



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Facultade de Ciencias

Grao en Bioloxía

Memoria del Trabajo de Fin de Grado

**Optimización del cultivo en tanque de “lechuga de mar”
(*Ulva ohnoi*, Ulvophyceae, Chlorophyta).**

**Optimización do cultivo en tanque de “leituga de mar” (*Ulva
ohnoi*, Ulvophyceae, Chlorophyta).**

**Optimisation of “sea lettuce” tank culture (*Ulva ohnoi*,
Ulvophyceae, Chlorophyta).**

Fernando Gondell Muíño

Curso: 2022 - 2023.

Convocatoria: Julio

Tutor: Javier Cremades Ugarte

ÍNDICE

1. Resumen	2
1.1 Abstract.....	2
1.2 Resumen	3
1.3 Palabras clave	4
2. Introducción.....	4
3. Objetivos.....	5
4. Material y métodos.....	5
4.1 La especie estudiada	5
4.2 Cultivo <i>stock</i>	6
4.3 Medios de cultivo.....	7
4.4 Diseño experimental.....	7
4.5 Determinación de nitrógeno y fósforo.	9
4.6 Determinación de las tasas de crecimiento y biofiltración.	10
4.7 Tratamiento estadístico	11
5. Resultados	11
5.1 Crecimiento.....	11
5.2 Tasa de asimilación (TA) de nitrógeno y fósforo.	12
5.3 Eficiencia de biofiltración (EB) de nitrógeno y fósforo.	13
6. Discusión.....	15
7. Conclusiones	16
8. Bibliografía	17

1. Resumen

El presente estudio investigó el efecto de diferentes longitudes de onda de luz (blanca, azul, roja y magenta) en el crecimiento y desarrollo del alga *Ulva ohnoi*. El propósito es encontrar una fuente de iluminación que permita obtener la mayor productividad, calidad del cultivo y capacidad de biofiltración, minimizando al mismo tiempo el consumo energético.

Se llevó a cabo un experimento controlado en el cual se expusieron muestras de *Ulva ohnoi* a la misma intensidad lumínica (iluminación de $350 \pm 20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), en 3 experiencias diferentes en las que se utilizaron 2 longitudes de onda distintas en cada experiencia. Se midieron parámetros de crecimiento, como la tasa de crecimiento relativa en peso húmedo, y las tasas de asimilación de nutrientes, a intervalos regulares durante 11 días.

Los resultados revelaron que las diferentes longitudes de onda de luz tuvieron efectos con diferencias significativas en el crecimiento y capacidad de biofiltración de *Ulva ohnoi*, mostrando una mayor efectividad de las luces LED azules y blancas en comparación con la luz LED roja o magenta. Por otro lado se observó que los dispositivos de luz LED roja por sí solos produjeron tasas de crecimiento considerablemente más bajas que los otros tipos de LED. Además, el consumo energético de cada tipo de luz jugó un papel importante al comparar su eficacia, variando desde los 28,3 W/h para la luz blanca hasta los 11,9 W/h para la luz roja.

Esto sugiere que la longitud de onda de la luz juega un papel importante en la fisiología y el crecimiento de *Ulva ohnoi*, lo que podría tener implicaciones para la optimización de condiciones de cultivo y la producción de esta alga en sistemas de acuicultura *indoor*.

1.1 Abstract

The present study investigated the effect of different wavelengths of light (white, blue, red, and magenta) on the growth and development of the green seaweed *Ulva ohnoi*. The purpose is to find a light source that allows obtaining the highest productivity, crop quality and biofiltration capacity, while minimizing energy consumption.

A controlled experiment was carried out in which *Ulva ohnoi* samples were exposed to the same light intensity (illumination of $350 \pm 20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), in 3 different experiments in which 2 different wavelengths were used in each experience. Growth parameters, such as relative wet weight growth rate, and nutrient assimilation rates, were measured at regular intervals for 11 days.

The results revealed that the different wavelengths of light had significantly different effects on the growth and biofiltration capacity of *Ulva ohnoi*, showing higher effectiveness of blue and white LED lights compared to pure red and magenta LED lights. On the other hand, it was observed that red LED light fixtures alone produced considerably lower growth rates than the other types of LEDs. In addition, the energy consumption of each type of light played an important role when comparing their efficiency, ranging from 28.3 W/h for white light to 11.9 W/h for red light.

This suggests that the wavelength of light plays an important role in the physiology and growth of *Ulva ohnoi*, which could have implications for the optimization of culture conditions and the production of this alga in indoor aquaculture systems.

1.2 Resumo

O presente estudo investigou o efecto de diferentes lonxitudes de onda de luz (branca, azul, vermella e magenta) no crecemento e desenvolvemento do alga *Ulva ohnoi*. O propósito é atopar unha fonte de iluminación que permita obter a maior produtividade, calidade do cultivo e capacidade de biofiltración, minimizando ao mesmo tempo o consumo enerxético.

Levou-se a cabo un experimento controlado no cal se expuxeron mostras de *Ulva ohnoi* á mesma intensidade lumínica (iluminación de $350 \pm 20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), en 3 experiencias diferentes nas que se utilizaron 2 lonxitudes de onda distintas en cada experiencia. Medíronse parámetros de crecemento, tales como a taxa de crecemento relativa en peso húmido e as taxas de asimilación de nutrientes, a intervalos regulares durante 11 días.

Os resultados revelaron que as diferentes lonxitudes de onda de luz tiveron efectos con diferenzas significativas no crecemento e capacidade de biofiltración de *Ulva ohnoi*, mostrando unha maior efectividade de lócelas LED azuis e brancas en comparación coa luz LED vermella ou magenta. Doutra banda observouse que os dispositivos de luz LED vermella por si sós produciron taxas de crecemento considerablemente máis baixas que os outros tipos de LED. Ademais, o consumo enerxético de cada tipo de luz xogou un papel importante ao comparar a súa eficacia, variando desde os 28,3 W/h para a luz branca ata os 11,9 W/h para a luz vermella.

