

Nuevos índices para evaluar distintos tipos de luz LED y fluorescente en el cultivo de fitoplancton utilizados en criaderos de moluscos bivalvos

New indices to evaluate different types of LED and fluorescent light in phytoplankton culture used in bivalve mollusc hatcheries

Miguel Lastres¹, Fiz Da Costa², Alfonso N. Maeda-Martínez³, Isabel Figueira¹, Elena Casais¹

¹Instituto Galego de Formación en Acuicultura (IGAGA) Consellería do Mar. Xunta de Galicia. C/ Niño do Corvo, s/n. Illa de Arousa. 36626 Pontevedra. Galicia. España

²Centro de Investigación Marina (CIM) - Universidade de Vigo. Illa de Toralla, Coruxo 36631 Vigo. Galicia. España

³Unidad Nayarit del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. 62173 Tepic, Nayarit, México.

Correspondencia: Miguel Lastres Couto,  E-mail: miguel.anxo.lastres.couto@xunta.es

Artículo original | Original article

Palabras clave
Índice
Comparación
LED
Luz
Fluorescente
Microalgas

Keywords
Index
Comparison
LED
Fluorescent
Light
Microalgae

RESUMEN | Para facilitar la toma de decisiones en cultivos de organismos fotoautótrofos, se proponen distintos índices que permiten evaluar, de modo efectivo la productividad de los sistemas al emplear diferentes tipos de luz. El coste lumínico por célula producida, se obtiene mediante el indicador Consumo Lumínico Celular (CLC). El rendimiento de cada fuente luminosa, con la Densidad Máxima por Potencia Instalada (DMPI). El Factor de Comparación de Producción (FCP) calcula las células obtenidas con cada tipo de iluminación, teniendo en cuenta la potencia instalada y el tiempo requerido de cultivo. El Factor de Elección de Luz (FEL) expresa el coste celular por W empleado, teniendo en cuenta la productividad celular obtenida, así como la vida útil y el precio de adquisición de cada lámpara. Se ensayaron 3 modelos de luminarias comerciales, (2 LED, y una fluorescente) en el cultivo de 4 especies de microalgas (*Tetraselmis suecica*, *Isochrysis galbana*, *Diacronema lutheri*, y *Skeletonema costatum*), utilizadas con frecuencia en criaderos de moluscos bivalvos. Los resultados mostraron que con recuentos celulares y aplicando los índices presentados en esta publicación se puede llegar a determinar la eficiencia del tipo de luz empleada en instalaciones industriales donde se realice la producción de fitoplancton con iluminación artificial.

ABSTRACT | To facilitate decision-making in cultures of photoautotrophic organisms, different indices are proposed that allow to effectively evaluate the productivity of the systems when using different types of light. The first index defined was the light cost per cell produced, using the Cellular Light Consumption (CLC) indicator. The performance of each light source was addressed using the Maximum Density per Installed Power (DMPI) and a Production Comparison Factor (FCP) was calculated, which indicates the cells obtained for each type of lighting, taking into account the installed power and the cultivation time. Finally, the Light Choice Factor (FEL) was described, which expresses the cell cost per W used, taking into account the cell productivity obtained as well as the service life and the purchase price of each type of lamp. To test the effectiveness of this type of indices, 3 different commercial lighting references were tested (2 LED lights, and one fluorescent light) used for the cultivation of 4 species of microalgae (*Tetraselmis suecica*, *Isochrysis galbana*, *Diacronema lutheri*, and *Skeletonema costatum*), frequently used in bivalve mollusc hatcheries. The results showed that with cell counts and applying the indices presented in this publication it is possible to determine the efficiency of the type of light used in industrial facilities where phytoplankton production is carried out with artificial lighting.

INTRODUCCIÓN

Se ha estimado que el mantenimiento de sistemas de producción de microalgas supone en promedio un 30% de los costes operativos de los criaderos de bivalvos, pudiendo ascender hasta el 60% (Coutteau y Sorgeloos, 1992). Esto ha hecho que se haya propiciado el empleo de nuevos sistemas de iluminación más eficientes y de menor consumo energético, entre los que se encuentran las luces de tipo L.E.D. (*Light Emitting Diode*). Por ello, existe la necesidad de disponer de herramientas de cálculo que permitan decidir,

de modo consistente, si resulta conveniente o no un cambio de tipo de iluminación en las diferentes instalaciones, previamente equipadas con tipos de iluminación convencional.

Los indicadores que se presentan en este trabajo también tienen utilidad para seleccionar la fuente de luz que permite ofrecer un menor coste por célula producida, y para ello se exponen resultados obtenidos en ensayos de cultivo de 4 especies de microalgas, empleadas con frecuencia en criaderos de moluscos bivalvos (Robert y Trintignac, 1997), utilizando 3 tipos de luz diferentes en dichos cultivos.

Una adecuada medición de la potencia eléctrica instalada dedicada a la producción de luz fotosintéticamente activa, incide directamente en la reducción del impacto ambiental derivado de las actividades productivas, en instalaciones diseñadas para la producción de fotoautótrofos (Vásquez-Villalobos *et al.*, 2013).

Desde que se ha producido la incorporación de las luces LED en diferentes aplicaciones de uso convencional, existen en el mercado gran número de modelos y marcas de luminarias de este tipo que ofrecen intensidades lumínicas mayores con menor potencia nominal instalada. Por ello parecería interesante, *a priori*, abordar en los criaderos la sustitución de lámparas de mayor potencia por otras de una potencia menor, y de ese modo poder reducir el coste energético en dichas instalaciones.

El problema está en que los equipos disponibles a mejor precio se han diseñado para aplicaciones diferentes a las de la producción de microalgas (Kim, 2015) y las especificaciones comerciales no suelen aportar datos de efectividad fotosintética, por lo que requieren de ensayos previos.

