

# La radiación fotosintéticamente activa o PAR (*photosynthetically active radiation*) en la recreación ambiental del acuario marino

G. García-Castrillo, P. Lanuza y P. López

Museo Marítimo del Cantábrico. San Martín de Bajamar, s/n. E-39080 Santander (Cantabria), España.  
Correo electrónico: ggc@mmc.e.telefonica.net

Recibido en octubre de 2005. Aceptado en noviembre de 2005.

## RESUMEN

Los registros del PAR (*photosynthetically active radiation*) obtenidos en dos estaciones costeras y en otros tantos acuarios del Museo Marítimo del Cantábrico (MMC) han servido para ajustar el modelo de iluminación de estos últimos. Las variaciones en el fotoperiodo, procesos como el amanecer y el ocaso, así como el centelleo, se han tenido en cuenta. Los valores del PAR y el coeficiente de atenuación muestran que los microcosmos de los tanques son esencialmente un modelo a escala o comprimido del presente en el medio natural, y este hecho plantea problemas a los organismos. La presencia y concentraciones de materia orgánica disuelta (MOD), especialmente gilvinas (*gelbstoff*), tienen relación con este proceso.

**Palabras clave:** Acuarios, iluminación, extinción, MOD, gilvinas.

## ABSTRACT

### *PAR (Photosynthetically Active Radiation) in marine aquarium recreation*

Values of PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) have been obtained with an underwater Spherical Quantum Sensor at two shore stations and two large aquarium tanks from the Cantabrian Maritime Museum (Museo Marítimo del Cantábrico, MMC), to compare light environmental modelling. Photoperiod, sunrise, and sunset have been considered, as well as the vibration effect. PAR values indicate that the microcosmos contained in the tanks are essentially a scale or compressed model of the natural medium, as far as light is concerned, including 10 m of the shore water column in only 3 m. Many opportunities and problems are presented by this compression. Dissolved organic materials (DOM), especially *gelbstoff*, and concentration are related to this process.

**Keywords:** *Aquaria, lighting, attenuation, DOM, gelbstoff.*

## INTRODUCCIÓN

El Museo Marítimo del Cantábrico (MMC) cuenta con una instalación de acuarios marinos cuyo montaje está íntimamente ligado a los objetivos museológicos del Centro. Conforman ocho unidades temáticas que representan a otros tan-

tos conjuntos ambientales propios del mar Cantábrico.

Hasta hace tres décadas la iluminación de los acuarios era una cuestión meramente decorativa, aunque existe una extensa bibliografía sobre la luz y su influencia en la flora y la fauna marinas. Moe (1989) ha revisado esta situación histó-

rica y postulado una visión ambiental, especialmente en los denominados acuarios de arrecife.

El criterio de un acuario ecológicamente equilibrado va asociado a una correcta y ajustada recreación ambiental. Ello es fundamental para conservar la biocenosis establecida en condiciones adecuadas, atendiendo a las necesidades de las especies y los individuos y siguiendo criterios bioéticos. Está claro que el modelado para la recreación de ambientes ex situ requiere de un conocimiento del medio in situ, en todos sus aspectos, tanto bióticos como abióticos, y de los requerimientos de las comunidades y organismos que los habitan.

Un exceso de intensidad luminosa ocasiona problemas en los fotoreceptores, como fotoinhibición y decoloración en los pigmentos fotosensibles, tanto en estructuras celulares complejas como dérmicas difusas. La decoloración de sustancias fotosensibles se da en las superficies dérmicas de los equinodermos (Crozier, 1914) y también en los ojos complejos de crustáceos (Welsh, 1941; Brown, 1961) y peces (Wald, 1957; Welsh y Osborn, 1937). El estrés lumínico en la fauna vendrá condicionado por los tipos y la complejidad de las respuestas, ya sean fototropismos, fototactismos o fotocinesis, pero la mayor incidencia se puede dar en los procesos de acomodación de los propios fotoreceptores.

En este caso, se aborda la luz en su fracción de espectro relacionada con la actividad fotosintética (PAR), aunque el modelo final debe ir orientado a bandas más concretas del espectro lumínico relacionadas con las necesidades de las especies y su funcionalidad, incluida la radiación ultravioleta (RUV).

La hipótesis de trabajo establece un modelo de iluminación en los acuarios basado en los valores obtenidos en ambientes del medio natural homólogos a los recreados. Este modelo debe considerar tanto las variaciones del fotoperiodo anual como el circadiano, la influencia de la iluminación lunar y el efecto de centelleo, todo ello dirigido a minimizar el estrés lumínico de los individuos y, por tanto, a reducir los posibles efectos negativos asociados a esta situación, y también a atender a sus necesidades fisiológicas.

La intensidad de la luz en un punto y profundidad determinados, así como su composición

espectral, están condicionadas por la luz incidente y su transmisión en la columna de agua. A su vez, la luz que penetra en el agua depende del ángulo de incidencia de la radiación directa, las condiciones climatológicas y el nivel de polución ambiental (Madronich *et al.*, 1995). El ángulo de incidencia ( $\theta$ ) varía según la hora del día (sh), día del año (N), latitud ( $\phi$ ) y la pendiente de la superficie.

La transmisión está estrechamente relacionada con la longitud de onda, el plancton y la turbidez, junto con la concentración y propiedades ópticas de la materia en suspensión (SS) y, especialmente, de la materia orgánica disuelta (MOD) y las partículas de color que la componen (gilvinas). De este modo, el coeficiente de atenuación viene determinado por varios factores.

