el nitrógeno de la proteína del alimento balanceado para su crecimiento y aunque también utilizan la proteína como fuente de energía, en este caso no es posible asimilar el nitrógeno. Por esta razón, el nitrógeno que no es aprovechado es excretado en forma de amonio (Kaushik, 2000). En el presente estudio, se suministró el alimento a las 8:00 horas, el cultivo de *S. rivoliana* produjo un aumento importante en la excreta de amonio a partir de la ingesta. Las curvas de excreción de amonio presentaron una tendencia acumulativa y similar conforme avanzó el tiempo (para todos los tratamientos) (ver figura 13). Donde los picos de excreción se dan a partir de las 4 horas después de la ingesta (8:00h) dicho efecto tuvo una duración de 6 horas. Después, la excreción de amonio volvió a las condiciones iniciales; esta misma respuesta fisiológica ha sido observada en juveniles de anguila australiana (*Anguilla australis australis*), Engin y Carter (2001) reportan que esta especie presenta los picos de excreción entre las 4 y 8 horas posterior a la ingesta. También para el bocinegro (*Pagrus Pagrus*) (García, 2002), la dorada (*Sparus aurata*) (Robaina *et al.*, 1999) y el pargo de mangle (*L. argentimaculatus*) (Leung *et al.*, 1999). Sin embargo, Robaina y colaboradores (1999) reportan que los valores máximos de excreción

de amonio para la Lubina (*Dicentrarchus labrax*) aparecen a las 8h después de la alimentación.

Según Kaushik (2000) las variaciones en la excreción de amonio como las horas de excreción, duración del efecto y cantidad, están influenciados por factores abióticos y bióticos. En cuanto a los factores abióticos se reporta que a medida que la salinidad disminuye, la alta permeabilidad catiónica de las branquias aumenta y permite mayor difusión de NH_4^+ . También influye la temperatura, generalmente cuando esta aumenta, ya que la tasa metabólica basal se acelera y se refleja en el incremento de la excreción de amonio. Otro de los factores que influye es el oxígeno disuelto, entre menor sea la concentración, la excreción de amonio se ve reducida (Kaushik, 2000). Las condiciones de cultivo para *S. rivoliana* se mantuvieron estables a lo largo de la fase de experimentación para todos los tratamientos, el oxígeno disuelto se mantuvo a una concentración de 8 mg/L, el pH osciló entre 7.5 a 8.2, la temperatura promedio fue de 22 °C, pero fue el factor que tuvo mayor variación (± 2 °C) debido a que los sistemas acuícolas se encontraban a la intemperie y la temperatura del agua dependió hasta cierto punto del ambiente. De tal forma que en dos ocasiones se tuvo un aumento de salinidad a 38 (37 promedio) como resultado de la evaporación del agua en los sistemas. A pesar de estas pequeñas variaciones las condiciones de cultivo se encuentran dentro de los rangos óptimos del cultivo de *S. rivoliana* (Espinoza *et al.*, 2009) por lo que se descarta que los factores abióticos hayan tenido un efecto en la excreción natural de los ejemplares de jurel.

En cuanto a los factores bióticos (Kaushik, 2000), la tasa de excreción de NH_4^+ disminuye con el incremento del peso. En teleósteos puede disminuir hasta 0.8 mg/L dependiendo el peso. De modo que los ejemplares de *S. rivoliana* fueron seleccionados de mismo peso (500 gr \pm 80 gr) para evitar la variación entre tratamientos. Por otra parte, Kaushik (2000), Dabrowski y colaboradores (1984) han mostrado que, durante la crianza de peces en etapas tempranas, presentan

un alza en la descarga de amonio. Debido a esto, podríamos inferir que los valores de excreción de amonio obtenidos son de los más altos durante el desarrollo biológico del jurel, dado que se cultivaron ejemplares juveniles.

Otro de los factores que se debe tomar en cuenta es el estrés (Kaushik, 2000) sobre todo en animales cultivados; se conoce que la manipulación es causante de cambios significativos en diversas funciones metabólicas. En el caso de los peces, aumentan el requerimiento de oxígeno y elevan su ritmo metabólico, lo que conlleva a una mayor excreción de amonio. Así que previo y durante el experimento se tuvo especial cuidado mediante observación continua, para poder identificar los signos de estrés los cuales son muy notorios en el jurel; su nadado es más rápido, mueve los opérculos con mayor frecuencia puesto que requiere mayor captación de oxígeno, la parte dorsal se torna de un color grisáceo intensificándose en la zona del cráneo (por mencionar algunas). De ahí que decidió esperar 24 horas después de la manipulación para iniciar las corridas del experimento y en caso de aún presentar los signos, se dio 24 horas más de reposo.

Asimismo, los cambios en la dieta también están directamente relacionados a la excreción de amonio (Koshio *et al.*, 1993). En condiciones de producción, cuando se presenta un fenómeno natural, es normal que se detenga el suministro de alimento como método de prevención para mantener la calidad del agua. Por tanto, los peces pasan un periodo corto de ayuno y durante este tiempo, utilizan la proteína de su cuerpo para el mantenimiento de las funciones vitales. En promedio, esta tasa oscila entre 100 y 200 mg de nitrógeno endógeno por kilogramo de peso corporal por día. En contraste, en el periodo de inanición *S. rivoliana* produjo 78.2 mg de nitrógeno endógeno por kilogramo de biomasa, lo que equivale a casi 20 mg menos que el rango que establece Koshio y colaboradores (1993).

Por otro lado, está comprobado que la excreción de nitrógeno total aumenta con la ingestión creciente de N y también con la calidad de alimento en casi todos los teleósteos de agua dulce y marinos (Kaushik, 2000; Dosdat *et al.*, 1989). Por ejemplo, se reporta que un kilogramo de pez bocinegro (*Pagrus pagrus*) que se alimentó con una dieta del 3 % equivalente a su peso, excretó un total de 240 a 270 mg de amonio. En comparación, en el presente estudio, Un kilogramo de biomasa de *S. rivoliana* alimentado con 0.030 kg de alimento (3 %) produjo 293.9 mg de amonio. Por consiguiente, el alimento es considerado como el principal factor responsable de las altas concentraciones de nutrientes en los efluentes generados por el cultivo de peces, ya que normalmente se alimentan a saciar o se le suministras alimento en cantidades a las cuales no pueden acceder en el ambiente natural. Hay que considerar que esta respuesta fisiológica varía entre las especies y depende de su requerimiento proteico y de sus capacidades de usar proteínas dietarias como fuente de energía.