Por este motivo, el objetivo de este estudio consistió en desarrollar un método que fuese fácilmente aplicable en los criaderos (Helm *et al.*, 2013), partiendo únicamente de recuentos celulares y que permitiese la toma de decisiones adecuada, a partir de los valores obtenidos para los indicadores que se muestran en la presente publicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevaron a cabo ensayos de cultivo para un total de 4 especies de microalgas frecuentemente utilizadas en criaderos: *Tetraselmis suecica* (*Ts*), *Isochrysis galbana* (*Ig*), *Diacronema lutheri* (sin. *Pavlova lutheri*) (*Dlu*), y *Skeletonema costatum* (*Skc*), mantenidas en el interior de una cámara isoterma, con un sistema de aire acondicionado, que permitió disponer de una temperatura de 18 a 22°C. (Edwards *et al.*, 2016)

Se diseñó un sistema de estanterías opacas para obtener el aislamiento lumínico y evitar la incidencia de cualquier otra luz (Bouman *et al.*, 2018) en la zona de experimentación.

Se realizaron dos réplicas con los tres tipos de luz simultáneamente (dos de tipo LED y una de tipo fluorescente), de modo que se utilizó una estantería por cada luz ensayada:

-“Matel Fluoled” de 29 mm de diámetro, 120 cm de longitud, 18W, 1.800 lúmenes, color de luz 6.400°K, ángulo de apertura de 120° , con una vida útil de 50.000 horas.

-“Ecolux Iris led” de 29 mm de diámetro, 120 cm de longitud, 18W, 1.800 lúmenes, color de luz 6.000°K, ángulo de apertura de 180°, vida útil de 40.000 horas.

-“Osram Lumilux 840” de 29 mm de diámetro, 120 cm de longitud, 36W, 3.350 lúmenes, color de luz 4.000° K, ángulo de apertura de 360°, y vida útil de 20.000 horas.

La temperatura del agua en el interior de los cultivos (Shatwell *et al.*, 2012) se registró de forma continua, utilizando un equipo sumergible, marca HOBBO®, modelo Water Temp Pro v2 (U22-001) con una histéresis de 1 dato por minuto, y una precisión de $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$.

Los cultivos de cada especie de microalga se llevaron a cabo por duplicado para cada tipo de iluminación, en matraces esféricos de vidrio de tipo borosilicato con una capacidad de 6 L, empleando aireación en continuo. En todos los casos se mantuvo un fotoperiodo de 24 h continuas de iluminación. (Meseck *et al.*, 2005).

Se empleó agua de mar filtrada (mediante filtro de cartucho PALL de 0,5µm nominal), con una salinidad de 35±1 UPS. El volumen de cultivo se midió mediante probeta de polipropileno autoclavable de 2 L con una precisión de 2.000±20mL, y se esterizaron todos los elementos del reactor mediante autoclave (121°C ±0,36°C, durante 20 minutos).

Los reactores se enriquecieron, 24 h después del autoclavado, utilizando la formulación y dosis clásicas del medio Walne (dosis 1mL/L de solución de macronutrientes y oligoelementos; 0,1 mL/L de solución de vitaminas; y 1mL/L de solución de silicato sódico al 3%, en el caso de las diatomeas), en condiciones de esterilidad en el interior de la cabina de flujo laminar Telstar modelo AV-100 (filtros HEPA/ULPA H14 con una eficiencia de filtración > 99.999% DOP Clase 10). En los casos en los que los cultivos fueron de larga duración se repusieron nutrientes en las mismas dosis para evitar la fase descendente (Lastres *et al.*, 2009).

El inóculo se realizó a partir de cultivos en condiciones gnotobióticas, de 200 mL de volumen, mantenidos en matraz Erlenmeyer de 250 mL. Para intentar que todos los matraces de 6 L partiesen de la misma población inicial, se realizó un proceso previo, consistente en la mezcla y homogeneización en matraz Erlenmeyer de 1 L de capacidad (en condiciones de esterilidad), utilizando 3 cepas de 200 mL cada una. Posteriormente se procedió al reparto de 100 mL en cada reactor como inóculo inicial. Para ello se utilizó una probeta esterilizada de vidrio de borosilicato de 250 mL con una precisión de ±1,5 mL.

Las densidades celulares iniciales para cada especie se muestran en la Tabla 1. Estos datos pueden permitir la replicación de las condiciones de este estudio y facilitar posteriores ensayos de cultivo con otras luces (Yang *et al.*, 2020) y/o fabricantes.

Tabla 1.- Densidades iniciales por especie de microalga

	Densidades iniciales (c/µL)
<i>Isochrysis galbana</i>	52,4
<i>Diacronema lutheri</i>	24,8
<i>Tetraselmis suecica</i>	13,0
<i>Skeletonema costatum</i>	12,3

Los ensayos de los tres tipos de iluminación se realizaron en 6 reactores de forma simultánea (Charalampous *et al.* 2018), utilizando una réplica para cada tipo de luz en las instalaciones del Instituto Galego de Formación en Acuicultura (IGAFa). Se realizaron contajes diarios empleando el método de recuento celular con cámara hematocitómetro tipo Neubauer (Lavens & Sorgeloos, 1996). Las muestras se extrajeron diariamente en condiciones estériles en la cabina de flujo laminar. El recuento celular se realizó al microscopio óptico, cada 24 h.