La turbidez y los sólidos en suspensión juegan, además, un papel importante en la reflexión de la luz transmitida, siendo, en este caso, independiente de la longitud de onda. Con valores bajos de turbidez, los cromóforos que forman parte de la MOD son los responsables de la coloración del agua, estrechamente relacionada con la longitud de onda, el tipo de molécula y su concentración. Así, las gilvinas dan al agua ex situ una tonalidad amarillenta con tintes verdosos al absorber fuertemente las longitudes de onda del espectro próximo al azul y el ultravioleta. Cuanto mayor sea la proporción de moléculas con cromóforos, mayor será la absorción específica y menor la transmisión en la columna de agua (Reche, 2003).

## MATERIAL Y MÉTODOS

Los valores del PAR (photosynthetically active radiation), en micromoles por metro cuadrado y segundo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), se han registrado con un sensor de receptor esférico Li-Cor-193SA, integrado en un CTD marca SEA-BIRD. La estrategia de registro se ha establecido sobre un cronograma estacional (febrero, mayo, junio, septiembre y noviembre), horario y diferente condición de cielo (despejado y cubierto). De este modo se han registrado un total de 220 perfiles en dos estaciones costeras (C-1 y C-2) y sendos acuarios del MMC (A-15 y

A-17), relacionados según su correspondencia ambiental: C-1/A-15 y C-2/A-17.

Los datos del medio natural provienen de dos estaciones costeras situadas en el abra del Sardinero (Santander, norte de España), fuera de la influencia de la pluma vaciante. La primera (C-1) al norte de la isla de Mouro, a 30 metros de profundidad, con fondo de rocas y estrechas lenguas de arena. La segunda (C-2), al norte de cabo Menor, a 25 metros de profundidad, sobre un fondo amplio de arenas limpias.

El acuario 15 (A-15) cuenta con una superficie de 14,3 m<sup>2</sup> y una columna de agua de 3,20 m. La decoración de rocas ocupa el 65 % del fondo y la fracción de pared vertical despejada está pintada en azul medio. Recrea un ecotono de fondo duro con sustrato blando, situado a 25 metros de profundidad, semejante a los cabezos costeros del Cantábrico. Su iluminación es exclusivamente artificial, compuesta por seis lámparas de halogenuros metálicos (HQI) de la marca Aqualine con potencias de 75, 250, 500 y 1 000 vatios y temperatura de color de 13 000 °K y 23 000 °K montadas en proyectores de alto rendimiento de la marca Philips.

El acuario 17 (A-17) cuenta con una lámina de agua de 197,8 m<sup>2</sup> y una profundidad de 4,20 metros. La decoración de rocas es perimetral, con una formación casi central, y el fondo, en su mayor parte, es arenoso. Recrea un ambiente Cantábrico, con especies pelágicas y bentónicas de poca profundidad (entre 5 y 12 m). Su iluminación es una mezcla de luz natural, que penetra a través de una abertura de 30 m<sup>2</sup> cubierta por una estructura de vidrio opal, y artificial, compuesta por dieciséis lámparas de 1 000 vatios, doce de 13 000 °K y cuatro de 20 000 °K similares a las ya mencionadas.

Los perfiles se han realizado a intervalos de una hora, salvo en periodos de máxima oscuridad y en la franja de cuatro horas durante el amanecer y el atardecer; en estas dos últimas fases se realizaron cada 30 minutos. El registro en los acuarios se llevó a cabo en su zona central, donde se produce la máxima iluminación. En las estaciones costeras solo se pudieron realizar perfiles completos, según el programa previsto, en mayo, junio y septiembre.

El registro del PAR se lleva a cabo cada dos segundos. Con el objetivo de obtener más infor-

mación sobre el centelleo en los acuarios, se realizaron paradas de dos minutos a 1, 2 y 3 metros; también una en fondo y otra en superficie de igual duración, y en las estaciones costeras, además, a 5, 10, 15 y 20 metros.

Paralelamente a los perfiles, se han registrado variables del agua (tabla I) relacionadas con la absorción de la luz, como la turbidez, clorofila *a*, color, sólidos en suspensión y materia orgánica disuelta (MOD). Las dos primeras variables se han introducido con los sensores del CTD ya mencionado.

Los datos de turbidez y clorofila *a* son simultáneos a los registros del PAR. El resto de variables (tabla I) se analizaron solo a mediodía y a profundidades correspondientes a las paradas del CTD, junto con superficie y fondo.

La materia orgánica disuelta (MOD) se ha cuantificado mediante contenido de carbono orgánico disuelto (COD), como recomiendan Morris *et al.* (1995), especialmente para determinadas longitudes de onda.

El coeficiente de atenuación vertical o extinción (*K<sub>d</sub>*) correspondiente a las longitudes de onda del PAR se ha calculado por metro aplicando la expresión

$$K_d (\text{PAR}) \text{ m}^{-1} = (\ln I_o - \ln I_d) / d$$

## RESULTADOS

Los valores del PAR, tanto en el medio natural como en los acuarios, han variado considerablemente ante las distintas condiciones de registro: época del año, hora del día, estado del cielo y condiciones oceanográficas y climatológicas.

La tabla II, junto con las figuras 1 y 2, muestran los valores a mediodía de la superficie (S) y el fondo (F) en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , obtenidos a lo largo del periodo de estudio en los dos acuarios y las dos estaciones costeras. En todos los casos, el descenso del PAR a lo largo de la columna se comporta de modo análogo y conforme al patrón ampliamente descrito en la bibliografía, con máximos en la superficie y una reducción progresiva de la energía con la profundidad.

Tabla I. Variables registradas y métodos empleados para su valoración.