Dicho lo anterior, los desechos nitrogenados provenientes de la digestión de las proteínas, pueden acumularse hasta niveles peligrosos. El cultivo de *S. rivoliana* (2.8 kg) con alimentación del 3 % (85 g) acumuló un nivel máximo de 2 mg/L. En contraste, está reportado que la especie *S. lalandi* acumuló de 0.50 a 0.76 mg/L (Fernandes y Tanner, 2008; Armuelles, 2016) en una biomasa de 1.86 kg y se alimentaron con una ración de 3.5 % (65 g) equivalente a la biomasa total, pero es importante mencionar que los análisis de este estudio se realizaron cuando los tanques presentaban 12 recambios al día. En consecuencia, la cantidad de amonio se diluye e inclusive se logra expulsar del sistema una cantidad significativa. Dichos valores deberían ser comparables ya que son especies del mismo género y presentan un metabolismo similar. Krohenert (2006) indica que esta concentración de amonio (1 mg/L) es crítica para peces de cultivo. Debido a que puede provocar estrés, un crecimiento reducido, daño a las branquias y tejidos epidérmicos, y por consecuencia mayor susceptibilidad a patógenos.

Por otra parte, se sabe que el fósforo aumenta la turbidez, el pH del agua y disminuye del oxígeno disuelto (Smith *et al.*, 1999). A partir de esto se podría deducir que las altas concentraciones del fósforo podrían ocasionar efectos directos a los peces de cultivo. Sin embargo, se conoce poco sobre los efectos negativos del fosfato en los organismos acuáticos. Rueda-Jasso y colaboradores (2013) establecen que una concentración de fósforo de 1.10 mg/L es un nivel crítico para la especie dulceacuícola *Skiffia multipunctata*. Ya que identificaron cambios en la morfología externa de los peces, principalmente en las branquias, donde las lamelas primarias y secundarias disminuyeron su tamaño y redujeron la viscosidad. También se observó un cambio de conducta, los peces exhibieron aletargamiento, boqueo y choques contra las paredes de los tanques. Cabe mencionar que, aunque Krohenert (2006), Rueda-Jasso y colaboradores (2013) establecen valores críticos para los peces, el rango de tolerancia entre especies puede variar en grandes proporciones y en el caso de *S. rivoliana*, no existe información sobre su rango de tolerancia al amonio o fósforo.

Existen varios estudios que han examinado especies del género *Ulva* y su capacidad de asimilar compuestos nitrogenados provenientes de los efluentes generados por cultivos acuícolas (Cohen y Neori, 1991; Schuenhoff, 2003) principalmente el amonio. La gran mayoría de estudios han sido realizados en condiciones de laboratorio y demuestran el gran potencial que tienen estas macroalgas como biofiltradoras, lo cual también ha sido constatado por estudios previamente desarrollados en nuestra institución CIBNOR (Peña-Rodríguez *et al.*, 2016; Elizondo-Gonzalez *et al.*, 2018). De la misma manera, en el presente estudio se obtuvieron resultados similares, aun cuando la fase de experimentación se realizó en condiciones que se asemejan a las de producción.

El biofiltro mantuvo los niveles de nutrientes estables en el sistema de recirculación durante los 3 ciclos de experimentación. El nutriente con mayor concentración fue el amonio (0.5 mg/L) aunque en ningún momento llegó a

acumularse a un nivel crítico, o sea por arriba de 1 mg/L (Krohenert, 2006). Seguido por los nitritos y nitratos, ambos con valor de 0.4 mg/L, y el nutriente que tuvo menor concentración fue el fósforo (0.2 mg/L). En contraste, el tanque de cultivo de peces con un recambio del 300 % presentó los mismos niveles a excepción de los valores de nitritos y fósforo que tuvieron 0.1 mg/L menos. Sin embargo, no presentaron diferencias estadísticamente significativas. De esta manera es posible confirmar que el biofiltro conformado por *U. lactuca* mejoró la calidad del agua residual del tanque de cultivo de peces, de tal manera que se pudo reducir el recambio de agua un 90 % respecto al tratamiento control. Además, conservó las condiciones de cultivo adecuados para *S. rivoliana* (Sicuro y Luzzana, 2016).

Se ha reportado que la capacidad de biofiltración de *Ulva* spp., depende de varios factores (Kubler and Davison, 1993; Cripps, 2016), de los cuales se pueden destacar el diseño del sistema de recirculación, densidades de cultivo, genotipo del alga, concentración de nutrientes en el agua y flujo de agua. El hecho de que la asimilación de nutrientes y el rendimiento productivo dependa de una causa multifactorial, crea sesgo al momento de comparar los diferentes estudios científicos (Ben-Ari *et al.*, 2014) de ahí que se reportan amplios rangos de remoción (40 a 90 %) y producción de biomasa para *Ulva* sp. (Msuya y Neori, 2008; Neori *et al.*, 2003). A continuación, se discuten los factores que pudieron influir de alguna manera en los resultados obtenidos.

En este estudio se propone un diseño sencillo que facilite el manejo y mantenimiento, el cual consta de un tanque principal con capacidad de 6 m³ para el cultivo de peces, que permitió tener una densidad de 4.5 kilogramos por metro cubico. Es decir, un cultivo intensivo, lo cual se asemeja a condiciones de producción. También incluyó un biofiltro con capacidad de 3.75 m³ y un sedimentador de 200 L. El flujo de agua de estos tanques se bombeaba desde el tanque de cultivo de peces al biofiltro con un flujo de 13.33 litros por minuto, por

tanto, el biofiltro tuvo un recambio del 513 %. A diferencia, algunos autores manejan pulsos de agua (Cohen y Neori; 1991; Neori *et al.*, 2003). Es decir, la circulación en el sistema no es continua y de esta manera se somete al alga a un proceso de inanición, de ahí que la remoción es más alta al suministrar los pulsos de agua que cuando se suministra continuamente. No obstante, el tanque de cultivo de peces puede verse afectado ya que los nutrientes excretados se acumulan. Para evitar esto, se conservó un flujo continuo, además de que los tanques eran de dimensiones grandes y se hubiese dificultado llevar a cabo pulsos de agua.

Aunado a lo anterior, el biofiltro incluyó aireación fuerte y continua, lo cual favoreció en varios aspectos. En primera instancia, la macroalga se mantuvo suspendida lo que evitó que se asentara en el fondo del tanque y que se desarrollara un proceso de descomposición, como investigaciones anteriores (Neori *et al.*, 1991; Ben-Ari *et al.*, 2014). A la vez, esto ayuda a promover el crecimiento del alga ya que el tejido sufre una ruptura mecánica y los organismos vegetales tratan de regenerarse rápidamente lo que conlleva a un requerimiento nutricional alto (Msuya y Neori, 2008) que se reflejó en los resultados. La capacidad de remoción de amonio fue la más alta (95 %), seguido por el fósforo (92 %) y la capacidad de remoción de nitrito y nitratos presentaron valores menores (52 y 53 %). Dichos porcentajes coinciden con los altos valores reportados en algunos estudios (Duke *et al.*, 1989; Cohen y Neori, 1991; Ben-Ari *et al.*, 2014) aunque como se mencionó con anterioridad, la capacidad de asimilación y producción de biomasa dependen de múltiples factores, por tanto, la eficiencia puede variar. Por ejemplo, en el estudio de Ben-Ari y colaboradores (2014) obtuvieron que la remoción de amonio fue del 56 % con una aireación de 15 segundos por minuto, mientras que el biofiltro con aireación continua, alcanzó una remoción de 83 %. Lo que nos indica que la eficiencia del biofiltro depende de las condiciones del cultivo.