Isto suxire que a lonxitude de onda da luz xoga un papel importante na fisioloxía e o crecemento de *Ulva ohnoi*, o que podería ter implicacións para a optimización de condicións de cultivo e a produción desta alga en sistemas de acuicultura indoor.

1.3 Palabras clave

Ulva ohnoi, espectro de luz, tasa de crecimiento, eficiencia de biofiltración, AMTI.

Ulva ohnoi, light spectrum, growth rate, biofiltration efficiency, AMTI.

Ulva ohnoi, espectro de luz, taxa de crecemento, eficiencia de biofiltración, AMTI.

2. Introducción

El aumento de la población mundial plantea un desafío a la hora de satisfacer sus necesidades nutricionales. Una opción sostenible para ello es el cultivo de macroalgas.

Las macroalgas marinas tienen una serie de características que las hacen ideales para su uso como alimento, incluyendo un alto contenido de proteínas, carbohidratos, fibra, vitaminas, minerales, así como una serie de compuestos bioactivos (antioxidantes, bactericidas, antivirales, antitumorales, etc.); además tienen un bajo contenido en lípidos (Plaza et al., 2008). Todo esto hace de las macroalgas un alimento funcional muy completo y atractivo para el consumidor, con un gran futuro en la industria alimentaria. (FAO, 2016).

La biomasa obtenida del cultivo de macroalgas, además de poder ser usada en la nutrición humana, tiene un prometedor futuro en la formulación de piensos en acuicultura (Valente et al., 2006), así como para la síntesis de nuevos materiales como biocauchos (Carrasco, 2008) o en la generación de biocombustibles (Montingelli et al., 2015), entre otras muchas y diversas aplicaciones.

Estudios previos (Wang et al., 2007) muestran que las especies del género *Ulva* Linnaeus son potencialmente ideales para la biofiltración de los efluentes acuícolas e inclusión en los sistemas de acuicultura multitrófica integrada (AMTI), pues presentan altas tasas de crecimiento y eficiencia biofiltradora, soportan concentraciones altas de nutrientes, admiten salinidades variables y, además, son fácilmente cultivables mediante técnicas de propagación vegetativa. Un interés especial de los sistemas AMTI es integrar las macroalgas en los sistemas de cultivo de peces en sistemas de recirculación de agua (RAS), donde las macroalgas podrían, en el futuro, cumplir con creces la función de los actuales filtros bacterianos necesarios para la reducción de amonio producido por los organismos animales (Alamrousi et al., 2022).

La luz es una forma de energía que puede ser absorbida por los pigmentos fotosintéticos presentes en las células de las algas. Estos pigmentos, como la clorofila a y b, capturan dicha energía y la utilizan para llevar a cabo la fotosíntesis, un proceso vital para el crecimiento de los organismos autótrofos y, por ende, las macroalgas. La tasa de

crecimiento y composición química de las algas está en función a su disponibilidad a distintos nutrientes inorgánicos y oligoelementos y, por supuesto a la intensidad y longitud de onda de la luz que utilizan como fuente de energía para realizar la fotosíntesis (Lobban y Harrison, 1994; Smayda, 2011; Richmond, 2013; Harun et al., 2014). De igual manera, algunas rutas metabólicas y la tasa de crecimiento pueden cambiar según la cantidad de luz bajo la que se cultive una determinada macroalga (Sánchez-Saavedra et al., 2016). Diferentes longitudes de onda de luz tienen efectos variables en el crecimiento y desarrollo de los organismos fotosintéticos.

Por lo tanto, la producción de macroalgas puede ser mejorada cuando se emplea luz de diferente irradiancia o espectro (Demirbas, 2011). En este sentido, el uso de iluminación con luces LED, en comparación con las luces fluorescentes, resulta atractivo por su menor consumo de energía, la duración de las lámparas y la escasa producción de calor (Glemser et al., 2016; López-Rosales, et al., 2016). Asimismo, las luces LED permiten la fácil selección de longitudes de onda específicas.

En este TFG se estudió la posible influencia de los diferentes tipos de luz LED (azul, roja, magenta y blanca) sobre el crecimiento y capacidad de biofiltración de *Ulva ohnoi* en sistemas AMTI.

3. Objetivos.

El principal objetivo de este trabajo es realizar un estudio comparativo en *Ulva ohnoi*, para analizar la influencia que los diferentes espectros de luz (dentro del rango fotosintéticamente activo de las clorofilas) tienen sobre la tasa de crecimiento y capacidad de biofiltración de nitrógeno y fósforo en sistema de AMTI. Se pretende también estudiar el papel que el uso de un tipo u otro de luz puede tener en la sostenibilidad económica y ambiental de la acuicultura.

4. Material y métodos.

4.1 La especie estudiada

En este trabajo se ha utilizado la especie *Ulva ohnoi* Hiraoka & Shimada (Ulvales, Chlorophyta), (Figura 1) especie de *Ulva* seleccionada como la más adecuada en el marco del proyecto IntegRas, para el desarrollo de los sistemas integrados peces-macroalgas en recirculación de agua (IMTA-RAS por sus siglas en inglés: Integrated multi-trophic Aquaculture-Recirculation Aquaculture System) (Casais et al., 2017).

Se trata de una especie cosmopolita en mares templado-cálidos (Miladi et al., 2018), descrita genotípicamente por primera vez en el litoral japonés (Hiraoka et al., 2003). Sus características morfológicas son las siguientes: tallos laminares diestromáticos de color verde brillante de brillo metálico y de forma orbicular, ovada u obovada, los cuales se fijan al sustrato mediante un pequeño disco. En las zonas apical y media, los tallos tienen un grosor de entre 30-50 μm , presentando dientes romos marginales solo observables al microscopio. En las regiones apicales se observan células grandes con formas poligonales o cuadrangulares, donde el cloroplasto que cubre la cara externa posee de 1 a 3 pirenoides por célula (Hiraoka et al., 2003).