Para hacer una comparativa del coste energético, en iluminación, por célula producida, a lo largo de todo el proceso productivo se desarrolló la siguiente expresión de Consumo Lumínico Celular (CLC).

$$CLC = \frac{P_{pr} * t_{cult}}{P * V}$$

Donde:

CLC = Consumo Lumínico Celular (µW/cel)

P_{pr} = Potencia en producción (µW/h)

t_{cult} = tiempo de cultivo (h)

ρ = Densidad celular (cel/µL)

V = Volumen de cultivo (µL)

Este indicador nos permite expresar el consumo energético en μW por cada célula producida en un determinado momento del cultivo, teniendo en cuenta los tiempos de producción necesarios para cada especie o para cada tipo de luz. De este modo pueden compararse luminarias de diferente tipo, y especies con requerimientos de luz distintos.

Por otro lado, se utiliza la expresión del número de células máximo producido para una potencia instalada determinada (DMPI), de modo que se pueda relacionar la intensidad luminosa de cada tipo de luz con las densidades máximas alcanzadas.

$$\text{DMPI} = \frac{\rho_{\text{max}}}{\text{Pot}}$$

Donde:

DMPI = Densidad Máxima por Potencia Instalada (cel/ μW)

ρ_{max} = Densidad celular máxima (cel/ μL)

Pot = Potencia instalada/Vol cultivo ($\mu\text{W}/\mu\text{L}$)

Se estimó también el Factor de Comparación de Producción (FCP), para determinar la cantidad de células que cada tipo de luz consigue producir, en un momento determinado. De este modo es posible comparar la respuesta de cada una de las especies, incluso cuando presentan diferentes tasas de división y tiempos de espera distintos hasta alcanzar la fase estacionaria.

$$\text{FCP} = \frac{\rho}{\text{Pot} * \text{tcult}}$$

Donde:

FCP = Factor de Comparación de Producción (cel/ $\mu\text{W} \cdot \text{día}$)

ρ = Densidad celular alcanzada en el cultivo (cel/ μL)

Pot = Potencia instalada/ Vol cultivo ($\mu\text{W}/\mu\text{L}$)

tcult = tiempo de cultivo (días)

Por último, se definió un índice, que hemos denominado Factor de Elección de Luz (FEL), que permite determinar el coste por cada 10^{12} células producidas y por W empleado, teniendo en cuenta tanto el coste de la lámpara como su vida útil:

$$\text{FEL} = \frac{\text{Pr} * \text{Ce}}{\text{FCP} * (\text{V}/\text{Cv}) * \text{Cp}}$$

Donde:

FEL = Factor de Elección de Luz (€ / 10^{12} cel W)

Pr = Precio de adquisición de lámpara (€)

FCP = Factor de Comparación de Producción (cel/ $\mu\text{W} \cdot \text{día}$)

V = Vida útil de la lámpara (h)

Cv = Conversor de vida útil (24h/día)

Cp = Conversor de potencia ($10^6 \mu\text{W}/\text{W}$)

Ce = Conversor de elección (10^{12} cel/cel)

La comparación de las medias de las concentraciones celulares de los cultivos microalgales y de los índices calculados CLC, DMPI y FCP según los distintos tipos de luz, se realizó mediante un test univariante de Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando el test post-hoc de Fisher LSD.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para *Isochrysis galbana* se observó que los reactores iluminados con luz fluorescente Osram Lumilux alcanzaron mayores concentraciones que aquellos iluminados con luces tipo LED en los primeros días de cultivo. A día 10 de cultivo se alcanzó una densidad similar en cada tipo de iluminación, en torno a las 13-

15.000 c/μL (ANOVA, $P > 0,05$, Fig. 1, Tabla 2). Sin embargo, a partir del día 10, se comprueba cómo los reactores con luz tipo LED Matel 18W presentaron un crecimiento óptimo hasta alcanzar una densidad de 32.250 c/μL a día 25 de cultivo, entrando a continuación en fase estacionaria o de meseta (Fig.1). Por el contrario, tanto los reactores con luz Lumilux 36W como el Ecolux 18W no alcanzaron esta densidad, sino que obtuvieron su máximo alrededor de 20.000 c/μL, entrando en fase estacionaria a los 20-23 días.

Al día 20, con Ecolux 18W se obtuvo una densidad un 30% menor respecto a Matel 18W, mientras que Lumilux 36W, alcanzó un 19% menos de densidad celular. Sin embargo, en ese momento no se detectaron diferencias significativas a día 20 entre las iluminaciones utilizadas (ANOVA, $P > 0,05$, Tabla 2).

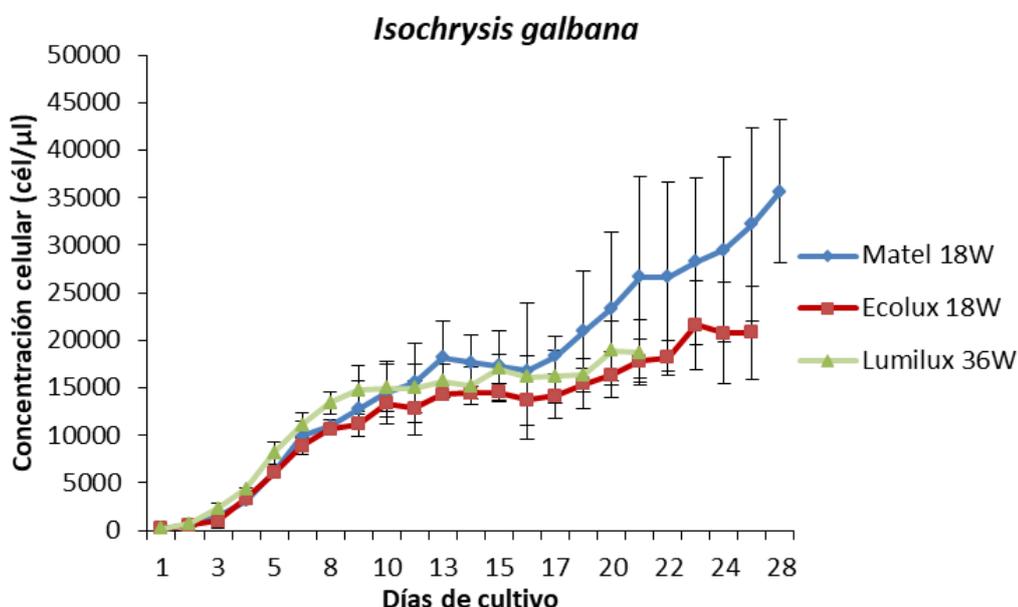


Figura 1.- Evolución del cultivo de *Isochrysis galbana*.