Es evidente que *U. lactuca* prefiere el nitrógeno en forma de amonio y al ser el nutriente excretado por los peces en mayor proporción (Krohenert, 2006; Ale *et al.*, 2011), su cultivo mediante efluentes es conveniente. Por otra parte, es relevante mencionar que en teoría no debería haber presencia de nitritos y nitratos porque el alga consume directamente el amonio (Ale *et al.*, 2011) y este no es oxidado a presentaciones más simples. Sin embargo, aunque los tanques fueron limpiados después de cada cosecha, no es posible aseverar que en el biofiltro no se desarrolló una microbiota con bacterias nitrificantes de amonio, debido a que no se realizó ningún análisis microbiológico, y esto podría dar respuesta a la presencia de nitritos y nitratos en el sistema como resultado del proceso de nitrificación. (). Otra de las causas es el agua de pozo que se suministra al sistema, ya que contiene 2mg/L de nitritos y 0.15 mg/L de nitratos, estos valores se encuentran dentro del rango de aguas subterráneas (Singler y Bauder, 2012).

Con respecto al factor densidad, Ryther y colaboradores (1984) indican que al cultivar *U. lactuca* a una densidad arriba de 1 kg/m², reduce la producción de biomasa y su capacidad de remoción. Esto coincide con estudios que ratifican que la densidad óptima es cerca de 1 kg/m² (Cohen y Neori, 1991). Empero, se considera que esta unidad de medida no es la correcta para establecer una densidad de cultivo adecuado, debido a que es una unidad de área y el cultivo se realiza en un tanque por lo que se requiere unidades de volumen y densidad. Por esta razón, los resultados se presentaron por m³. La densidad del biofiltro inició con 0.8 kg/m³ y al final de cada ciclo, (día 15) se obtuvo en promedio un total de 4.4 kg/m³. Troell y colaboradores (2003) explican que, para obtener una alta capacidad de remoción y producción de biomasa, se debe cultivar a la macroalga en un tanque con un área amplia, así mismo Buschman y colaboradores (2001) mencionan que la macroalga debe pasar un periodo de “hambruna” para tener requerimientos nutricionales altos. En este estudio se tomaron en cuenta dichos factores, ya que la macroalga fue cultivada en tanques grandes con un volumen útil de 3.75 m³ y en un sistema de recirculación que se asemeja a los pulsos de

agua cargados de nutrientes. De esta manera, es posible explicar la alta capacidad de remoción y rendimiento óptimo en cuanto a la producción de biomasa, como lo menciona Troell y colaboradores (2003).

La efectividad de biofiltración de *U. lactuca* se hace aún más evidente en el experimento sin recambio de agua que tuvo una duración de 14 horas. En el cual, el sistema de recirculación mantuvo la calidad de agua, de tal manera que la concentración de amonio fue de 0.5 mg/L al finalizar el experimento (14 horas). De esta misma forma la concentración de nitritos, nitratos y fosfatos se mantuvieron en niveles bajos (0.3, 0.5 y 0.2 mg/L respectivamente) En comparación, el sistema abierto acumuló el amonio a un nivel crítico (1 mg/L) este efecto acumulativo también se presentó en los nitritos, nitratos y fosfatos que alcanzaron concentraciones de 0.7, 1 y 0.8 mg/L respectivamente. Cabe destacar que las cantidades de los nutrientes en el sistema de recirculación no fueron constantes, se presenta picos máximos en las cinéticas (amonio 0.6 mg/L, fósforo 0.5 mg/L, nitritos 0.5) debido a que la concentración de nutrientes depende del tiempo de excreción de los peces (García, 2002), la cual es mayor a partir de las 4 horas después de la alimentación para *S. rivoliana*, y también depende del flujo del agua en el sistema de recirculación (Msuya y Neori, 2008).

Otro aspecto que demuestra que *Ulva lactuca* es un candidato ideal para la biofiltración en cultivos integrados, es su composición bioquímica. Los análisis bromatológicos demuestran que la macroalga presentó 7.97 mg/g en carbohidratos, en lípidos 194.71 mg/g y en proteína un total de 705.71 mg/g. Los resultados tienen similitud con los obtenidos por Ben-Ari y colaboradores (2014), de los cuales podemos destacar el alto contenido proteico que es el principal indicador de la calidad de la macroalga (Neori *et al.*, 2000). Dicha cantidad de proteína fue mayor comparado a otra especie del género (*Ulva reticulata*) que también fue utilizada como biofiltro, se reporta una concentración de 250.7 mg/g (Msuya y Neori, 2008). Cabe mencionar que *U. lactuca* cultivada mediante

efluentes presenta hasta tres veces más de proteína total que en su ambiente natural (150-250 mg/g de proteína) (Indeergard y Minsas, 1991; Marsham *et al.*, 2007), aunque la cantidad de proteína varía dependiendo del hábitat y las condiciones del medio (Marinho-Soriano *et al.*, 2006; Cruz-Suarez *et al.*, 2009). Dicho lo anterior, la macroalga cultivada mediante efluentes se vuelve aún más atractiva para la biofiltración ya que es posible obtener un valioso subproducto de la acuicultura (Peñuela *et al.*, 2018). Por lo que es imperativo cuidar la calidad de la macroalga (Troell *et al.*, 2003) tanto la composición como inocuidad de la misma, porque es común que cuando el alga es cultivada en un sistema SAR se le adhieren sólidos suspendidos, aceites y finalmente, el alga será desaprovechado por su mala calidad (Troell *et al.*, 2003). Se recomienda utilizar un sistema de recirculación que cuente con componentes capaces de dividir y captar los sólidos suspendidos (sedimentador) y también los aceites liberados al sistema por el alimento balanceado (desproteinizador).