Su ciclo de vida, como en todas las especies de *Ulva*, es digenético, haplo-diplofásico, diplobióntico y con alternancia isomórfica de generaciones. Puede vivir en suspensión y reproducirse por simple fragmentación (multiplicación vegetativa).



Figura 1: Alga *Ulva Ohnoi*.

4.2 Cultivo stock.

El cultivo *stock* de esta especie, empleado en los distintos ensayos, procede de una población silvestre recolectada en octubre de 2015 en la Isla de Santa Cristina (Huelva). Tras su identificación genética (mediante secuenciación del gen *rbcL*) este clon se ha mantenido en cultivo en suspensión en tanques de 160 L (Figura 2), con aireación constante, a una temperatura de $18 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$, fotoperiodo de 12:12 horas (ciclo luz:oscuridad) y salinidad 34 ‰ (compensando las pérdidas por evaporización añadiendo agua dulce).



Figura 2: Tanque de cultivo *stock*.

4.3 Medios de cultivo

El medio de cultivo del *stock* consistió en agua de mar enriquecida con $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de nitrógeno (a partir de NaNO_3), $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de fósforo (a partir de NaH_2PO_4), con la idea de recrear un efluente de piscifactoría y $0,5\cdot\text{L}^{-1}$ mL de solución de oligoelementos (Tabla 1).

Tabla 1: Composición química de la solución de oligoelementos

Oligoelementos	g para 1L
$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	14
$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	14
$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1,6
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0,5
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,2
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,05

Para las experiencias en la cámara de simulación ambiental, los medios de cultivo utilizados se prepararon con agua marina con una salinidad final del 34‰. Las concentraciones utilizadas de nitrógeno y fósforo para cada nivel experimental son las mismas que en el cultivo *stock*.

4.4 Diseño experimental

Para estudiar la repercusión de los distintos espectros de luz se diseñaron experimentos de cultivo de *Ulva ohnoi* en un medio de cultivo enriquecido en nutrientes (N, P) de

forma semejante al que se podría encontrar en un sistema de cultivo de peces en RAS. Concentraciones fijas de nitrógeno (N) y fósforo (P) de 20 y 1 mg·L⁻¹, respectivamente.

En las experiencias comparativas entre los distintos tipos de luz se utilizaron ocho placas para cultivos celulares de seis pocillos de 10 ml de la marca Falcon®. Las placas fueron mantenidas en una cámara de simulación ambiental Liebherr® con unas condiciones de temperatura de 18 ± 0,2 °C, iluminación de 350 ± 20 μmol·m⁻²·s⁻¹ (de los distintos tipos de luz) mediante paneles led MaxiLED (FITA LED 5050 60SMD 10MM 12V), fotoperiodo 12:12 de luz:oscuridad y una agitación de 50 rpm mediante un agitador Skyline shaker Dos-20L.

Las características generales de las diversas experiencias se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Características de las distintas experiencias.

Consumo según color LED				
Color LED	Luz azul	Luz roja	Luz magenta	Luz blanca
Consumo	11,9 W/h	15,0 W/h	22,4 W/h	28,3 W/h
Distancia para una intensidad lumínica de 350 μmol·m ⁻² ·s ⁻¹				
Luz azul-Luz roja	28 cm	9 cm		
Luz azul-Luz magenta	28 cm		28 cm	
Luz azul-Luz blanca	28 cm			36 cm

En cada pocillo de las placas se cultivó un disco de 2 cm de diámetro que fue obtenido de los ejemplares de *Ulva ohnoi* procedentes del cultivo *stock*. Los discos se obtuvieron mediante perforación de la lámina con un sacabocados (cilindro de acero inoxidable). Se seleccionaron 96 discos de entre un total de 110 confeccionados inicialmente.

El peso húmedo inicial se obtuvo retirando el exceso de agua mediante contacto con papel de filtro y su peso utilizando la báscula de precisión RadWag Ps600.R2.

Con cada combinación de luces las experiencias se llevaron a cabo a lo largo de 11 días, durante los cuales se realizaron las siguientes tareas:

- El primer día se pusieron los discos en las placas de cultivo con medio procedente del tanque del cultivo *stock*. Durante los cuatro primeros días no se cambia el medio de cultivo, con el fin de su aclimatación a las nuevas condiciones de luz.

- El quinto día se obtuvo el peso húmedo de todos los discos (obteniendo así el peso húmedo inicial), y se inició la semana experimental para cada condición, realizándose el cambio de medio cada dos días hasta el final de cada experiencia, conservando muestras del agua retirada en cada momento para su posterior análisis y estima de biofiltración de N y P.
- El undécimo día finaliza el experimento y se pesan de nuevo los discos, obteniendo así el peso húmedo final, que nos permitirá obtener la tasa de crecimiento tras la semana de experimentación.

Las placas fueron cambiadas de posición rotativamente en sentido horario una vez al día, durante los 11 días que duró la experiencia, con el fin de que todas las placas de cada tipo de luz estuviesen sujetas a unas condiciones similares a lo largo del experimento.

Estas experiencias se hicieron comparando por pares la luz azul frente a la roja, magenta y blanca.

4.5 Determinación de nitrógeno y fósforo.

El análisis del nitrógeno y el fósforo se realizó con un espectrofotómetro HP 8344 UV-Visible. (Figura 3)



Figura 3: Espectrofotómetro.

Para la determinación de nitrógeno se usó el método APHA (1992) basado en la medida de la absorción al UV del ión nitrato a 220 nm.

Para la determinación del fósforo se usó el método de Grasshoff et al. (1999), método colorimétrico que consiste en la reducción y unión del molibdeno y el fósforo, dando lugar a una molécula coloreada cuya absorbancia es a 880 nm.