Tabla 2. Densidad celular promedio (cel μl^{-1}) de cuatro especies de microalgas empleando tres fuentes de iluminación, en las fases de crecimiento exponencial y estacionario (media \pm desviación estándar, $n = 2$). Letras minúsculas distintas en una misma especie y fase de crecimiento, indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$).

Tratamiento	<i>Isochrysis galbana</i>	<i>Diacronema lutheri</i>	<i>Tetraselmis suecica</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
	Fase de crecimiento exponencial			
	Día 10	Día 11	Día 10	Día 8
Matel 18W	14.450 \pm 3.295	11.150 \pm 2.503	3.420 \pm 255 ^b	1.400 \pm 198
Ecolux 18W	13.350 \pm 1.371	12.450 \pm 410	3.220 \pm 198 ^b	1.070 \pm 353
Lumilux 36W	14.970 \pm 2.447	14.810 \pm 2.418	4.210 \pm 127 ^a	1.360 \pm 141
Fase de crecimiento estacionaria				
	Día 20	Día 20	Día 20	Día 13
Matel 18W	23.360 \pm 8.061	25.100 \pm 820 ^b	4.920 \pm 198 ^b	2.970 \pm 438 ^a
Ecolux 18W	16.380 \pm 2.432	26.090 \pm 863 ^b	4.430 \pm 42 ^c	1.260 \pm 226 ^b
Lumilux 36W	18.930 \pm 3.125	32.270 \pm 1.286 ^a	5.600 \pm 141 ^a	1.210 \pm 325 ^b

En *Diacronema lutheri* (sin. *Pavlova lutheri*), se observó que los reactores con luz fluorescente Osram Lumilux 36W presentaban una densidad celular significativamente mayor a día 20 que los iluminados con luces de tipo LED (ANOVA, $P < 0,05$, Tabla 2). De hecho, la densidad celular en ese momento fue 19-22% superior en los reactores de *D. lutheri* iluminados con Lumilux 36W con respecto a los iluminados con las luces LED Matel 18W y Ecolux 18W. Esto puede deberse a que esta lámpara fluorescente tiene 36W frente a los 18W de las luces LED empleadas. Los reactores en las tres iluminaciones presentaron una curva de crecimiento similar (Fig. 2).

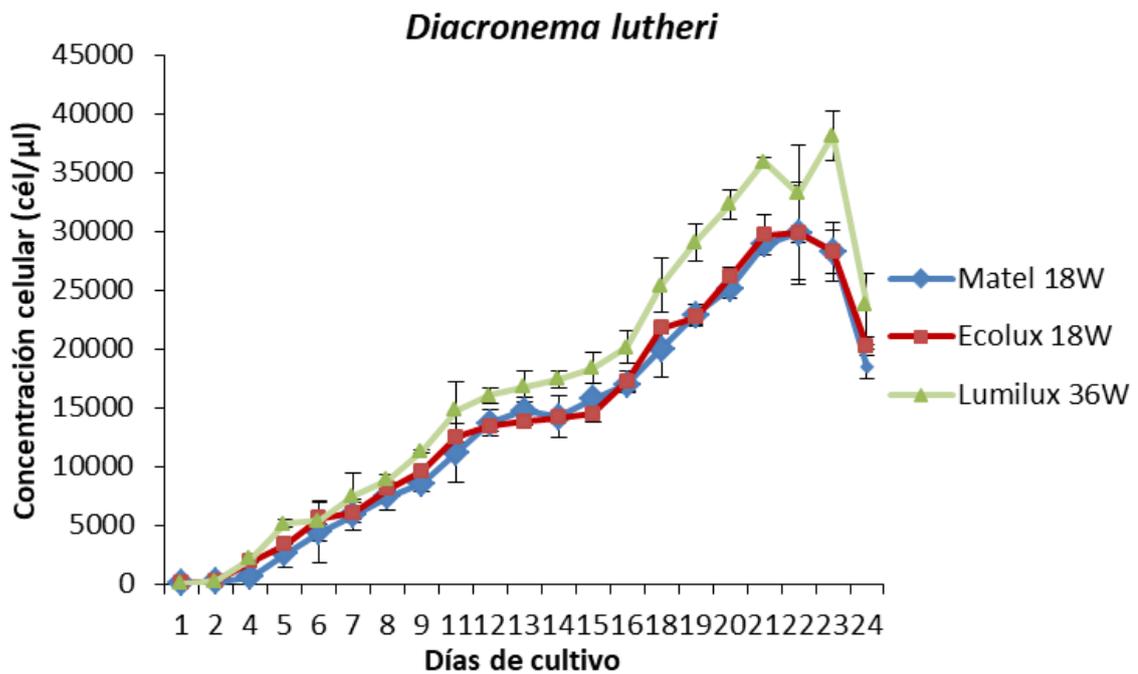


Figura 2.- Evolución del cultivo de *Diacronema lutheri*.