Para finalizar, un factor muy importante en un cultivo integrado mediante sistemas de recirculación es el posible efecto adverso que pueda tener el agua recirculada en el animal cultivado, en este caso, *Seriola rivoliana*. Anteriormente, se discutió que la remoción de los nutrientes es buena para los animales de cultivo, pero la presencia de macroalgas en el sistema también puede tener implicaciones negativas. De hecho, existen muy pocos estudios en los que se habla de los posibles efectos negativos de cultivos integrados con macroalgas. Craigie y Shacklock (1995) mencionan que uno de las desventajas es la disminución de la concentración de oxígeno disuelto, y aumento del pH. Aunque, estos efectos no se presentaron en el experimento; la recirculación del agua con el uso del biofiltro fue muy ventajoso y no se presentaron efectos adversos, debido a que se logró una sincronización entre la actividad metabólica del pez y los requerimientos nutricionales de la macroalga, que además de estabilizar la calidad de agua y reducir la necesidad del control de la misma, también hubo un balance entre el oxígeno y el pH, este balance se hizo muy notorio durante la digestión del pez y a

de medio día al atardecer. En estas circunstancias los peces consumen más oxígeno y producen más CO₂ el cual reduce el pH en el sistema. Al mismo tiempo, la macroalga se ve favorecida en el proceso de fotosíntesis y produce oxígeno, asimila el CO₂ y como resultado eleva el pH, el cual se mantuvo en un promedio de 8.2 a lo largo de la fase de experimentación. Este balance ha sido observado en otros cultivos multitróficos (Schuenhof *et al.*, 2003).

También es posible comprobar que no hubo ninguno efecto adverso en el cultivo de *S. rivoliana* mediante la supervivencia que fue del 100 % y el rendimiento productivo que resultó ser óptimo. Dado que la tasa de crecimiento específico fue de 0.91 % diario y se tuvo un peso ganado de casi 3 kilogramos (2.97 kg) lo que corresponde a 14.70 % de incremento de biomasa en un mes y medio. Asimismo, estos valores fueron reflejados en el factor de conversión alimenticia para el tratamiento de recirculación y control (1.9 y 2.1). Dichos resultados coinciden con los reportados por Sicuro y Luzzana (2016), Espinoza y colaboradores (2009) que también realizaron un cultivo intensivo de *S. rivoliana*. Aunado a lo anterior, los resultados de la composición bioquímica (carbohidratos 7.97 mg/g, proteínas 705.71 mg/g y lípidos 194.71 mg/g) son concordante con lo registrado en el manual de pesca blanca (Martínez, 2005).

9. CONCLUSIONES

- Un kilogramo de biomasa de *Seriola rivoliana* alimentado con 0.030 kg de alimento (3 %) produce 293.9 mg de amonio.
- La especie *S. rivoliana* presenta un aumento en la excreción de amonio posterior a las 4 horas de la ingesta del alimento y en promedio incrementa 1.2 mg por cada 2 horas.
- El biofiltro conformado por la macroalga *U. lactuca* mejoró la calidad de agua en el sistema manteniendo los niveles de los compuestos nitrogenados (Amonio 0.5 mg/L, nitrito 0.4 mg/L y nitrato 0.4 mg/L) y de fósforo (0.3 mg/L) por debajo del nivel crítico (amonio 1 mg/L y fósforo 1.10 mg/L).
- El alga presentó una capacidad de remoción del 95 % de amonio, 92 % de fósforo y respecto a los nitritos y nitratos demostró una capacidad de remoción del 52 y 53 %, respectivamente.
- Se logró obtener 38 kg (peso húmedo) de biomasa de la macroalga con alto contenido proteico (35 %) como subproducto del cultivo integrado de *S. rivoliana* y *U. lactuca*.
- El diseño del sistema que se propone para el cultivo de *S. rivoliana* y el tratamiento de las aguas residuales mediante este biofiltro, permite la expansión de la piscicultura al disminuir las cargas de nutrientes en los efluentes. Reduciendo los posibles impactos en el ambiente y al mismo tiempo permite reducir significativamente el recambio de agua (90 %), sin afectar el rendimiento productivo del pez ni su composición bioquímica. Finalmente, esto podría verse reflejado en el ahorro de energía y en la bioseguridad del sistema.

10. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se recomienda realizar estudios microbiológicos del biofiltro para conocer si existe una microbiota que esté participando con el proceso de nitrificación. De igual manera para el tanque de peces ya que la macroalga produce metabolitos secundarios que podrían favorecer al crecimiento de otros microorganismos de los cuales se desconoce que sean beneficiosos o tengan un efecto negativo en el cultivo. Lo anterior, también debe ser reforzado con análisis fisiológicos del pez.

Otro de los aspectos que se recomiendan evaluar son las interacciones de los organismos durante la noche, debido a que, en el caso de las macroalgas al tratarse de organismos vegetales, durante el ciclo oscuro o también llamado ciclo de Calvin, convierten el oxígeno, dióxido de carbono e hidrógeno en glucosa. Por esta razón se recomienda monitorear los parámetros fisicoquímicos durante la noche.

Por último, mencionar que los sistemas de recirculación se deben adecuar a las integraciones que se pretendan desarrollar. En el caso de la integración macroalga-pez se recomienda utilizar componentes especializados como sedimentador y fraccionador de proteína, de esta manera mejorar la calidad del subproducto acuícola.

11. LITERATURA CITADA

- Abdel, W. A., W. Adbel, M.I. Younis, N. A. Al-Asgah. 2016. Potential use of Green macroalgae *Ulva lactuca* as a feed supplement in diets on growth performance, feed utilization and body composition of the African catfish, *Clarias gariepinus*. J. Biol. Sci. 23:404–409.
- Abellan, E., B. Basurco. 1999. Marine finfish species diversification; current situation and prospects in Mediterranean aquaculture. Opt. Médit. Sér. B: Etud. Rech. 24:14-29.
- Aguilera, E., G. Yany, J. Romero. 2013. Cultivable intestinal microbiota of yellowtail juveniles (*Seriola lalandi*) in an aquaculture system. Lat. Am. J. Aquat. Res. 41(3): 395–403.
- Anguas-Vélez, B. H., R. Civera-Cerecedo, E. Goytortúa-Bores, S. Rocha-Meza. (2003). Efecto de la temperatura y la densidad de cultivo sobre el crecimiento de juveniles de la cabrilla arenera, *Paralabrax maculatofasciatus*. Hidrob. 13(4), 309-315.
- Ale, M.T., J. D. Mikkelsen, A. S. Meyer. 2011. Differential growth response of *Ulva lactuca* to ammonium and nitrate assimilation. J Appl Phycol. 23: 345
- Armuelles, C. E. 2016. Efecto del ajo (*Allium sativum*) adicionado a la dieta de jurel (*Seriola lalandi*) para el tratamiento preventivo con infestaciones de *Zuxapta seriolae* (Meserve, 1938) Price, 1962). Centro de Investigaciones Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Arredondo, J. L., S. Lozano. 1996. Fundamentos en Acuicultura. México. pp. 1-23.
- Avilés, A. 2000. Cultivo de Peces Marinos. Cap. XV. En: Álvarez-Torres, M. Ramírez-Flores, L.M. Torres-Rodríguez y A. Díaz de León-Corral (Eds). Estado de Salud de la Acuicultura, 2000. INP.