4.6 Determinación de las tasas de crecimiento y biofiltración.

Para estudiar los efectos de la luz sobre el crecimiento de *U. ohnoi* se analizaron los siguientes factores:

Tasa de crecimiento relativo TCR (% · d⁻¹)

$$TCR = \frac{100 \cdot \ln\left(\frac{P_f}{P_o}\right)}{t}$$

Siendo:

- Pf: Peso final
- Po: Peso inicial
- t: Tiempo transcurrido (días: d)

El peso húmedo se determinó mediante la báscula de precisión RadWag Ps600.R2. Antes del pesado se retiró la película de agua de la superficie del disco con papel de filtro.

Tasa de asimilación TA (mg · L⁻¹ · d⁻¹)

$$TA = \frac{Co - Cf}{t}$$

Siendo:

- Co: Concentración inicial del nutriente
- Cf: Concentración final del nutriente
- t: Tiempo transcurrido (días: d)

Eficiencia de biofiltración EB (%)

$$EB = \frac{Co - Cf}{Co} \cdot 100$$

Siendo:

- Co: Concentración inicial del nutriente
- Cf: Concentración final del nutriente

4.7 Tratamiento estadístico

Se calculó la media y la desviación estándar de todos los parámetros estudiados.

Para analizar la hipótesis de que el efecto del espectro de la luz sobre el crecimiento de *U. ohnoi* no es diferente entre los distintos niveles de luz ensayados (hipótesis nula) se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con un nivel de significación del 95%. En caso de ser rechazada la hipótesis nula, se utiliza el test de rango múltiple de Turkey con un nivel de significación del 95% (p-valor < 0,05).

Para el análisis de los datos se utiliza el programa estadístico Minitab 18 y los gráficos se realizan con el programa Microsoft® Excel 2013.

5. Resultados

Los resultados obtenidos en el análisis de las muestras de *Ulva ohnoi* provenientes de los diferentes experimentos se presentan por separado para cada parámetro.

5.1 Tasa de Crecimiento Relativo (TCR).

En el siguiente gráfico (Figura 4) podemos observar que la luz blanca presenta diferencias significativas en la tasa de crecimiento de *Ulva .ohnoi* frente a la luz azul ($9,4 \pm 0,15$ % luz blanca y $8,24 \pm 0,1$ % luz azul), del mismo modo que también las presenta la luz azul frente a la luz roja ($7,7 \pm 0,2$ % luz azul y $6,3 \pm 0,2$ % luz roja) (En las dos experiencias, p-valor < 0,001). Por otro lado, la tasa de crecimiento de luz azul frente a la magenta ($9,9 \pm 0,2$ % luz azul y $9,9 \pm 0,2$ % luz magenta) no es estadísticamente significativa (p-valor = 0,785)

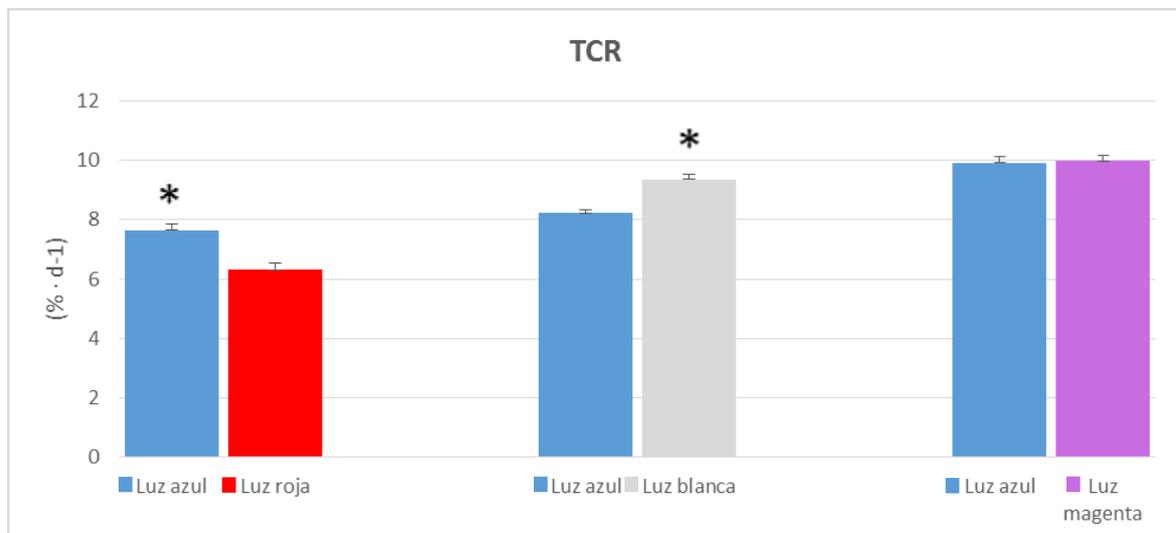


Figura 4: tasa de crecimiento (%·d⁻¹) para las tres combinaciones de luz realizadas. El asterisco (*) indica aquellos casos en los que se encontraron diferencias significativas.

5.2 Tasa de asimilación (TA) de nitrógeno y fósforo.

Tasa de asimilación de nitrógeno (TAN):

Los datos representados en la Figura 5 muestran la tasa de asimilación del nitrógeno en todos los tipos de luz.

Aunque las diferencias no son significativas en el caso del ensayo luz azul-luz blanca (p -valor = 0,214) sí son significativas tanto en la experiencia de luz azul-luz roja (p -valor < 0,001), como en la experiencia de luz azul-luz magenta (p -valor < 0,001).