Variable	Aparato/método	Unidades
Turbidez	Turbidímetro Seapoint	Ftu
Clorofila <i>a</i>	Fluorómetro WetStar WS3S-706P	mg m <sup>-3</sup>
Color aparente y verdadero	Espectrofotometría método 253 NCASI	Pt-Co
Sólidos en suspensión	Gravimetría	mg l <sup>-1</sup>
Materia orgánica disuelta (MOD)	Espectrofotometría HACH 10129	mg l <sup>-1</sup>

Los valores *ex situ* del PAR se deben relacionar con los registrados en el rango de profundidad correspondientes al ambiente representado; en el caso del acuario A-15 corresponden a los obtenidos de 20 a 25 metros en la estación C-1. Por ello, los valores de superficie (A-15-S) del acuario son muy diferentes a los de la estación C-1, y no así los de fondo (tabla II), salvo en el caso de los meses de febrero y noviembre, en que son mayores. En el acuario A-17 los valores bajo la superficie a mediodía (A-17-S) varían de 70,97 a 650  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en el transcurso del año, y de 55,12 a 229,77  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en fondo, con máximos en junio y mínimos en noviembre, mientras que en el medio natural (C-1 y C-2) (figuras 1 y 2) son superiores, de 222 a 1 430  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en superficie, llegando a los 6,34  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en el fondo en febrero. Esta diferencia se debe a la absorción de la cúpula, o lucernario, que cubre la abertura del acuario 17. La absorción media de dicho elemento es del 69 %.

Los registros realizados a lo largo del día muestran un incremento de la energía hasta el cenit solar, mayor en la capa superficial que en el fondo, como ocurre en el medio natural. La iluminación de la columna de agua pre-

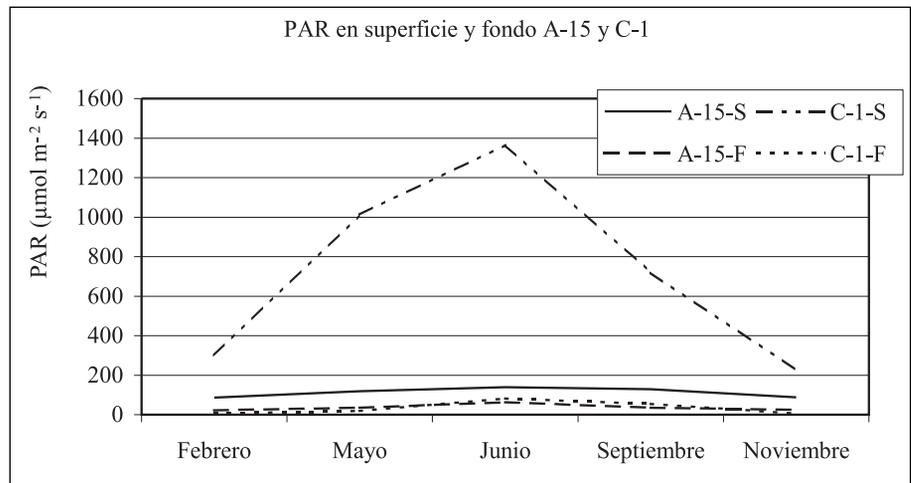
senta tres periodos: la fase de oscuridad, sin apenas variaciones en toda la columna de agua, la fase de amanecer y puesta, con una fuerte absorción, y la fase de insolación, con una gráfica en meseta. La absorción media *in situ* es del 60,45 % ( $\sigma = 5,4$ ), mientras *ex situ* es del 62,11 % ( $\sigma = 3,14$ ). En el caso del acuario 17 se comprueba por las tardes una variación del patrón *in situ* debido al efecto de sombra ejercido por el propio edificio del MMC sobre el lucernario. Esto da como resultado una asimetría de las curvas de absorción a las distintas profundidades (figura 3) en comparación con los datos de las estaciones costeras y del acuario 15.

El estado del cielo (despejado o cubierto) se refleja, igualmente, en la intensidad del PAR y su transmisión en la columna de agua. La diferencia de intensidad en esas dos situaciones, mantiene en su totalidad una atenuación media prácticamente constante, siendo a mediodía de 0,833 ( $\sigma = 0,042$ ), con variaciones en el patrón análogas en ambas situaciones. Así, en los días nublados se produce también *ex situ* una absorción del 66 % en los primeros 3 metros, siendo mayor en los intervalos de 1 a 2 y de 2 a 3 metros. Una diferencia cualitativa es la anulación del

Tabla II. Valores del PAR en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  al mediodía solar con cielo despejado en los acuarios y estaciones costeras durante el periodo de este estudio.

Emplazamiento		Febrero	Mayo	Junio	Septiembre	Noviembre
Acuario 15	A-15-S	85,93	119,03	139	128,36	83,11
	A-15-F	12,05	35,71	63,49	34,65	11,55
Acuario 17	A-17-S	220,84	479,56	650	470,06	70,97
	A-17-F	64,45	143,86	229,77	136,32	55,12
Estación 1	C-1-S	300	1 012	1 365	719,43	225,33
	C-1-F	6,34	18,87	82,18	53,93	5,73
Estación 2	C-2-S	310	1 005	1 430	722,73	222,39
	C-2-F	7,27	20,31	91,39	63,26	8,51

Figura 1. Valores del PAR en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en superficie (S) y fondo (F) del acuario A-15 y la estación C-1 a mediodía en el transcurso del año, siempre con cielo despejado.



efecto de reverberación en el fondo en los días nublados.

La evolución de los coeficientes de atenuación vertical [ $K_d$  (PAR)  $\text{m}^{-1}$ ] a lo largo del día, muestran un patrón general común, con un incremento desde el amanecer hasta las 10 u 11 h solares, seguido de una fase de meseta hasta las 18 h, cuando vuelven a disminuir (figura 4). Los valores medios, tanto en las estaciones costeras ( $\bar{x} = 0,15$ ;  $\sigma = 0,1052$ ) como en los acuarios ( $\bar{x} = 0,16$ ;  $\sigma = 0,0024$ ), se corresponden con coeficientes de aguas de tipo costero (Kirk, 1983).