- Balina, K., A. Lika, F. Romagnoli, D. Blumerga. 2017. Seaweed cultivation laboratory testing: effects of nutrients on growth rate of *Ulva intestinalis*. Ene. Proc.113: 454-459.
- Bansemir, A., M. Blume, S. Schröder, U. lindequist. 2006. Screening of cultivated seaweed for antibacterial activity against fish pathogenic bacteria. Aqua 252:79–84.
- Barnes, H., J. Blackstock. 1973. Estimation of lipids in marine animal tissues: detailed investigation of the sulphophosphovainillin method for total lipids. J Exp. Mar. Biol. Eco. 12: 103-118.
- Batrel, Y., M. Regnault. 1985. Metabolic pathways of ammoniogenesis in the shrimp *Crangon crangon* L.: possible role of glutamate dehydrogenase. Comp. Biochem. Physiol. 82(2):217-222.
- Ben-Ari, T., A. Neori, D. Ben-Arza, L. Shauli, V. Odintsov, M. Shpigel. 2014. Management of *Ulva lactuca* as a biofilter of mariculture effluents in IMTA system. Aqua 434: 492-498
- Borja, A. Los Impactos ambientales de la acuicultura y la sostenibilidad de esta actividad. Bol. Inst. Esp. Oceanogr. 18 (1-4), 2002.
- Brown, R., K. Jarvis, K. Hyland. 1989. Protein measurement using bicinchoninic acid: elimination of interfering substances. Anal. Biochem. 180: 136-139.
- Burgoin-Cota, M. (2015). Estudio de la incorporación de la levadura viva *Debaryomyces hansenii* a través del rotífero *Brachionus rotundiformis* durante los primeros días de desarrollo del jurel *Seriola rivoliana*. Maestría en Ciencias. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
- Buschmann, A., A. Fortt. (2005). Efectos ambientales de la acuicultura intensiva y alternativas para un desarrollo sustentable. Rev. Amb.Des. 21(3), 58-64.

- Buschmann, A., M. Troell, N. Kautsky. 2001. Integrated algal farming: a review. *Cah. Biol. Mar.* 42, 83-90.
- Cabrera-Mancilla, E., R. M. Gutiérrez-Zavala. (2015). Producción de huachinango (*Lutjanus peru*) en jaulas flotantes. *Agrop.* 8(3), 3-9.
- Carpenter, S. R., E. M. Bennett. 2011. Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. *Environ. Res. Let.* 6(1), 014009.
- Chele, F. S., V. V. Vera, E. Blacio. (2005) Cultivo de huayaípe, *Seriola rivoliana*, en piscinas provistas de geomembrana. CENAM-ESPOL.
- Chirichigno F. N., U. Cornejo, R. Martín. 2001. Catálogo comentado de los peces marinos del Perú. Publicación Especial. Instituto del Mar del Perú. Callao, Perú. 310-314
- Cho, C. Y., D. P. Bureau. 2001. A review of diet formulation strategies and feeding systems to reduce excretory and feed wastes in aquaculture. *Aqua. Res.* 32 (Suppl. 1) 349 - 360.
- Cirerol, N. (2004). Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical. Doctorado en Ciencias. Universidad de Barcelona.
- Claybrook, D. L. 1983. Nitrogen metabolism. In *The biology of Crustacea. Internal anatomy and physiological regulation.* Academic Press, New York. 163-213,
- Cohen, I., Neori, A. 1991. *Ulva latuca* Biofilters for Marine Fishpond Effluents. Ammonia uptake kinetics and nitrogen content. *Bot, Mar.*34, 475-482.
- CONAPESCA. 2013. Anuario estadístico de acuicultura y pesca. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería. Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Contreras-Sánchez W. M., M. Contreras-García, A. McDonald-García, U. Hernández-Vidal, L. Cruz-Rosado, R. Martínez-García. 2015. Manual para la producción de

robalo blanco (*Centropomus undecimalis*) en cautiverio. 2da ed. Universidad Juárez autónoma de Tabasco.

Cowey, C. B., M. J. Walton. 1989. Intermediary metabolism. In: Halver J. E. Fish Nutrition 2nd ed. Academic Press, New-York. 259-329.

Craigie, J. S., P. F. Shacklock. 1995. Culture of Irish moss. In: Boghen, A. D. Cold-water Aquaculture in Atlantic Canada. 2nd Ed. The Canadian Institute for Research on Regional Development, Moncton, 241-270

Cripps, S. J, A. Bergheim. 2000. Solids Management and removal for intensive land. Based aquaculture production systems. Aquacult. Eng. 22 (1-2), 33-56.

Cruz-Suárez LE, M. Tapia-Salazar, M. G. Nieto-López, D. Ricque-Marie. 2009. Use of Seaweeds for Shrimp Nutrition: Status and Potential. The Rising Tide. Proceedings of the Special Session on Sustainable Shrimp Farming. Edited by: Browdy C. L., E. Darryl. Wor. Aqua. Soc. 131-147.

Cubillo, A. M., J. G. Ferreira, S. M. Robinson, C. M. Pearce, R. A. Corner, J. Johansen. 2016. Role of deposit feeders in integrated multi-trophic aquaculture: a model analysis. Aqua. 453, 54-66.

Dabrowski K., S. J. Kaushik, P. Luquet. 1984. Metabolic utilization of body stores during early life of white fish (*Coregonus laveratus* L.). J. Fish Biol., 24, 721-729.

Debusk. T. A., M. Blakeslee, J. H. Ryther. 1986. Studies on the outdoor cultivation of *Ulva lactuca* L. Bot. Mar. 24:381-386

Doglioli A. M., M. G. Magaldi, L. Vezzulli, S. Tucci. 2004. Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine shrimp farm in the Ligurian Sea (Western Mediterranean). Aqua. 231, 215-235.