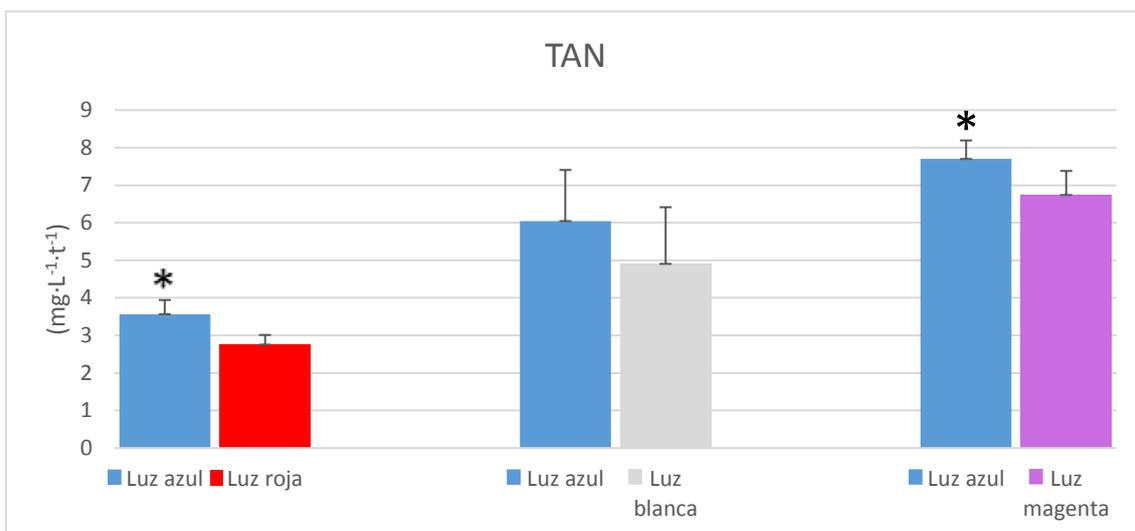


Figura 5: Tasa de asimilación de nitrógeno (mg.L⁻¹.t⁻¹) para los diferentes tipos de luz testados (luz azul, luz blanca, luz magenta y luz roja)
El asterisco (*) Indica aquellos casos en los que se encontraron diferencias significativas

Tasa de asimilación del fósforo (TAP):

Los datos de la Figura 6 muestran la tasa de asimilación de fósforo.

Las diferencias en las tasas de asimilación de P según el tipo de luz utilizada, son estadísticamente significativas en la experiencia de luz azul-luz blanca (p -valor = 0,001) así como en la experiencia de luz azul-luz magenta (p -valor = 0,021). Las diferencias no son significativas en la experiencia luz azul-luz roja (p -valor = 0,072).

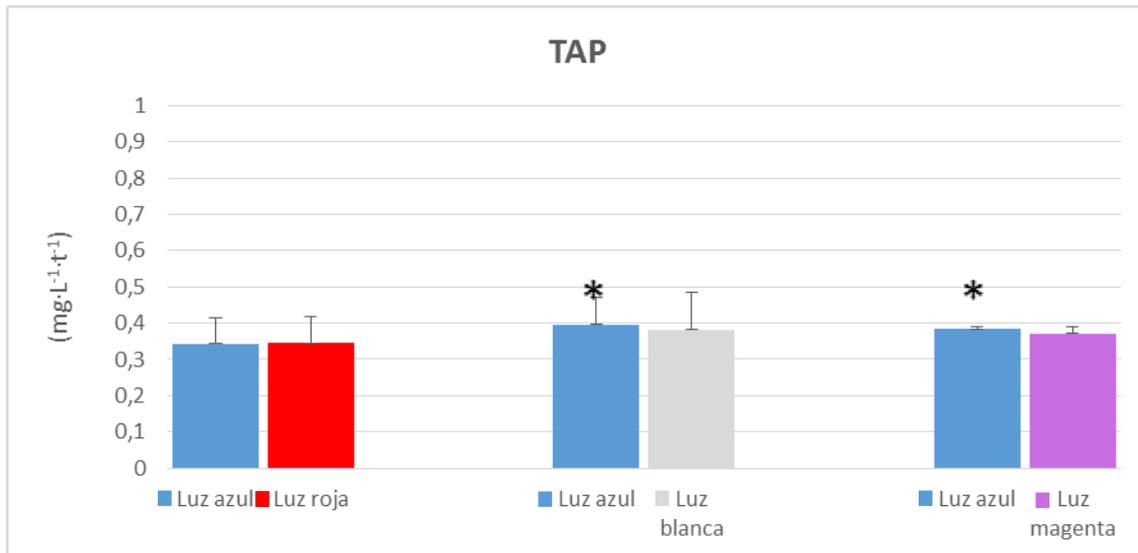


Figura 6: Tasa de asimilación del fósforo ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{t}^{-1}$) para los diferentes tipos de luz testados (luz azul, luz blanca, luz magenta y luz roja)
El asterisco (*) Indica aquellos casos en los que se encontraron diferencias significativas

5.3 Eficiencia de biofiltración (EB) de nitrógeno y fósforo.

Por otro lado, la eficiencia de biofiltración nos muestra resultados análogos:

Los datos representados en la Figura 7 muestran la eficiencia de la biofiltración de N.

- Las diferencias, en lo que respecta a la eficiencia de la biofiltración de nitrógeno, no son significativas ($p\text{-valor} = 0,214$) en el caso de la luz azul-luz blanca
- Las diferencias sí son estadísticamente significativas en el caso de las otras experiencias: luz azul-luz roja y luz azul-luz magenta con un $p\text{-valor} < 0,001$ en los dos casos.
- En todos los casos la mayor eficiencia media se observa con la luz azul.