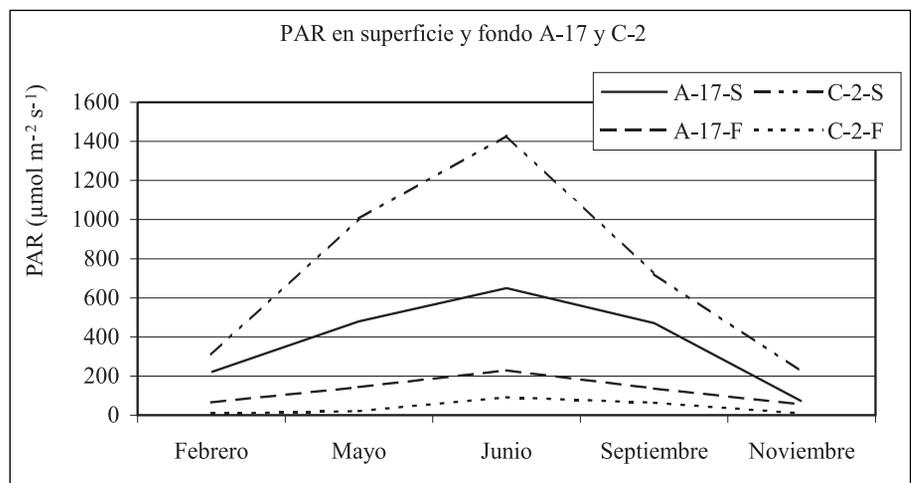
En los acuarios, la mayor extinción se produce en los intervalos batimétricos de 1 a 2 metros y de 2 a 3 ( $\bar{x}_{1a2} = 0,298$ ;  $\bar{x}_{2a3} = 0,292$ ), mientras que en las capas superior e inferior oscilan de 0,007 a 0,016. Este patrón se observa también en las estaciones costeras, donde la capa de 1 a 3 metros presenta los mayores coeficientes de extinción ( $\bar{x}_{1a2} = 0,222$ ;  $\bar{x}_{2a3} = 0,150$ ), con valores

superiores en la capa de 1 a 2 metros. En ambos casos se dan registros máximos entre las 10 y las 11 horas solares, con una mayor variabilidad en el acuario A-17 en la correspondiente fase de meseta (figura 5).

La intensidad del PAR en el fondo del acuario A-17 (figura 5), especialmente a mediodía, muestra una ganancia de energía debido al reflejo de la arena, generándose un efecto de reverberación reflejado también por el coeficiente de atenuación vertical, fenómeno análogo al registrado en el caso de los fondos arenosos de la estación C-2; mientras, ni en el acuario 15, ni en la estación C-1, se define claramente este efecto, ante la menor proporción de arena en el fondo y de energía en una banda del espectro más estrecho.

El movimiento de la lámina de agua produce instantáneamente diferentes ángulos de incidencia ( $\theta$ ) para la luz debido a la inclinación de la

Figura 2. Valores del PAR en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en superficie (S) y fondo (F) del acuario A-17 y la estación costera C-2 a mediodía en el transcurso del año, siempre con cielo despejado.



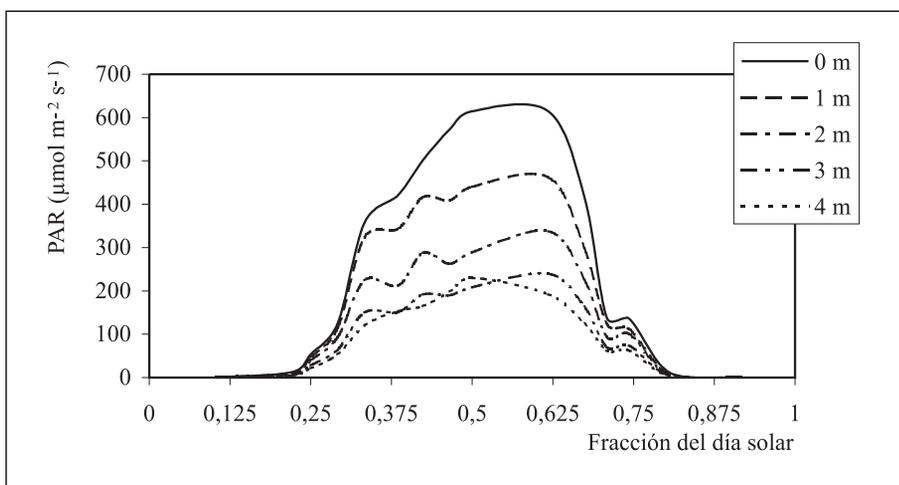


Figura 3. Valores del PAR en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , según cotas de profundidad, registrados en el acuario A-17 en junio, en el transcurso de un día de primavera con cielo despejado.

superficie ( $\beta$ ) y, por tanto, la modificación del ángulo azimutal ( $\gamma$ ), con las consiguientes variaciones de la cantidad de energía directa entrante; esto produce el efecto de centelleo, cuyo rango de variación se va reduciendo conforme a la atenuación vertical de la columna de agua (figura 6), patrón observado tanto in situ como ex situ.

Los mayores rangos de variación del centelleo se producen, en todos los casos, en el primer metro de la columna de agua y al mediodía. Durante la fase de meseta en las horas centrales del día, la correlación entre los valores de la amplitud del centelleo y la absorción vertical es 0,86 (correlación de Pearson), mientras que durante el amanecer y atardecer es 0,41.