Con *Tetraselmis suecica*, se observó que los reactores iluminados con luz fluorescente Osram Lumilux 36W alcanzaron a día 10 una concentración media significativamente mayor que aquellos iluminados con luces tipo LED (ANOVA, $P < 0,05$, Tabla 2). Al día 16, las microalgas iluminadas con luz Lumilux 36W entraron en fase estacionaria alcanzando una densidad de 5.310 c/μL (Fig. 3). Mientras que los reactores iluminados con luz Matel 18W continuaron su crecimiento hasta alcanzar una densidad de 6.860 c/μL en el día 24 de cultivo, lo que representa finalmente un incremento del 18% respecto a la Lumilux 36W. Los reactores iluminados con luz Ecolux 18W alcanzaron una densidad de 5.040 c/μL y entraron en fase estacionaria a partir del día 20 de cultivo. Al día 20, se observaron diferencias significativas entre los tres tipos de iluminación (ANOVA, $P < 0,05$, Tabla 2).

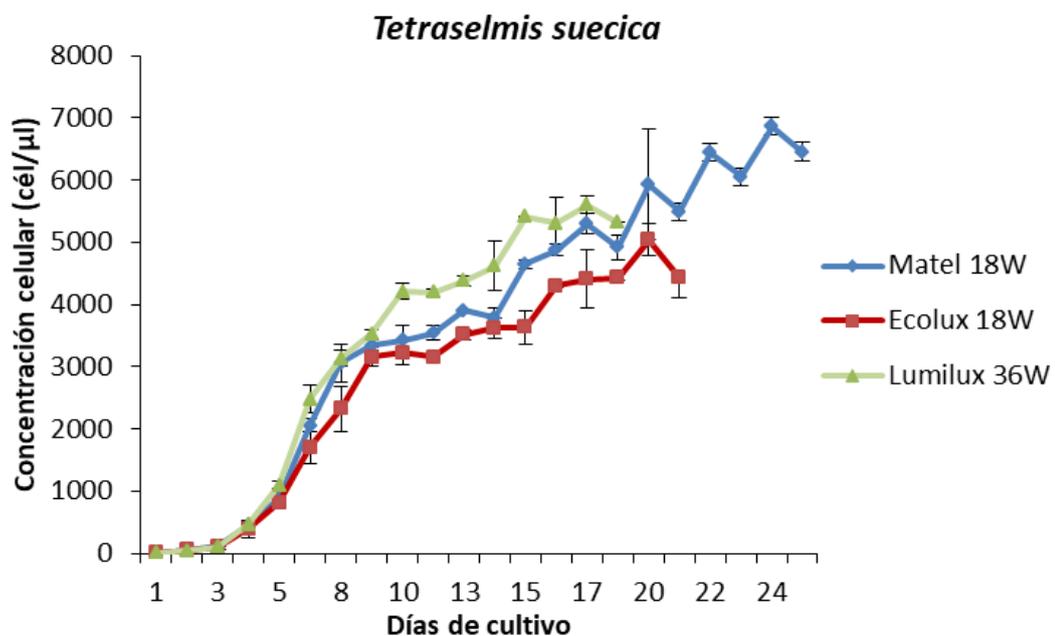


Figura 3.- Evolución del cultivo de *Tetraselmis suecica*.

En *Skeletonema costatum*, se observó una fase de adaptación muy prolongada en las tres condiciones de iluminación estudiadas (Fig. 4), desconociendo los motivos exactos que causan esta situación. A partir del día 7, todos los reactores iniciaron la fase de crecimiento exponencial. Los reactores iluminados con luz Matel18W alcanzaron una densidad máxima de 2.970 c/μL a día 13 de cultivo, lo que supone un incremento del 31% respecto a la máxima densidad alcanzada con luz Lumilux 36W. Al día 13, se observaron diferencias significativas entre los reactores iluminados con luz Matel18W y los reactores iluminados con los otros dos tipos de luces (ANOVA, $P < 0,05$, Tabla 2). Ecolux 18W es la luz que presentó un peor comportamiento en esta especie, ya que su máxima densidad celular fue un 55% inferior a la densidad máxima obtenida por la luz Matel18W.

