

ARTÍCULO ORIGINAL

VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN DE LA LUZ EN LA BAHÍA DE CIENFUEGOS, CUBA

Spatial temporal behavior of light attenuation coefficient of Cienfuegos Bay, Cuba

Aimee Valle-Pombrol^{1*}, Dailé Avila-Alonso^{2,3}, Alain Muñoz-Caravaca¹, Rolando Cárdenas-Ortiz², David J. Castro-Rodríguez¹

¹ Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Departamento de Gestión Ambiental, Cienfuegos, Cuba.

² Laboratorio de Ciencias Planetarias, Departamento de Física, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.

³ KERMIT, Departamento de Modelación Matemática, Estadística y Bioinformática, Facultad de Ingeniería en Biociencias. Universidad de Gante. Bélgica.

* Autor para correspondencia:
avpombrol@gestion.ceac.cu

RESUMEN

En este trabajo se clasificaron ópticamente 16 estaciones en la bahía de Cienfuegos en el período de 2009 a 2014 y se determinó la variación espacio-temporal del coeficiente de atenuación promedio de la luz, así como su relación con la clorofila *a* y los sólidos suspendidos. El coeficiente de atenuación promedio se estimó a partir de una relación empírica con la profundidad de Secchi y se comparó con los correspondientes determinados por Jerlov (1976) para determinar el tipo óptico de agua de cada estación. Se obtuvo un predominio de las aguas tipo C9 (más turbias), lo cual es reportado fundamentalmente en la desembocadura de los ríos, principalmente en el lóbulo norte de la bahía sometido a presiones antrópicas. La mayor variación de la atenuación se detectó entre los períodos de seca y lluvia, mostrando los mayores valores en lluvia presumiblemente debido al incremento de la concentración de nutrientes y de la turbulencia en la columna de agua. La variación espacial indicó que las estaciones 1 y 16 mostraron los mínimos y máximos valores de atenuación respectivamente debido a sus características hidrodinámicas. La relación del coeficiente de atenuación con los sólidos suspendidos en la superficie y a su vez el coeficiente de atenuación con la clorofila *a* arrojaron una marcada relación multifactorial.

PALABRAS CLAVES: coeficiente de atenuación, clasificación óptica, turbidez, zona costera, estuario.

ABSTRACT

*In this work, 16 stations in Cienfuegos Bay were optically classified in the period from 2009 to 2014 and the spatio-temporal variation of the average attenuation coefficient of light was determined, as well as its relationship with chlorophyll *a* and suspended solids. The average attenuation coefficient was estimated from an empirical relationship*

Recibido: 27.9.2016

Aceptado: 4.9.2017

with the Secchi depth and was compared with the corresponding ones determined by Jerlov (1976) to determine the optical type of water of each station. A predominance of C9 (more turbid) water was obtained, which was mainly reported in the mouths of the rivers, mainly in the northern lobe of the bay subjected to anthropization. The greatest variation of the attenuation was detected between the periods of drought and rain, showing the highest values in rain due to the increase of the nutrient concentration and the turbulence in the water column. The spatial variation indicated that stations 1 and 16 showed minimum and maximum attenuation values respectively due to their hydrodynamic characteristics. The relationship of the attenuation coefficient with suspended solids on the surface and in turn the attenuation coefficient with chlorophyll a showed a marked multifactorial relationship.

KEYWORDS: attenuation coefficient, optical type, turbidity, coastal area, estuary.

INTRODUCCIÓN

La zona costera es parte de uno de los sistemas más complejos, diversos y productivos de la tierra al estar integrado por los subsistemas marino, terrestre y costero. Estos interactúan como un todo único y en donde las actividades humanas ejercen una fuerte presión sobre ambientes frágiles y de gran diversidad biológica. A escala mundial las afectaciones a la zona costera crean cambios recurrentes en las variables físico-químicas de la zona costera, que en ocasiones pueden llegar a un estado de eutrofización de las aguas.

La bahía de Cienfuegos, es uno de los sistemas costeros de mayor importancia en el Centro-Sur de Cuba, de su superficie se utiliza un 2% con fines agrícolas, 7% industrial, 8% urbano y turístico, 6% pesquero, 7% marítimo-portuario y 70% conservacionista (Moreira, *et al.*, 2014). Este sistema estuarino es impactado por las descargas contaminantes de la ciudad

de Cienfuegos, la agricultura y la zona industrial. El enriquecimiento de nutrientes provocado por las múltiples fuentes afecta la propagación de la luz solar a lo largo de la columna de agua.

La atenuación de la luz, (absorción y dispersión de la luz en la columna de agua) representada por su coeficiente, constituye una herramienta utilizada en estudios de oceanografía biológica (Palazov, 2004; Morel y Prieur, 2005; Hirata y Højerslev, 2008). La disponibilidad de luz determina la distribución vertical de las comunidades fitoplanctónicas, su abundancia y posible afectación a las comunidades bentónicas (Palazov, 2004). Los niveles de entrada de la radiación solar a la columna de agua, puede ser considerada como una variable respuesta del estado trófico del ecosistema y actúa en determinadas condiciones como factor limitante de la fotosíntesis, en dependencia de las propiedades ópticas del acuatorio (Ji, 2008). Además, ofrece información sobre los niveles de turbidez del medio acuático (Arst, *et al.*, 2002). La medición de la transparencia con el disco Secchi nos brinda un estimado de la atenuación de la luz en la columna de agua (Ford, 1999) y es una de las principales variables controladas en la mayoría de estudios del medio marino (Rodríguez, 2015).