- Dosdat, A., R. Métailler, N. Tetu, E. Servais, H. Chartois, C. Huelvan, E. Desbruyeres. 1995. Nitrogenous excretion in juvenile turbot, *Scophthalmus maximus* (L.), under controlled conditions. *Aqua. Res.* 26, 639-650.
- Duke, C. S., W. Litaker, J. Ramus. 1989. Effects of the temperature, nitrogen supply and tissue nitrogen on ammonium uptake rates of the chlorophyte seaweeds *Ulva curvata* (Ulvales: Chlorophyta). *Mar Biol.* 100:143-150.
- Ebeling, J. M. 2006. Biofiltration-Nitrification Design Overview. *Environ. Eng.*
- Engin K., C. G. Carter. 2001. Ammonia and urea excretion rates of juvenile Australian short-finned eel (*Anguilla australis australis*) as influenced by dietary protein level. *Aqua.* 194(1-2): 123-136.
- Elizondo-González R., E. Quiroz-Guzmán, C. Escobedo-Fregoso, P. Magallón-Servín, A. Peña-Rodríguez. 2018. Use of seaweed *Ulva lactuca* for water bioremediation and as feed additive for white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Pee. J.* 6, 59.
- Espinosa, A., M. Bermúdez. 2012. La acuicultura y su impacto al medio ambiente. Coordinación de Ciencia de los Alimentos, Laboratorio de Análisis Biológicos, CIAD. *Estudios Sociales.* 217-232.
- Espinoza, N., E. Escala, E. Blacio. 2009. Estudio de la factibilidad técnica y económica del cultivo de huayaípe (*Seriola rivoliana*) en piscinas con y sin geomembranas. Escuela superior Politecnica del Litoral. Guayaquil. 3-5.
- FAO. 2016. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. Roma. 224 pp
- Fernandez, M., J. Tanner. 2008. Modelling of nitrogen loads from the farming of yellowtail kingfish *Seriola lalandi* (Valenciennes, 1833). *Aqua Res.* 39: 1328–1338.

- Fernandez-Polanco, F., E. Méndez, M. Urueña, S. Villaverde, P. A. García. (2000) Spatial distribution of heterotrophs and nitrifiers in a submerged biofilter for nitrification. *Wat. Res.* 34, 4081-4089.
- Folke, C., N. Kautsky. 1992. Aquaculture with its environment: prospects for sustainability. *Oce. Co. Man.* 17: 5-24.
- Froese, R., D. Pauly. 2019. FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org. Última vez Abril 20 del 2019.
- Fuentes-Quesada, J. P., J. P. Lazo. 2018. The effect of lipid type on lipid digestion enzymes during larval development of the California halibut, *Paralichthys californicus*. *Aqua.* 488, 49-60.
- García, C. 2002. El bocinegro (*Pargus pargus*) como especie alternativa para su producción en acuicultura: estudio comparativo de la excreción de amonio tras la alimentación con diferentes piensos experimentales. Maestría en Ciencias. Universidad de las Palmas de Gran Canaria y Centro de Estudios Marítimos del Atlántico.
- García-Gómez, A., 2000. Recent advances in nutritional aspects of *Seriola dumerili*. *Cah. Opt. Med.* 47:249-57.
- García-Robledo, E., A. Corzo, S. Papaspyrou. 2014. A fast and direct spectrophotometric method for sequential determination of nitrate and nitrite at low concentrations in small volumes. *Mar. Chem.* 162: 30-36.
- González-Henríquez, N., M. Rey-Méndez, Y. Pérez, A. Bilbao, N. Pavón, G. Louzara, R. Domínguez. 2015. Cultivos multitróficos: complementos a la explotación de otras especies de fuerte presencia en el mercado. *Foro Iberoam. Rec. Mar. Acui.* VII: 167-178
- Guiry, M. D. 2012. ¿How many species of algae are there?. *J. Phy.* 48: 1057-1063.

- Guist, G. Jr., H. J. Humm. 1976. Effects of Sewage effluents on growth of *Ulva lactuca*. Biol. Sei. 4: 267-271.
- Kormeyer, K. E., H. Dewar. 2001. Tuna metabolism and energetics. Fish. Physiol. 19, 35-78.
- Gutiérrez-Cuesta, R., K. L. González-García, Y. Hernández-Rivera, Y. Acosta-Suárez, D. Marrero-Delange, D. 2017. Algas marinas, fuente potencial de macronutrientes. Inv. Mar. 37 (2), 16-28.
- Halwart, M., D. Soto, A. Richard. 2008. Acuicultura en jaulas, estudios regionales y panorama mundial. FAO. Documento técnico de pesca. Rom. 498, 6-28.
- Handy, R. D., M. G. Poxton. 1993. Nitrogen pollution in mariculture: toxicity and excretion of nitrogenous compounds by marine fish. Rev. Fish. Biol. Fish. 3, 205-2041.
- Hayden, H. S., J. Blomster, C. A. Maggs, P. C. Silva, M. J. Stanhope, J. R. Waaland. 2003. Linnaeus was right all along: *Ulva* and *Enteromorpha* are not distinct genera. Eur. J. Phycol. 4, 277–294.
- Hernández, C. 2017. Condiciones biogeoquímicas alrededor de un cultivo off-shore piloto de *Seriola lalandi* en la bahía Flamenco, Chañaral, Chile. Licenciatura de Oceanografía. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Ciencias del Mar y Geografía. Escuela de Ciencias del Mar Valparaíso, Chile.
- Herrero M, E. Ibáñez. 2015. Green processes and sustainability: an overview on the extraction of high added-value products from seaweeds and microalgae. J Sup. 96: 211-216.
- Hirata, H., E. Kohirata. 1993. Culture of the sterile *Ulva* sp. in a marine fish farm. Isr. J. Aqua. 45:164–8.
- Indergaard M., J. Minsaas. 1991. Animal and human nutrition. In Guiry MD, Blunden G (eds.). Seaweed resources in Europe: Uses and potential, pp. 21–64.

- Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. 2018. Segundo Informe de Autoevaluación 94-108.
- Jirsa, D. O., K. R. Stuart, G. P. Salze, M. A. Rhodes, D. A. Davis, M. A. Drawbridge. 2014. Limiting Amino Acids in Practical Diets for California yellowtail, *Seriola lalandi*. J. World Aquacult. Soc., 45(6): 681–690.
- Jirsa, D., A. Davis, K. Stuart, M. Drawbridg. 2011. Development of a practical soy-based diet for California yellowtail, *Seriola lalandi*. Aqua. Nutr. 17(4): 869–E874.
- Kaushik S.J., K. Dabrowski, P. Luquet. 1982. Patterns of nitrogen excretion and oxygen consumption during ontogenesis of common carp (*Cyprinus carpio*). Can. J. Fish. Aquat. Sci., 39, 1095- 1105.
- Kaushik. S. J., 2000. Factores que afectan la excreción nitrogenada en teleósteos y crustáceos. Avances en nutrición acuícola, En: Civera-Cerecedo. IV Simposium internacional de nutrición acuícola. Noviembre 15-18, 1998. La Paz, B. C. S., México. 237-250.
- Koroleff, F. 1983. Determination of ammonia, en: Grashoff, K., M. Erhardt y K. Kremlin, eds. Methods of Seawater analysis. 2nd Edition, 150-157.
- Koshio, S., S. I. Teshima, A. Kanazawa, T. Watase. 1993. The effect of dietary protein content on growth, digestion efficiency and nitrogen excretion of juvenile kuruma prawns, *Penaeus japonicus*. Aqua. 113: 101-114.
- Krohnert, M. R. 2006. Los impactos ambientales de la acuicultura, causas y efectos. Misc. Cien. Cult. 28: 89-98.
- Kubler, J. E., I. R. Davison. 1993. High temperature tolerance of photosynthesis in the red alga *Chondrus crispus*. Mar. Biol. 117, 327-335.
- Leung, K. M. Y., J. C. W. Chu, R. S. S. Wu. 1998. Effects of body, weight, water temperature and retention size on ammonia excretion by the areolated grouper

(*Epinephelus areolatus*) and mangrove snapper (*Lutjanus argentimaculatus*). Ed. ELSEIVIER. Aqua. 170: 215-227.