Los valores de turbidez, materia en suspensión (SS) y orgánica disuelta (MOD) no presentan patrones con diferencias verticales significativas (tabla III).

La turbidez en las estaciones costeras, especialmente durante el invierno, muestra masas de agua con diferencias significativas debido a las condiciones oceanográficas y climatológicas. La turbidez media in situ es de 6,69 ntu ( $\sigma = 1,78$ ) con un mínimo de 4,71 ntu y un máximo de 10,10 ntu. Mientras, en los acuarios el rango es mucho menor ( $\sigma = 0,49$ ), sin apenas variaciones anuales ni circadianas y con dependencia exclusiva de los mecanismos y elementos de filtración.

La concentración de clorofila *a* presenta variaciones estacionales y verticales en los emplazamientos costeros según el patrón oceanográfico local. Su concentración media es de 2,466  $\text{mg m}^{-3}$  ( $\sigma = 1,50$ ), con un máximo de 9,018  $\text{mg m}^{-3}$  y un mínimo de 0,599  $\text{mg m}^{-3}$ , mientras que en los acuarios es menor, con una media de 0,27  $\text{mg m}^{-3}$  y valores que nunca superan los mínimos del medio costero.

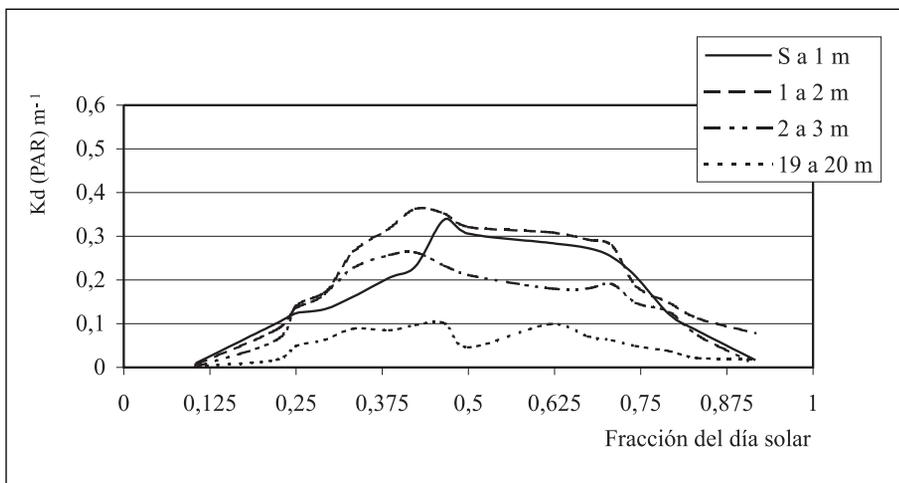
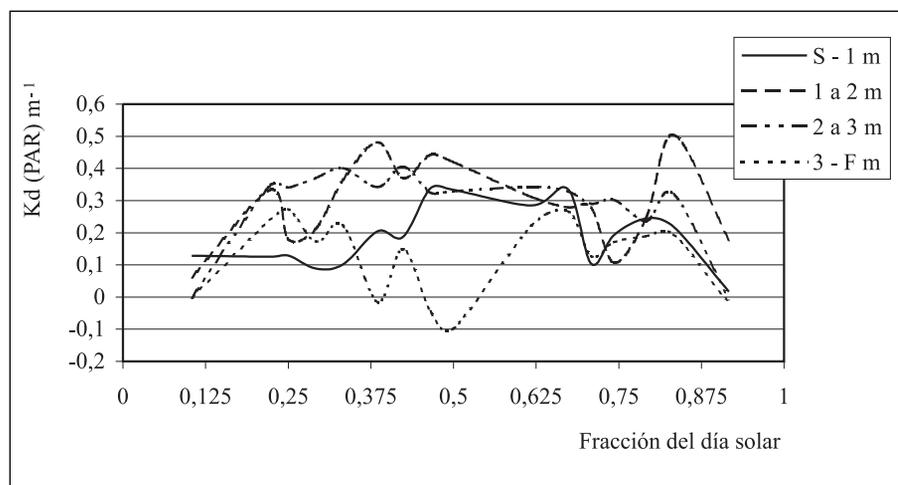


Figura 4. Coeficiente de atenuación vertical [ $K_d$  (PAR)  $\text{m}^{-1}$ ] de los primeros estratos de profundidad y fondo en la estación costera C-2 durante un día de verano con cielo despejado.

Figura 5. Coeficiente de atenuación vertical [Kd (PAR) m<sup>-1</sup>] en el acuario A-17 durante un día de junio con cielo despejado.



Las concentraciones de materia en suspensión (SS), expresada en mg l<sup>-1</sup>, al igual que la MOD (tabla IV), son mayores en los acuarios que in situ. Mientras que ex situ muestran una distribución homogénea, como el caso de la turbidez, no ocurre lo mismo con las estaciones costeras, donde el patrón es semejante al de la turbidez, con valores muy inferiores en lo referente a la MOD.

## DISCUSIÓN

La iluminación ex situ debe englobar los fotoperiodos estacionales, las variaciones circadianas y la calidad de la radiación (Adey y Lovelan, 1991). La comparación entre los perfiles del PAR de las estaciones costeras y los ambientes ex situ permiten establecer modelos de iluminación concretos relacionados con estos últimos.