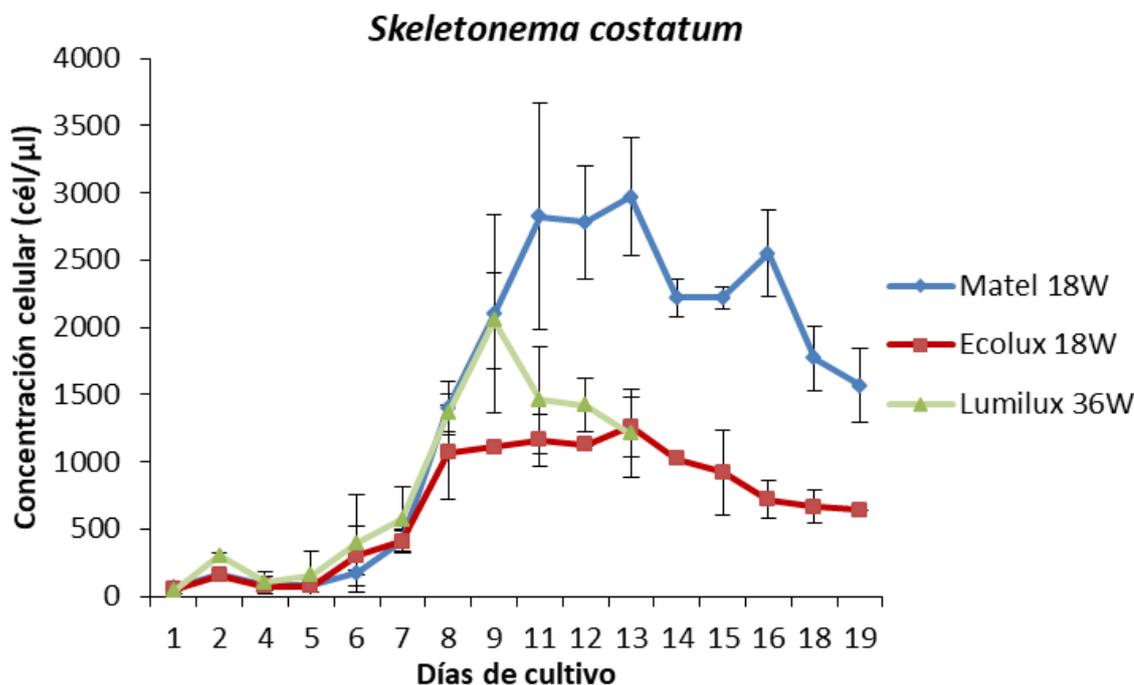


Figura 4.- Evolución del cultivo de *Skeletonema costatum*.

A partir de la expresión del Consumo Lumínico Celular (CLC) se puede comparar entre las tres luces seleccionadas, el coste energético necesario para producir una célula en los diferentes momentos de cultivo, y para cada especie. Se aportan estos datos acompañados de las correspondientes tablas, donde se muestra la densidad celular obtenida a mitad de cultivo (fase exponencial) y en el máximo alcanzado (fase estacionaria).

En la Tabla 3 se muestran los consumos energéticos de producción (CLC) de las cuatro especies de microalgas con las tres luces ensayadas. Se puede deducir que la iluminación tipo LED es más eficiente para producir cualquiera de las cuatro especies probadas, ya que los valores de CLC fueron significativamente menores en las 4 especies tanto en la fase exponencial como en la estacionaria que los de la luz fluorescente (ANOVA, $P < 0,05$, Tabla 3). La luz Matel 18W LED fue la más eficiente de las tres, en todos los ensayos, aunque sólo se observaron diferencias significativas con la luz Ecolux 18W LED en la fase estacionaria del cultivo de *T. suecica*. Además, conviene aclarar que los datos mostrados en la Tabla 2 donde se recogen densidades máximas alcanzadas, no están relacionadas con la intensidad lumínica utilizada, como sí ocurre cuando empleamos el CLC. Por tanto este indicador sería el realmente aplicable para saber qué rentabilidad lumínica tendría cada tipo de luz, en función de la intensidad utilizada. Se destaca que la potencia instalada de las luces fluorescentes fue el doble de la aportada con las LED.

Tabla 3. Coste energético lumínico de producción (CLC) ($\mu\text{W cel}^{-1}$) de cuatro especies de microalgas empleando tres fuentes de iluminación, en las fases de crecimiento exponencial y estacionaria (media \pm desviación estándar, $n = 2$). Letras minúsculas distintas en una misma especie y fase de crecimiento, indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$).

Tratamiento	<i>Isochrysis galbana</i>	<i>Diacronema lutheri</i>	<i>Tetraselmis suecica</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
	Fase de crecimiento exponencial			
	Día 10	Día 11	Día 10	Día 8
Matel 18W	0,123 \pm 0,028 ^b	0,175 \pm 0,039 ^a	0,507 \pm 0,038 ^b	0,977 \pm 0,141 ^b
Ecolux 18W	0,130 \pm 0,013 ^b	0,153 \pm 0,005 ^b	0,538 \pm 0,033 ^b	1,367 \pm 0,451 ^b
Lumilux 36W	0,234 \pm 0,038 ^a	0,260 \pm 0,042 ^a	0,821 \pm 0,025 ^c	2,044 \pm 0,212 ^a
	Fase de crecimiento estacionaria			
	Día 20	Día 20	Día 20	Día 13
Matel 18W	0,157 \pm 0,054 ^b	0,138 \pm 0,004 ^b	0,632 \pm 0,025 ^c	0,764 \pm 0,113 ^b
Ecolux 18W	0,213 \pm 0,031 ^b	0,133 \pm 0,004 ^b	0,702 \pm 0,007 ^b	1,812 \pm 0,325 ^b
Lumilux 36W	0,370 \pm 0,061 ^a	0,214 \pm 0,009 ^a	1,049 \pm 0,027 ^a	3,852 \pm 1,036 ^a

Utilizando la Densidad Máxima por Producción Instalada (DMPI), se puede determinar el rendimiento en el momento de máximas densidades poblacionales, respecto a la potencia empleada con cada tipo de luz. En *I. galbana* y *D. lutheri* se obtuvieron valores de DMPI significativamente mayores con las dos iluminaciones LED que con la iluminación fluorescente Lumilux 36W (ANOVA, $P < 0,05$, Tabla 4). En *T. suecica* se obtuvieron valores de DMPI significativamente distintos para cada tipo de iluminación, observándose los valores más elevados de DMPI con la iluminación Matel 18W (ANOVA, $P < 0,05$, Tabla 4). En *S. costatum* también se observaron los valores más elevados con la iluminación Matel 18W, siendo significativamente diferentes de los obtenidos con las otras dos iluminaciones (ANOVA, $P < 0,05$, Tabla 4).

En criaderos de moluscos, conseguir altas densidades de cultivo de fitoplancton permite reducir los costes derivados de las necesidades de espacio requeridas en las cámaras isotermas que se suelen emplear para gestionar la alimentación larvaria. Los valores de densidades máximas también resultan de gran importancia en los sistemas semicontinuos y continuos para la producción de microalgas en fase de semilla, por lo que el DMPI se considera un indicador con aplicaciones interesantes para el posible cambio de luz en este tipo de sistemas.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el ensayo, se puede indicar que la luz LED Matel 18W parece mostrarse como la más recomendable para todas las especies estudiadas. Por su parte la luz LED Ecolux 18W, también conseguiría mayores densidades que la fluorescente Lumilux 36W para todas las especies ensayadas, salvo en el caso de *S. costatum* donde dichas diferencias no fueron significativas.