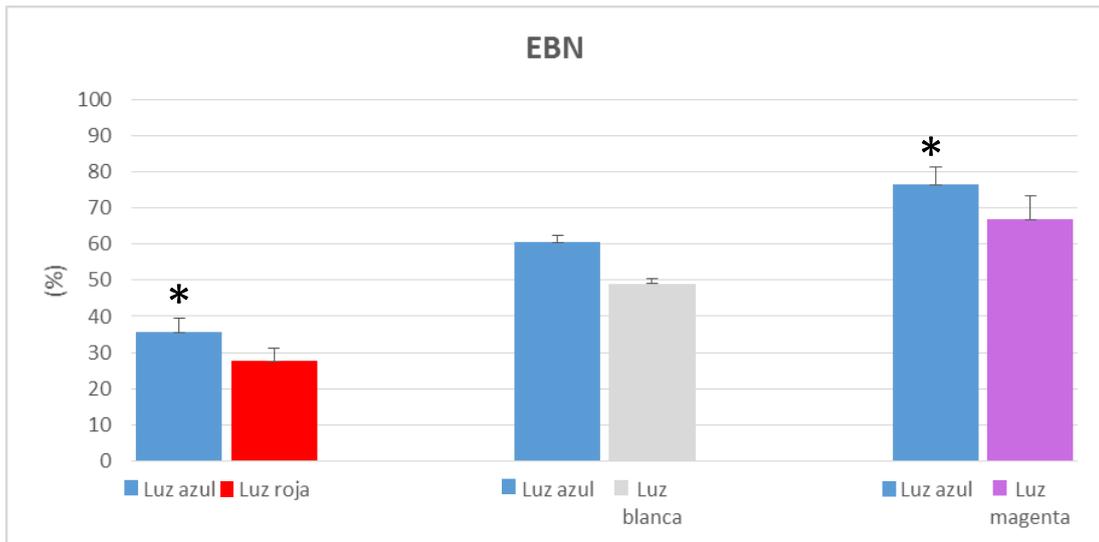


Figura 7: Eficiencia de biofiltración de nitrógeno (%) para los diferentes tipos de luz testados (luz azul, luz blanca, luz magenta y luz roja)

El asterisco (*) Indica aquellos casos en los que se encontraron diferencias significativas

Los datos representados en la Figura 8 muestran la eficiencia de la biofiltración de P.

- Las diferencias según los colores de luz empleados no son significativas en la experiencia luz azul-luz roja (p -valor = 0,057) pero sí son estadísticamente significativos en las otras experiencias: p -valor < 0,001 en el caso de la experiencia luz azul-luz blanca y p -valor = 0,021 en la experiencia luz azul-luz magenta.
- En los casos con diferencias significativas la mayor eficiencia media se observa con la luz azul.

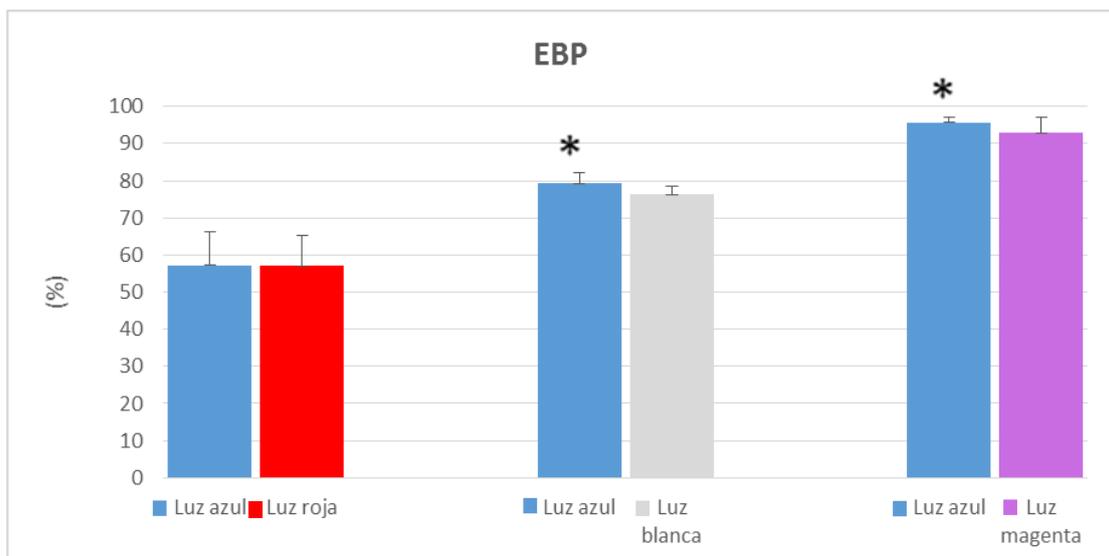


Figura 8: Eficiencia biofiltración de fósforo (%) para los diferentes tipos de luz testados (luz azul, luz blanca, luz magenta y luz roja)

El asterisco (*) Indica aquellos casos en los que se encontraron diferencias significativas

6. Discusión

Tanto la luz como la concentración de nutrientes son factores cruciales que pueden influir en la productividad de los sistemas acuícolas, según Harrison y Hurd (2001). Un estudio llevado a cabo por Malta y Verschuure (1997) demostró que la cantidad de fósforo presente en el agua y la luz explicaban gran parte de la variación en la tasa de crecimiento de *Ulva*. Los trabajos realizados por Villares et al. (1999), Buschmann et al. (2004), Harrison y Hurd (2001), y Hernández et al. (2008) mencionan una interacción entre el nitrógeno y el fósforo y concluyeron que el fósforo tiene un papel más importante que el nitrógeno en el crecimiento y la producción de las especies de *Ulva*. Además, la relación N:P en el tejido de las algas puede regular su eficiencia de biofiltración, ya que este ratio controla la tasa de asimilación para mantener la proporción en su nivel óptimo, según Harrison y Hurd (2001).

El presente estudio examinó el impacto de distintas longitudes de onda de luz (blanca, azul, roja y magenta) en el crecimiento y capacidad de biofiltración de N y P del alga *Ulva ohnoi*. Los resultados obtenidos revelaron que las diferentes longitudes de onda de luz tuvieron efectos significativamente diferentes en estas variables.