Un buen conocimiento de los valores in situ de la energía y el espectro es básico para establecer el modelo lumínico ex situ. La conjunción de lámparas HQI con potencias de 75 a 1 000 vatios y temperaturas de color de 5 000 °K, 13 000 °K y 20 000 °K permiten abordar dichos modelos en columnas de agua menores de 4 metros, recreando las variaciones de la intensidad, espectro y fotoperiodo, tanto anual como circadiano, aunque se deben tener muy en cuenta los ángulos de incidencia sobre la lámina de agua y la distancia a la misma,

Los valores del PAR obtenidos en ambas circunstancias presentan amplias variaciones, debido al ángulo de incidencia de la radiación directa y a las variables fisicoquímicas que afectan, de un modo u otro, a su absorción y atenuación vertical. Los patrones de absorción en el transcurso de las veinticuatro horas son homólogos en ambos casos, aunque, en términos generales, la

Figura 6. Intervalo del centelleo limitado por los máximos y mínimos del PAR en el acuario A-17 a las 12:00 h solar de un día de primavera con cielo despejado.

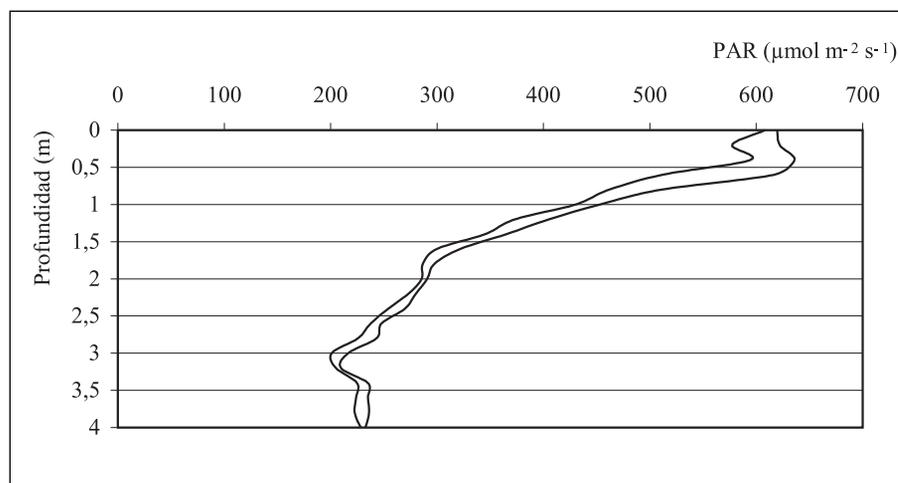


Tabla III. Valores medios de turbidez en ntu de los acuarios y estaciones costeras.

Lugar	Febrero		Mayo		Junio		Septiembre		Noviembre	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
A-15	6,38	0,59	6,36	0,45	6,35	0,48	6,32	0,46	6,38	0,51
A-17	7,63	0,62	7,63	0,70	7,62	0,65	7,63	0,67	7,62	0,72
C-1	7,23	2,12	6,56	1,42	6,33	1,55	6,44	1,89	6,87	2,04
C-2	7,21	2,02	6,59	1,38	6,38	1,66	6,41	1,78	6,88	1,98

atenuación in situ tiene mayores diferencias debidas a los cambios de las variables ambientales, en tanto que en los acuarios el medio abiótico es más estable, como queda reflejado en los valores de las desviaciones estándar de los registros obtenidos.

En cuanto a la absorción porcentual de la luz bajo la superficie de ambos acuarios, y en correspondencia con el medio natural, se observa que el 50 % de la cantidad de luz se extingue en el primer metro y medio en ambos casos, franja donde se dan, a su vez, los mayores coeficientes de atenuación. A los tres metros se ha absorbido el 57 % en el A-15 y 67 % en el A-17. La diferencia entre ambos acuarios se debe a la absorción específica de los cromóforos de la MOD, y a que en el A-15 el espectro es el correspondiente a las lámparas de 10 000 °K y 23 000 °K, mientras que en el A-17 se recibe luz natural además de las lámparas ya mencionadas.

La diferencia sustancial del comportamiento del PAR entre la columna de agua costera y la del acuario es la existencia en éstos últimos de un modelo a escala: la columna de agua del microcosmos ex situ se comporta como un elemento óptico de compresión, al presentar una mayor atenuación vertical que los ambientes in situ.

Los datos registrados en el acuario A-15 durante la fase de meseta, y en corresponden-

cia con el ambiente in situ (C-1), indican que los 3,2 metros de su columna de agua, con un rango del PAR que va de 60 a 140  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , se corresponden con 11 metros in situ, concretamente entre 18 y 29 metros de profundidad, con el mismo rango de variación del PAR (figura 7).

En caso del A-17, con 4 metros de profundidad, se conforma una columna de agua con un efecto de absorción lumínica que se corresponde con 15 metros del ambiente in situ (figura 8). De este modo, se registran valores medios de PAR de 640  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en superficie en ambos casos, mientras que en el fondo del acuario, a 4 metros, se registra, en las mismas condiciones, un valor de 150  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . El mismo valor se registra a los 15 metros de profundidad en la estación C-2.