Tabla 4. Densidad Máxima por Producción Instalada (DMPI) ($\text{cel } \mu\text{W}^{-1}$) de cuatro especies de microalgas empleando tres fuentes de iluminación (media \pm desviación estándar, $n = 2$). Letras minúsculas distintas en una misma especie y fase de crecimiento, indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$).

Tratamiento	<i>Isochrysis galbana</i>	<i>Diacronema lutheri</i>	<i>Tetraselmis suecica</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
Matel 18W	4.953 \pm 1.728 ^a	4.149 \pm 552 ^a	931 \pm 29 ^a	412 \pm 60 ^a
Ecolux 18W	2.889 \pm 684 ^a	4.146 \pm 603 ^a	700 \pm 35 ^b	175 \pm 31 ^b
Lumilux 36W	1.314 \pm 217 ^b	2.647 \pm 148 ^b	389 \pm 10 ^c	142 \pm 25 ^b

El Factor de Comparación de la Producción (FCP) indica cuántas células se producen con cada W útil, considerando los diferentes tiempos de producción necesarios. Para cada una de las especies estudiadas se observó el mismo patrón al calcular el FCP (Tabla 5) que con el CLC (Tabla 3). Las dos luces de tipo LED son más productivas para todas las especies ensayadas salvo para el caso de *S. costatum* donde se obtienen resultados similares con Lumilux y Ecolux.

Con el índice de FCP se dispone de un valor objetivo que nos permite observar cómo los cultivos de *I. galbana* y *D. lutheri* muestran peor rendimiento y diferencias significativas al emplear luz fluorescente frente a cualquiera de las dos luces de tipo LED utilizadas. Esas diferencias no fueron significativas cuando se comparó las dos luces LED entre sí.

Por otro lado, en los cultivos de *T. suecica* se observaron diferencias significativas entre los tres tipos de luz, y la de menor coste lumínico celular parece ser la Matel 18W. Con *S. costatum* se observaron mejores resultados y diferencias significativas cuando se utilizó la luz Matel 18W frente a los otros dos tipos de luz.

Tabla 5. Factor de comparación de producción (FCP) (cel μW^{-1} día $^{-1}$) de cuatro especies de microalgas empleando tres fuentes de iluminación (media \pm desviación estándar, n = 2). Letras minúsculas distintas en una misma especie y fase de crecimiento, indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$).

Tratamiento	<i>Isochrysis galbana</i>	<i>Diacronema lutheri</i>	<i>Tetraselmis suecica</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
Matel 18W	176,9 \pm 37,5 ^a	211,2 \pm 6,9 ^a	40,9 \pm 1,6 ^a	31,7 \pm 4,7 ^a
Ecolux 18W	130,6 \pm 28,3 ^a	219,5 \pm 7,3 ^a	36,8 \pm 0,4 ^b	13,5 \pm 2,4 ^b
Lumilux 36W	65,7 \pm 10,9 ^b	135,8 \pm 5,4 ^b	24,6 \pm 0,6 ^c	15,8 \pm 2,7 ^b

Por último, el Factor de Elección de Luz (FEL) permite asignar un valor que relaciona el coste celular de producción, teniendo en cuenta tanto la potencia instalada para cada tipo de luz como el coste de adquisición y la duración de cada lámpara.

En el presente estudio, y utilizando los datos comerciales correspondientes a España durante 2020, el cálculo del FEL se realiza partiendo de un coste de la lámpara para Lumilux 36W de 2,32€ (con una vida útil de 20.000 h), de 9,10€ para Matel 18W (vida útil de 50.000 h) y de 21,78€ para Ecolux 18W (vida útil de 40.000 h).

A efectos prácticos hay que considerar que es posible el cambio de cualquiera de las tres luminarias, elegidas para el ensayo, sin que se requiera inversión en instalación, ya que son compatibles utilizando el mismo soporte de lámpara.

En la Tabla 6 se muestran los valores de este indicador para cada uno de los tipos de luz y para cada especie objeto de cultivo, permitiendo conocer cuál es el coste real de producción teniendo en cuenta los diferentes tipos de luminaria empleados en el criadero.

Tabla 6. Factor de Elección de Luz (FEL) (€/10 12 cel W) de cuatro especies de microalgas empleando tres fuentes de iluminación (media \pm desviación estándar, n = 2). Letras minúsculas distintas en una misma especie y fase de crecimiento, indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0,05$).

Tratamiento	<i>Isochrysis galbana</i>	<i>Diacronema lutheri</i>	<i>Tetraselmis suecica</i>	<i>Skeletonema costatum</i>
Matel 18W	25,3 \pm 5,4 ^b	20,7 \pm 0,7 ^b	107,0 \pm 4,3 ^b	139,2 \pm 20,6 ^b
Ecolux 18W	102,4 \pm 22,2 ^a	59,6 \pm 2,0 ^a	355,2 \pm 3,4 ^a	987,1 \pm 177,3 ^a
Lumilux 36W	42,9 \pm 7,1 ^b	20,5 \pm 0,8 ^b	113,1 \pm 2,9 ^b	178,7 \pm 30,8 ^b

La lámpara LED de Matel 18W y la lámpara fluorescente Lumilux 36W mostraron los mejores costes derivados de la sustitución de lámpara (expresada en € por W instalado y para cada 10 12 células producidas), de las tres luces probadas en las cuatro especies en cultivo sin observarse diferencia significativa entre ellas (ANOVA, $P > 0,05$, Tabla 6). Sin embargo, la lámpara LED de Ecolux, debido a su alto precio y su tiempo de vida intermedio, mostró costes por célula significativamente mayores, por instalación, que los otros dos tipos de lámparas.