Los resultados evidencian diferencias significativas en la tasas de crecimiento y en la eficiencia de biofiltración de N y P, en la mayor parte de las experiencias. Adicionalmente, la mayoría de las diferencias significativas revelan resultados más favorables para la luz azul, sobre todo si hacemos un balance energético.

Tanto la luz azul como la luz blanca promovieron un crecimiento más notable que la luz roja o magenta; siendo la luz roja la que ha presentado peores resultados. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas (Huang et al., 2021) y estudios similares con *Ulva lactuca* (Gong et al., 2020) en los que se pone de manifiesto que las luces LED rojas conllevan tasas de crecimiento más bajas que las luces LED azules.

La luz blanca proporcionó mejores resultados que la luz azul en algún caso. A pesar de ello, hay que tener presente las diferencias en el consumo energético de ambas luces LED, en este caso favorable a la luz azul (Tabla 2). Los resultados de crecimiento para la luz blanca, que contiene un espectro completo de colores, puede ser consecuencia de que ésta está constituida por varias longitudes de onda de forma que es capaz de proporcionar una combinación equilibrada de los diferentes componentes de luz necesarios para el crecimiento del alga.

Es importante tener en cuenta que lo anteriormente concluido hace referencia únicamente a los resultados obtenidos en la TCR. Sin embargo, teniendo en cuenta la tasa de asimilación y la eficiencia de la biofiltración, la luz LED azul ha dado los mejores resultados en todas las experiencias.

La importancia de la longitud de onda de la luz en la fisiología y el crecimiento de *Ulva ohnoi* es relevante para la optimización de las condiciones de cultivo y la producción de esta alga en sistemas de acuicultura *indoor*. Los resultados sugieren que manipular la composición espectral de la luz en los sistemas de cultivo puede ser una estrategia efectiva para mejorar la productividad y sostenibilidad de los sistemas AMTI-RAS, en este caso usando *Ulva ohnoi* como productor primario.

En la experiencia realizada con la luz azul y la luz magenta no se encontraron diferencias significativas en la TCS. La luz magenta, que principalmente consiste en la mezcla de luz azul con roja, ha demostrado ser efectiva en el crecimiento del alga *Ulva ohnoi*. Esto sugiere que la combinación de luz azul y roja puede tener un impacto sinérgico en el crecimiento de la especie. En este caso, es oportuno tener en cuenta el consumo energético de cada una de ellas y la repercusión económica que conlleva su utilización. Según vemos en la Tabla 2, el consumo de la luz azul es casi la mitad que el de la luz magenta lo que nos llevaría a optar por la luz azul. Así mismo, el consumo energético de la luz azul es un tercio menor que el consumo energético de la luz blanca de modo que cuando no se encuentran diferencias significativas entre ellas, debemos optar por la luz azul.

Estos análisis están basados en las mediciones de tasa de crecimiento y asimilación de nutrientes (fosforo y nitrógeno), y podrían ser complementados en futuras investigaciones con otros parámetros relevantes, o con duraciones más amplias en el tiempo, para una comprensión más completa de los efectos de las diferentes longitudes de onda de luz sobre esta especie. Es importante evaluar los efectos a largo plazo de la exposición a diferentes longitudes de onda y comprender cómo estos cambios en la luz pueden afectar la tasa de crecimiento y calidad nutricional de *Ulva ohnoi*.

7. Conclusiones

Basado en los datos recopilados sobre el crecimiento y capacidad de biofiltración de N y P del alga verde *Ulva ohnoi* bajo diferentes longitudes de onda de luz (azul, roja, magenta y blanca), se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las luces azul y blanca han demostrado ser las mejores para el crecimiento y capacidad de biofiltración de *Ulva ohnoi*. La luz azul tiene como ventaja añadida un menor consumo energético.
- Por el contrario, la luz roja tuvo los resultados menos favorables en el crecimiento del alga *Ulva ohnoi*.
- Teniendo en cuenta todos los parámetros estudiados así como el consumo energético de cada una de las luces LED estudiadas, podemos concluir que la

luz azul es la luz de elección para el uso de esta especie en sistemas *indoor*, sobre todo en sistemas AMTI-RAS.

8. Bibliografía

- Alamrousi, Ahmed, Eduardo Casais, Érika García-Cardesín, Ingrid Masaló, José Pintado, and Javier Cremades. 2022. "Influence of pH, N, P, N: P Ratio, and Dissolved Inorganic Carbon on *Ulva ohnoi* Growth and Biomass Quality: Potential Implications in IMTA-RAS" *Aquaculture Journal* 2, no. 4: 285-301. <https://doi.org/10.3390/aquaci2040017>.
- APHA, (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18th Edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF), Washington DC.
- Buschmann, A.H. 2004. Experimental indoor cultivation of the carrageenophytic red alga *Gigartina skottsbergii*. *Aquaculture*, 241(1–4), pp.357–370.
- Carrasco, F. (2008). Biocauchos que nacen en el mar. *Ambienta*, 83:45-52
- Casais, E., Couce, A., Alamrousi, A. & Cremades, J. (2017). Calidad comercial de distintas especies de *Ulva* (Ulvales, Chlorophyta) potencialmente cultivables en sistemas de acuicultura multitrófica integrada (AMTI) en recirculación (RAS). In: Rey- Méndez, M., Lodeiros, C., Fernández Casal, J. & Guerra A. (Eds.) *Foro dos Recursos Mariños e da Acuicultura das Rías Galegas*. 19, 227-234
- Demirbas, M.F. (2011). Biofuels from algae for sustainable development. *Applied Energy*, 88, 3473-3480. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.059>
- FAO. (2016). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*. Roma, 2016.
- Glemser, M., Heining, M., Schmidt, J., Becker, A., Garbe, D., Buchholz, R. & Brück, T. (2016). Application of light-emitting diodes (LEDs) in cultivation of phototrophic microalgae: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 100(3), 1077–1088. <https://doi.org/10.1007/s10020-016-0250-4>
- Gong J, Liu Z, Zou D. 2020. Growth and photosynthetic characteristics of *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) and *Ulva lactuca* (Chlorophyta) cultured under fluorescent light and different LED light. *Journal of Applied Phycology*. DOI: 10.1007/s10811-020-02151-y.
- Grasshoff, K., Kremling, K. & Ehrhardt, M. (1999). *Methods of seawater analysis*. Weinheim (Federal Republic of Germany): Wiley-vch.