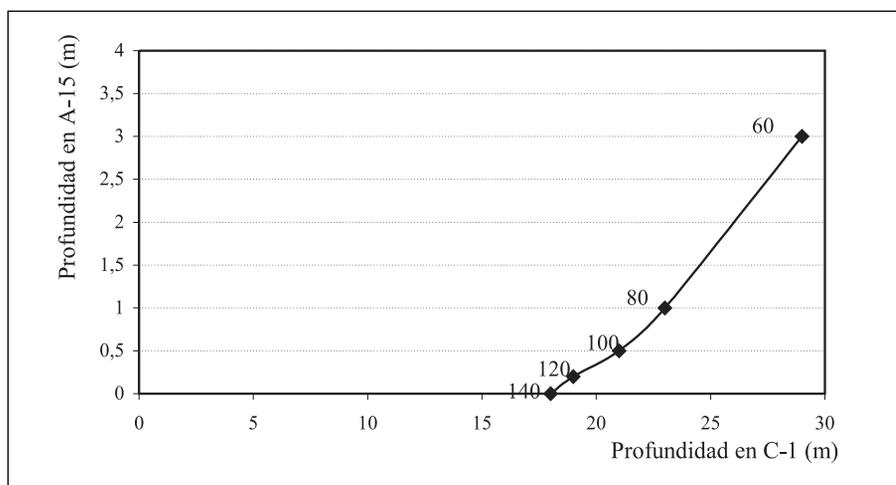
Este efecto fue mencionado por Adey y Loveland (1991) en referencia a uno de los tanques de arrecife del Museo Nacional de Historia Natural de la Smithsonian Institution en Washington, que contaba con 2 metros de profundidad y 4,5 m<sup>2</sup> de superficie y su iluminación dependía de diez lámparas de vapor de sodio de 1 000 vatios. La irradianza en el mencionado tanque era equivalente a la registrada entre los 13 y 20 metros en arrecifes naturales.

El motivo del aumento del gradiente lumínico en la columna de agua del microcosmos ex situ

Tabla IV. Valores medios de MOD en mg l<sup>-1</sup> de los acuarios y estaciones costeras.

Lugar	Febrero		Mayo		Junio		Septiembre		Noviembre	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
A-15	2,81	0,12	3,09	0,10	2,72	0,65	3,33	0,09	2,54	0,12
A-17	3,64	0,08	3,81	0,31	3,56	0,43	4,21	0,51	3,68	0,24
C-1	0,82	2,22	1,25	1,67	1,08	2,09	0,85	2,10	0,76	3,29
C-2	0,33	2,05	0,92	1,53	0,76	2,24	0,23	3,26	0,34	4,75

Figura 7. Relación entre las profundidades a que se alcanzan los mismos valores medios del PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) in situ y ex situ en la columna de agua de A-15 y de C-1 en junio, con cielo despejado y durante las horas centrales del día.



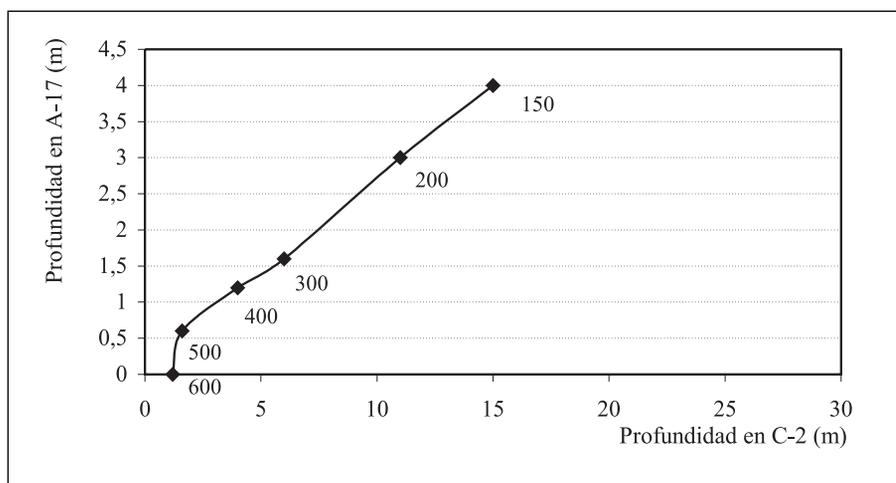
se debe buscar en las variables fisicoquímicas del agua y, en concreto, entre aquellas que afectan a la transmisión de la luz, tanto en lo que se refiere a la energía como al espectro.

Al comparar los valores medios de turbidez, sólidos en suspensión (SS) y MOD como factores responsables de la absorción, por segmentos de un metro de profundidad y con respecto al correspondiente coeficiente de atenuación del PAR [ $K_d$  (PAR)  $\text{m}^{-1}$ ], mediante un análisis de componentes principales (PCA) se comprueba la formación de tres grupos (figura 9). Dichos conjuntos agrupan, por un lado, a los segmentos ex situ y, por otro, a los in situ, diferenciándose entre estos últimos los correspondientes a la fase de meseta de los del amanecer y atardecer. Los dos primeros ejes (PC1 y PC2) explican el 91 % de la variación: 70,8 y 20,9 respectivamente. En el primer eje (PC1) la MOD es la variable con un

mayor coeficiente ( $-0,62$ ), mientras que en el segundo (PC2) es la MSS ( $0,86$ ).

El efecto ex situ de compresión del gradiente de atenuación lumínico debe abordarse con relación al factor o factores causantes. Las concentraciones de sólidos en suspensión y la turbidez pueden reducirse mediante los sistemas de filtración mecánica (Spotte, 1992). Por otra parte, la reducción de las concentraciones de la materia en suspensión, y especialmente de la MOD, es factible mediante procesos de ultrafiltración, centrifugación y coagulación-floculación (proceso en el que se procura el aumento del tamaño de las partículas para facilitar su remoción). En los dos últimos casos intervienen productos químicos, como sales de aluminio y polímeros catiónicos orgánicos, en combinación con columnas de espumación. El ozono es otro sistema que favorece la degrada-

Figura 8. Relación entre las profundidades a que se alcanzan valores medios del PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) in situ y ex situ en la columna de agua de A-17 y de C-2 en junio, con cielo despejado y durante las horas centrales del día.