CONCLUSIONES

Empleando los nuevos índices de CLC, FCP y DMPI se ha conseguido determinar valores de referencia para cada especie, partiendo de luces de diferente tipo y calidad lumínica, con potencias instaladas diferentes. Los mejores resultados para las 4 especies de microalgas estudiadas se obtuvieron con los dos tipos de lámparas tipo LED estudiadas (Matel 18W y Ecolux 18W).

Además, utilizando el FEL se puede obtener un valor que logra relacionar el coste por célula producida con el coste de instalación de cada tipo de luz que se quiera ensayar, ya que únicamente se necesitaría

incluir en la expresión del Factor de Elección de Luz, el valor del Factor de Comparación de la Producción (FCP) previamente calculado y ciertos datos comerciales de fácil disponibilidad como son la potencia de la lámpara, su vida útil y el coste de adquisición.

Si se combina la información que proporciona el FCP con la que suministra el FEL se puede analizar tanto el coste de sustitución de lámpara como el coste de producción debido al consumo de energía en iluminación. Los mejores resultados del índice FEL se obtuvieron con la lámpara LED de Matel 18W y la lámpara fluorescente Lumilux 36W. Si combinamos los resultados de todos los índices calculados (CLC, FCP, DMPI y FEL) en las 4 especies estudiadas en este trabajo podemos sugerir que la lámpara LED de Matel 18W es la más rentable en base a la producción y teniendo en cuenta el coste de sustitución de las lámparas.

De este modo se logra disponer de una herramienta de comparación útil para la toma de decisión respecto a la posible sustitución de luminarias en criaderos que dispongan de instalaciones para la producción de fitoplancton con luz artificial.

Agradecimientos

Las experiencias de este estudio fueron realizadas con financiación del Programa Operativo Fondo Social Europeo Galicia 2007-2013, Eixe 3, tema prioritario 72, a través de la Acción denominada “Cultivo intensivo de especies de interés marisqueiro”.

Subproxecto II: “Aplicación das técnicas de cultivo de semente de moluscos bivalvos en instalacións tipo minicriadeiro”.

Las operaciones técnicas referidas a la instalación y mantenimiento de los sistemas de iluminación fueron realizadas por Óscar Fandiño y José Luis Rodríguez-Ureba, a los que agradecemos el interés e indicaciones que en todo momento aportaron para el adecuado diseño de los sistemas empleados.

REFERENCIAS

- Bouman, H.A.; Platt, T., Doblin, M.; Figueras, F.G. & Sathyendranath, S., (2018). Photosynthesis-irradiance parameters of marine phytoplankton: synthesis of a global data set. *Earth System Science Data*, 10:251-266.
- Charalampous, E., Matthiessen B. & Sommer U., (2018). Light effects on phytoplankton morphometric traits influence nutrient utilization ability. *Journal of Plankton Research*, 40(5): 568-579.
- Coutteau, P., & Sorgeloos, P., (1992). The use of algal substitutes and the requirement for live algae in the hatchery and nursery rearing of bivalve molluscs: an international survey. *Journal of Shellfish Research*, 11: 467-467.
- Edwards, K., Thomas, M.K., Klausmeier, C.A. and Litchman, E., (2016). Phytoplankton growth and the interaction of light and temperature: a synthesis at the species and community level. *Limnology and Oceanography*, 61: 1232-1244.
- Helm, M.M.; Bourne, N.; Lovatelli, A. (comp./ed.), (2006). *Cultivo de bivalvos en criadero. Un manual práctico*. FAO Documento Técnico de Pesca. Nº. 471. Roma, FAO.
- Kim, Se-kwon., (2015). *Handbook of marine microalgae biotechnology advances*. Edit. Academic Press.
- Lastres, M; Andrés, M.C.; Rosende, A.; Villar, V.; Blanquet, I.; Alexandre, J. & Forte, S., (2009). *Manual de Acuicultura Interfor 2 CD Multimedia*. Programa Interreg III A. Edit. Forpescas, Lisboa.

- Lavens, P; Sorgeloos, P. (eds.), (1996). *Manual on the production and use of live food for aquaculture*. FAO Fisheries Technical Paper. No. 361. Rome, FAO.
- Meseck, S.; Alix J.H. & Wikfors, G.H., (2005). Photoperiod and light intensity effects on growth and utilization of nutrients by the aquaculture feed microalga, *Tetraselmis chui* (PLY429). *Aquaculture* 246: 393-404.
- Robert R, & Trintignac P., (1997). Substitutes for live microalgae in mariculture. *Limnology and Oceanography*, 57(2): 541-553.
- Shatwell R, Nicklish A. & Khöler J., (2012). Temperature and photoperiod effects on phytoplankton growing under simulated mixed layer light fluctuations. *Aquatic Living Resources* 10: 315-327.
- Vásquez-Villalobos, V.; Artega, P.; Chanamé, K.; Esquivel, A., (2013). Modelamiento matemático y por redes neuronales artificiales del crecimiento de *Spirulina sp.* en fotobiorreactor con fuente de luz fluorescente e iluminación en estado sólido. *Sientia Agropecuaria*. (PE) 4: 199-209.
- Yang, X.; Liu, L.; Yin, Z.; Wang X.; Wang, S. & Ye Z., (2020). Quantifying photosynthetic performance of phytoplankton based on photosynthesis-irradiance response models. *Environmental Sciences Europe*. (2020) 32:24.

Recibido: 19-12-2020
Aprobado: 27-12-2020
Versión final: 31-12-2020