- Harrison, P.J. & Hurd, C.L., 2001. Nutrient physiology of seaweeds: Application of concepts to 23 aquaculture. *Cahiers de Biologie Marine*, 42(1–2), pp.71–82.
- Harun, I., Yahya, L., Chik, M.N., Kadir, N.N.A. & Pang, M.A.M.A. (2014). Effect of natural light dilution on microalgae growth. *Int. J Chem. Eng. Appl.*, 5,112-116. [https://doi: 10.7763/IJCEA.2014.V5.362](https://doi.org/10.7763/IJCEA.2014.V5.362)
- Hernández, I., Pérez-Pastor, A., Mateo, J. J., Megina, C., Vergara, J. J. 2008. Growth dynamics of *Ulva rotundata* (Chlorophyta) in a fish farm: Implications for biomitigation at a large scale. *Journal of Phycology*, 44(4), pp.1080–1089.
- Hiraoka, M., Shimada, S., Uenosono, M. & Masuda, M. (2003). A new green-tide- forming alga, *Ulva ohnoi* Hiraoka et Shimada sp. nov. (Ulvales, Ulvophyceae) from Japan. *Phycological Research*, 51, 17-29.
- Huang, S., Li, K., Pan, Y., Yu, Y., Wernberg, T., De Bettignies, T., Wu, J., Zhou, C., Huang, Z., & Xiao, X. (2021). Artificial light source selection in seaweed production: growth of seaweed and biosynthesis of photosynthetic pigments and soluble protein. *PeerJ*, 9, e11351. <https://doi.org/10.7717/peerj.11351>
- Lobban, C. S., & Harrison, P. J. (1994). *Seaweed ecology and physiology*. Cambridge University Press.
- López- Rosales, L., García – Camacho, F., Sánchez – Mirón, A., Martín Beato, E., Chisti, Y. & Molina Grima, E. (2016). Pilot-scale bubble column photobioreactor culture of a marine dinoflagellate microalga illuminated with light emission diodes. *Bioresource Technology*, 216, 845-855. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.027>.
- Malta, E. J., & Verschuure, J. M. (1997). Effects of environmental variables on between-year variation of *Ulva* growth and biomass in a eutrophic brackish lake. *Journal of Sea Research*, 38(1-2), 71-84.
- Miladi, R., Manghisi, A., Armeli Minicante, S., Genovese, G., Abdelkafi, S. & Morabito, M. (2018). A DNA barcoding survey of *Ulva* (Chlorophyta) in Tunisia and Italy reveals the presence of the overlooked alien *U. ohnoi*. *Cryptogamie, Algologie*, 39 (1), 85-107.
- Montingelli, M. E., Tedesco, S. & Olabi, A. G. (2015). Biogas production from algal biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43: 961-972.
- Plaza, M., Cifuentes, A. & Ibáñez, E. (2008). In the search of new functional food ingredients from algae. *Trends in Food Science & Technology* 19: 31-39.
- Richmond, A., Hu, Q. (2013). *Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology*. Wiley, Oxford.
- Sánchez-Saavedra, M.P., Maeda-Martínez, A.N. & Acosta-Galindo, S. (2016). Effect of different light spectra on the growth and biochemical composition of *Tisochrysis lutea*. *J. Applied Phycology*, 28: 839-847. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0656-8>.

- Smayda, T. J. (2011). Cryptic planktonic diatom challenges phytoplankton ecologists. *Proceed. Nat. Acad. Sci.*, 108, 4269–4270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100997108>.
- Valente L. M. P., Gouveia A., Rema P., Matos J., Gomes E. F. & Pinto I. S. (2006). Evaluation of three seaweeds *Gracilaria bursa-pastoris*, *Ulva rigida* and *Gracilaria cornea* as dietary ingredients in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. *Aquaculture* 252: 85-91.
- Vázquez-Suárez, A., Guevara, M., González, M., Cortez, R. & Arredondo-Vega, B. (2013). Crecimiento y composición bioquímica de *Thalassiosira pseudonana* (Thalassiosirales: Thalassiosiraceae) bajo cultivo semi-continuo en diferentes medios y niveles de irradiancias. *Rev. Biol. Trop.*, 61(3), 1003-1013. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S003477442013000400002&script=sci_arttext
- Villares, R., Puente, X. & Carballeira, A., 1999. Nitrogen and phosphorus in *Ulva* sp. in the Galician Rias Bajas (northwest Spain): Seasonal fluctuations and influence on growth. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.*, 15(1–4), pp.337–341.
- Vizcaíno, A. J., Mendes, S. I., Varela, J. L., Ruiz-Jarabo, I., Rico, R., Figueroa, F. L., Abdala, R., Moriñigo, M- A., Mancera, J. M. & Alarcón, F. J. (2015). Growth, tissue metabolites and digestive functionality in *Sparus aurata* juveniles fed different levels of macroalgae, *Gracilaria cornea* and *Ulva rigida*. *Aquaculture Research*, 1-15.
- Wang, H., Liu, C., Qin, C., Cao, S., Ding, J. 2007. Using a macroalgae *Ulva pertusa* biofilter in a recirculating system for production of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Aquacultural Engineering*, 36(3): 217–224.