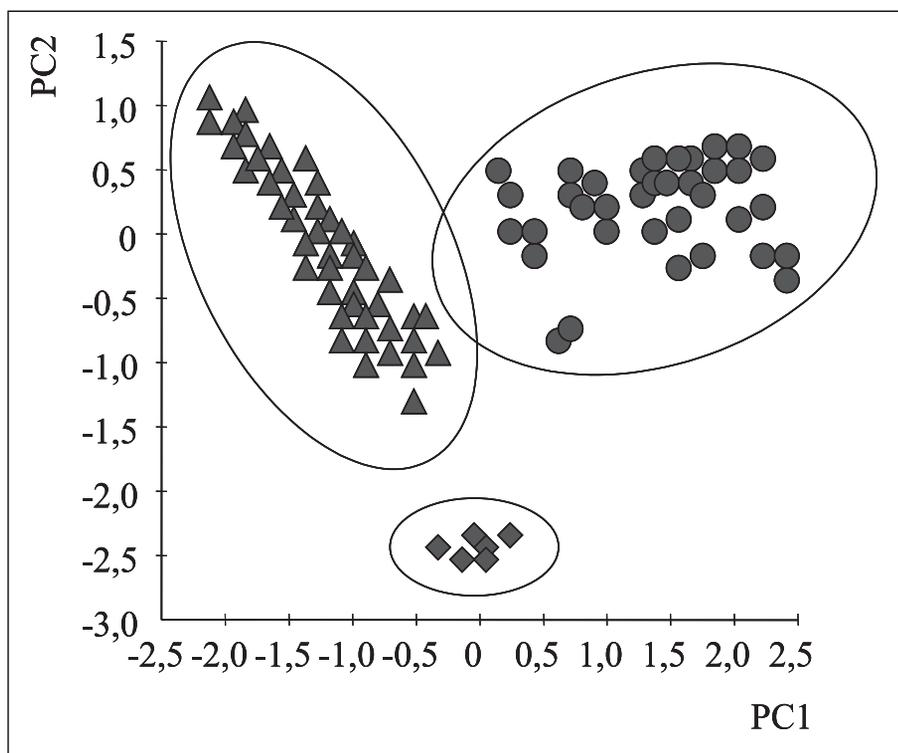


Figura 9. Resultado gráfico del análisis de componentes principales PC1 y PC2 de las variables físico-químicas analizadas (turbidez, SS y MOD) en A-17 y en C-1.

ción de los cromóforos y actúa, a su vez, como coagulante físico. También la fotodegradación con radiación ultravioleta (RUV), junto con el bucle bacteriano (Sun *et al.*, 1997), es otro método biológico a considerar, que verá incrementado su potencial gracias a la fotodegradación, que actúa sobre la MOD reduciéndola a sustancias que sirven de sustrato para las bacterias (Bertilsson y Tranvik, 1998). Éste es el sistema más apropiado, pues se evita el uso de floculantes químicos.

El principal problema derivado de este patrón de compresión es el efecto que tiene sobre los fotoreceptores de los organismos móviles y el estrés asociado, al existir un gradiente lumínico en la columna de agua mucho mayor que el natural. Todo ello vendrá condicionado por las respuestas propias de cada especie y organismo, con especial incidencia en los procesos de acomodación a la intensidad.

En sentido opuesto, el efecto de compresión permite recrear un mayor rango lumínico que el real en los microsistemas de los acuarios, permitiendo una mayor variedad de organismos bentónicos sésiles.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a la Dra. D.<sup>a</sup> Fe Sanchís, Directora del Centro de Investigaciones del Medio Ambiente (Gobierno de Cantabria) por ceder el equipo de registro Seabird lo que ha permitido esta comunicación. También a todos los trabajadores del Departamento de Biología y de acuarios del MMC, y a Hortensia Araujo por la revisión del manuscrito.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adey, W. y K. Loveland. 1991. *Dynamic aquaria: building living ecosystems*. Academic Press. San Diego (California), EE UU: 640 pp.
- Bertilsson, S. y L. J. Tranvik. 1998. Photochemically produced carboxylic acids as substrates for freshwater bacterioplankton. *Limnology and Oceanography* 43: 885-895.
- Brown, F. A. 1961. Retinal pigment rhythms in Crustacea. En: *The physiology of Crustacea. Vol. II. Sense Organs, Integration and behavior*. T. H. Waterman (ed.): 401-430. Academic Press. Nueva York.
- Crozier, W. J. 1914. Sensory reactions, Holothuria. *American Journal Physiology* 36: 8-20.
- Kirk, J. 1983. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press. Londres: 760 pp.

- Madronich, S., R. L. McKenzie, M. M. Caldwell y L. O. Björn. 1995. Changes in ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Ambio* 24: 143-152.
- Moe, M. 1989. *The Marine Aquarium Reference*. Green Turtle. Florida: 509 pp.
- Morris, D. P., H. Zagarese, C. E. Williamson, E. G. Balseiro, B. R. Hargreaves, B. Modenutti, R. Moeller y C. Queimalinos. 1995. The attenuation of solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon. *Limnology and Oceanography* 40: 1381-1391.
- Reche, I. 2003. Sensibilidad de los ecosistemas acuáticos a la radiación ultravioleta: el papel de la materia orgánica disuelta. *Ecosistemas* XII (1): 1-6.
- Spotte, S. 1992. *Captive seawater fishes. Science and technology*. Wiley-Interscience. Nueva York: 976 pp.
- Sun, L., E. M. Perdue, J. L. Meyer y J. Weis. 1997. Use of elemental composition to predict bioavailability of dissolved organic matter in a Georgia river. *Limnology and Oceanography* 42: 714-721.
- Wald, G. 1957. Visual pigments and depths of habitats of marine fishes. *Nature* 180: 969-971.
- Welsh, J. H. 1941. Crustaceans, retinal pigment migration. *Journal of Experimental Zoological* 86: 35-49.
- Welsh, J. H. y C. M. Osborn. 1937. Diurnal rhythm in fish retina. *Compensation Neurology* 66: 349-359.