Lora, M., C., M. Carrión, R. Hernandez. 2017. Determinación de nitratos, nitritos, fosfatos, silicatos y Hierro por micro métodos espectrofotométricos. Métodos y Herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal. Centro de investigaciones biológicas del Noroeste. 2da edición. 7:51-59

Macaya, H. 2011. Principales Ciclos de Vida en Macroalgas. http://www.algalab.com/gal_ciclo/index.html. Última vez: julio 2019.

Maetz, J., 1972. Interaction of salt and ammonia transport in aquatic organisms. In: *Nitrogen metabolism and the environment*. (J.W. Campbell and L. Goldstein, Eds), Acad. Press, pp. 105-154.

Magnusson, G., C. Larsson, L. Axelsson. 1996. Effects of high CO₂ treatment on nitrate and ammonium uptake by *Ulva lactuca* grown in different nutrient regimes. *Sci. Mar.* 60, 179–189.

Marinho, G., C. Nunes, I. Sousa-Pinto, R. Pereira, P. Rema, M. P. Valente. (2013) The IMTA-cultivated Chlorophyta *Ulva spp.* as a sustainable ingredient in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) diets. *Sprin. Sci.* 25: 1359-1367.

Marinho-Soriano E, P. C. Fonseca, M. A. Carneiro, W. S. Moreira. 2006. Seasonal variation in the chemical composition of two tropical seaweeds. *Bioresour Technol.* 18: 2402-2406.

Marsham S, G. W. Scott, M. L. Tobin. 2007. Comparison of nutritive chemistry of a range of temperate seaweeds. *Food Chem.* 100:1331-1336.

Martínez, J., 2005. Manual de la Pesca Blanca: 45 especies de Interés Comercial. Asociación de Exportadores de Pesca Blanca del Ecuador, ASOEXPEBLA. Segunda edición, 174 pp.

- Martínez, M. E. 2016. Diversidad genética y éxito reproductivo del jurel de castilla *Seriola lalandi* (Valenciennes, 1833) en cautiverio. Maestría en Ciencia. CICESE.
- Mazzola A., E. Favalaro, G. Sara. 2000. Cultivation of the Mediterranean amberjack, *Seriola dumerili* (Risso, 1810), in submerged cages in the Western Mediterranean Sea. *Aqua*. 181: 257–268.
- Molina, L. 2004. Impacto ambiental de un cultivo de jaulas en la Bahía de Melenara. Informes técnicos del Instituto Canario de Ciencias Marinas.
- Msuya, F. E., A. Neori. 2002. *Ulva reticulata* and *Gracilaria crassa*: macroalgae that can biofilter effluent from tidal fishponds in Tanzania. *Western Indian Ocean J. Mar. Sci.* 1(2), 117–126.
- Myusa, F. E., A. Neori. 2008. Effect of water aeration and nutrient load level on biomass yield, N uptake and protein content of the seaweed *Ulva lactuca* cultured in seawater tanks. *J. Appl. Phycol.* 20, 1021.1031
- Naidoo, K., G. Maneveldt, K. Ruck, J. Bolton. 2006. A comparison of various seaweed-based diets and formulated feed on growth rate of abalone in a land-based aquaculture system. *J. App. Phyc.* 18 (3-5), 437-443.
- Nakada M. 2008. Capture – based aquaculture of yellowtail. In A. Lovatelli; P.F. Holthus (eds). *Capture – based aquaculture. Global overview*. FAO Fisheries Technical Paper. N 508. Rome FAO pp. 199 – 215.
- Naldi, M., P. A., Wheeler. 2002. ¹⁵N measurements of ammonium and nitrate uptake by *Ulva fenestrata* (Chlorophyta) and *Gracilaria pacifica* (Rhodophyta): comparison of net nutrient disappearance, release of ammonium and nitrate, and ¹⁵N accumulation in algal tissue. *J. Phycol.* 38 (1), 135–144.

- Neori, A., T. Chopin, M. Troell, A. H. Buschmann, G. P. Kraemer, C. Halling, C. Yarish. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aqua*. 231(1-4), 361-391.
- Neori, A., Shpigel, M. & Ben-Ezra, D. (2000) A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. *Aquaculture* 186: 279–291
- Neori, A., F. E. Msuya, L. Shauli, A. Schuenhoff, F. Kopel, M. Shpigel. 2003. A novel three stage seaweed (*Ulva lactuca*) biofilter design for integrated mariculture. *J. Appl. Phycol.* 15 (6) 543-553.
- Neori, A., M. Troell, T. Chopin, C. Yarish, A. Critchley, A. H. Buschmann. 2007. The need for a balanced ecosystem approach to blue revolution aquaculture. *Env. Sci. Pol. Sus. Dev.* 49:3, 36-43.
- Neori, A., E. Msuya, L. Shauli, A. Schuenhoff, F. Kopel, M. Shpigel. 2003. A novel three stage seaweed (*Ulva lactuca*) biofilter design for integrates mariculture. *J. App. Phy.* 15: 543-553.
- Nelson, J. S. 1984. *Fishes of the world*. 2nd edition. John Wiley y Sons, Inc., New York. 523 p.
- Nielsen, M. M., A. Bruhn, M. B. Rasmussen, B. Olesen, M. M. Larsen, H. B. Møller. 2012. Cultivation of *Ulva lactuca* with manure for simultaneous bioremediation and biomass production. *J. App. Phy.* 24(3), 449-458.
- NRC (National Research Council), 1993. *Nutrient requirements of fish*. National Academy Press, Washington D.C., 114 pp.
- Omont, A., E. Quiroz-Guzman., D. tovar-Ramirez., A. Peña-Rodríguez. Effect of diets supplemented with different seaweed extracts on growth performance and digestive enzyme activities of juvenile withe shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of Applied Phycology*, 31(2), 1433-1442.

- Ordóñez, E. G. 2012. Evaluación nutricional y propiedades biológicas de algas marinas comestibles. Estudios " in vitro " e " in vivo ". Maestría en Ciencias. Universidad Complutense de Madrid.
- Peña-Rodríguez, A., F. J. Magallón-Barajas, L. E. Cruz-Suárez, R. Elizondo-González, B. Moll. 2016. Effects of stocking density on the performance of brown shrimp *Farfantepenaeus californiensis* co-cultured with the green seaweed *Ulva clathrata*. *Aqua. Res.* 48:2803–2811.
- Peña-Rodríguez, A., T. P. Mawhinney, D. Ricque-Marie, L. E. Cruz-Suárez. 2011. Chemical composition of cultivated seaweed *Ulva clathrata* (Roth) C. Agardh. *Food Chem.* 129: 491-498
- Peñuela, A., D. Robledo, N. Bourgougnon, G. Bedoux, E. Hernández-Núñez, Y Freile-Pelegín, Y. 2018. Environmentally friendly valorization of filiformis (Gigartinales, Rhodophyta) from IMTA Using a Biorefinery Concept. *Mar drugs.* 6: 16(12).
- Plascencia, A. E., M. D. C. Almada. 2012.. La acuicultura y su impacto al medio ambiente. *Est. Soc.* 2: 221-232.
- Pohle, G., B. Frost, R. Findlay. 2001. Assessment of regional benthic impact of salmon mariculture within the Letang Inlet, Bay of Fundy ICES. *J. Mar. Sci.* 58, 417-426.
- Porter, C. B., M. D. Krom, M. G. Robbins, L. Brickel, A. Davidson. 1987. Ammonia excretion and total N budget for Gilthead Seabream *Sparus aurata* and its effect of water quality conditions. *Aqua.* 66: 287–297.
- Ramos-Páez, R. M., W. Vásquez-Torres. 2012. Digestibilidad del fósforo en ingredientes de origen animal utilizados en dietas para cachama (*Piaractus brachypomus*). *Universidad de los Llanos.* 16 (2): 155-161.

- Regnault, M., 1987. Nitrogen excretion in marine and fresh-water crustacea. *Biol. Rev.*, 62: 1-24.
- Robaina, L., G. Corraze, P. Aguirre, D. Blanc, J. P. Melcion, S. Kaushik. 1999. Digestibility, postprandial ammonia excretion and selected plasma metabolites in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fed pelleted or extruded diets with or without wheat gluten. *Aqua*. 179: 45-56.
- Robertson-Anderson, D. V., J. J. Bolton, D. Shuuluka, L. Kandjengo. 2009. Growing *Ulva* (Chlorophyta) in integrated systems as a commercial crop for abalone feed in South Africa: a SWOT analysis. *J. App. Phy.* 21: 575-583
- Roe, J. H., J. H. Epstein, N. P. Goldstein. 1949. A photometric method for the determination of inulin in plasma and urine. *J. Biol. Chem.* 178: 839-845.
- Roo, J., C. M. Mesa-Rodriguez, H. Hernández-Cruz, M. S. Fernandez-Palacios, Izquierdo J. 2012. Review *Seriola rivoliana* culture. *J. J. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.
- Roo, J., D. Schuchardt, J. A. Socorro-Cruz, R. Guirao-Guijarro, R., C. M. Hernandez-Cruz, H. Fernandez-Palacios. 2009. Maduración y obtención de puestas de *Seriola rivoliana* en Canarias. XII Congreso Nacional de Acuicultura. Sesión de Fisiología y Reproducción.
- Rueda-Jasso, R. A., A. De los Santos-Bailón, A. L. Fuente-Farias, G. Gutierrez-Ospina. 2013. Toxicidad y buletal del fosfato de sodio dibásico y efectos en branquias y conducta de las crías del pez goodeido *Skiffia multipunctata*. *Hidro*. 24: 3.
- Rueda-Urbe, W. E., W. Vásquez-Torres, M. C. Gutiérrez-Espinosa. 2012. Digestibilidad de fósforo y proteína de raciones suplementadas con fitasa en tilapia, *Oreochromis* sp. 16: 1, 21-29.

- Ryther, J. H., J. C. Goldman, C. E. Gifford, J. E. Huguenin, A. S. Wing, J. P. Clarner, L. D. Williams, B. E. Lapointe. 1975. Physical models of integrated waste recycling-marine polyculture systems. *Aqua*. 5, 163-177.
- Salas, M. D. R., A. M. Durazo, J. M. M. Enrique. 2016. La acuicultura y su impacto en la zona costera del golfo de california/The aquaculture and their impact in the coastal zone of the Gulf of California. *Biotec*. 18(3): 37-46.
- Schuenhoff, A., M. Shpigel, I. Lupatssch, A. Ashkenazi, F. E. Msuya, A. Neori. 2003. A semi-recirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed. *Aqua*. 221 167-181.
- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2011. Anuario estadístico de acuicultura y pesca. 130-140.
- Sicuro, B., U. Luzzana. 2016. The state of *Seriola spp.* other than Yellowtail (*S. quinqueradiata*) farming in the world. *Reviews in Fish. Sci. Aqua*. 24:4, 314-325.
- Silvert, W., 1992. Assessing environmental impacts of .n.sh aquaculture in marine waters. *Aqua*. 107, 69-79.
- Singler A. W., J. Bauder. 2012. Nitrato y nitrito en aguas subterráneas. Universidad estatal de Montana. http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Nitrate%202012-11-15-SP.pdf. Última vez: Agosto 2019.
- Smith, T. K. 1990. Effect of dietary putrescine on whole body growth and polyamine metabolism. *P. S. E. B. M.* 194. 332-336.
- Smith. V. H., G. D. Tilman, J. C. Nekola. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Env. Poll.* 100: 179-196.
- Troell, M., C. Halling, A. Neori, T. Chopin, A. H. Buschman, N. Kautsky, C. Yarish. 2003. Integrated mariculture: asking the right questions. *Aqua*. 226, 69-90.

- True, C. D. 2012. Desarrollo de la biotecnia de cultivo de *Totoaba macdonaldi*. Doctorado en Ciencias. Universidad Autónoma de Baja California, La Paz, México.
- Van Waarde, A. 1983. Aerobic and anaerobic ammonia production by fish. *Comp. Biochem. Physiol.* 74B: 675-684.
- Vandermeulen, H., H. Gordin. 1990. Ammonium uptake using *Ulva* (Chlorophyta) in intensive fishpond systems: mass culture and treatment of effluent. *J. Appl. Phycol.* 2: 363-374.
- Villalobos-Medina. 2012. Utilización de las macroalgas *Ulva lactuca* y *Gracilaria parvispora* en la formulación de dietas balanceadas para el camarón blanco *Litopenaeus vannamei*. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Biologicas del Noroeste.
- Vellas, F., A. Serfaty. 1974. L'ammoniaque et l'urée chez un téléostéen d'eau douce: la carpe (*Cyprinus carpio*). *J. Physiol.* 68: 591-614.