Independientemente de la reconocida importancia del uso del coeficiente de atenuación de la luz no se han publicado estudios que caractericen áreas costeras estuarinas cubanas utilizando esta variable. Por lo que este trabajo tuvo como objetivos determinar la variación espacio-temporal a lo largo de seis años del coeficiente de atenuación promedio de la luz y su relación cualitativa en la concentración de clorofila a y los sólidos suspendidos en la superficie, así como definir la clasificación óptica de las

aguas propuesta por Jerlov (1976) en el período de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Cienfuegos está localizada en la provincia del mismo nombre, en la región central y costa sur de Cuba, Latitud Norte 22°09' y Longitud Oeste 80°27' (Fig. 1). Es una bahía semi-cerrada con un área de 90 km², una profundidad promedio de 14 m y cuya línea de costa ocupa 142 km. El intercambio de sus aguas con el Mar Caribe, ocurre a través de un estrecho canal de 3 km de longitud aproximadamente y un ancho 0.25 km, el cual alcanza profundidades entre 30 y 50 m en el centro (Moreira, *et al.*, 2007).

En la región se distinguen dos períodos climáticos: un período seco o menos lluvioso (noviembre- abril), con acumulados mínimos en diciembre y enero y el período lluvioso (mayo-octubre), con máximos entre junio y octubre (Caravaca, 2011). Presenta dos lóbulos delimitados por el bajo "La Cuevas" que tiene una profundidad promedio de 1.5 m el cual ejerce gran influencia en la circulación de las masas de agua dentro de la bahía.

PROGRAMA DE MONITOREO

Para la determinación del coeficiente de atenuación promedio de la luz en la columna de agua se utilizaron los datos de profundidad de Secchi correspondientes al período de 2009 a 2014 en las 16 estaciones del Programa de Monitoreo para la Evaluación de Calidad Ambiental de la bahía de Cienfuegos (Seisdedo, 2014) (Fig.1). Se utilizó un disco Secchi convencional (30 cm de radio con marcas de graduación de 10 cm), lastrado en su centro para conseguir la máxima perpendicularidad del cabo que lo

sujeta respecto a la superficie y minimizar la acción de la corriente sobre el mismo. El muestreo se llevó a cabo según los procedimientos de muestreo del Laboratorio de Ensayos Ambientales (LEA) acreditado según ISO IEC 17 025:2006.

Del programa de monitoreo se tomaron los datos de concentración de clorofila *a* y sólidos suspendidos en la superficie (SSS) para evaluar cualitativamente la relación del coeficiente de atenuación con dichas variables, ya que ha sido reportado que ejercen importante influencia en el decaimiento de los campos de luz a través de la columna de agua (Kirk, 2011). Para determinar la concentración total de clorofila *a* se midieron 0.2–2.5 L de agua salada y se filtraron a través de un filtro de fibra de cristal (Whitman GF/F). Los pigmentos fueron extraídos dentro de 10 mL de acetona al 90%, por 48 h, en condiciones frías y oscuras. La absorbancia del extracto fue medida por espectrofotometría, método recomendado por UNEP (1988). Los SSS se determinaron por el método gravimétrico (Christian, 2009)

Modelo óptico para estimado del coeficiente de atenuación

El coeficiente de atenuación promedio ($\langle K \rangle$ (m⁻¹)) de la luz en la columna de agua se determinó a través de la ecuación (1) $\langle K \rangle = \frac{z}{z_s}$ definida por Poole y Atkins (1926):

donde z_s es la profundidad de Secchi.

Para clasificar las estaciones según el tipo óptico de agua presentado, se compararon los valores calculados de $\langle K \rangle$ con los respectivos determinados por Jerlov (1976) para el caso de la Luz Fotosintéticamente Activa (LFA). El tipo óptico asignado a cada estación fue aquel cuyo valor de $\langle K \rangle$ estuvo más cercano al valor determinado por Jerlov (1976).



Fig. 1. Zona de estudio ubicada en la bahía de Cienfuegos, Cuba y sus puntos de monitoreo.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para encontrar diferencias en el coeficiente de atenuación promedio de la luz de la columna de agua entre las estaciones, los años de muestreo y los períodos de seca y lluvia se realizó un diseño factorial cruzado anidado desbalanceado según los crite-

rios establecidos en Kuehl (2001). Los factores categóricos que se cruzaron fueron estación y año y se anidó período dentro de año. Estación es un factor fijo con 16 niveles, coincidentes con las estaciones de muestreo del plan de monitoreo. Año es una variable aleatoria y por ende corresponde con los

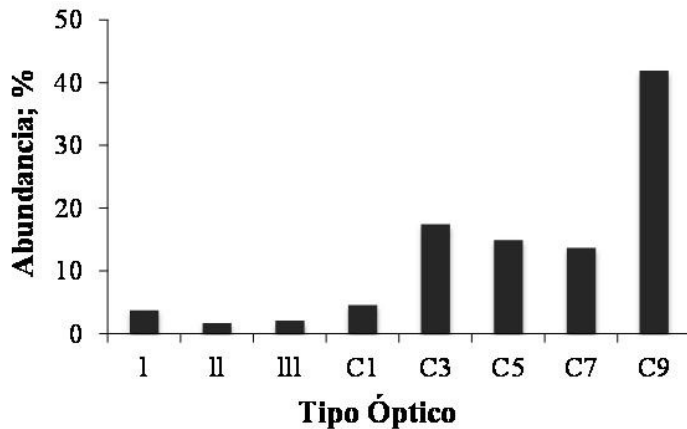


Fig. 2. Histograma de los tipos ópticos en la bahía de Cienfuegos, Cuba según la clasificación de Jerlov (1976).

años del período objeto de estudio (2009-2014). Período es una variable aleatoria que se divide en dos (seco y lluvioso). Los datos se tomaron en meses dentro de cada período

y a la vez se anidan en un año específico (Zar, 1999).

RESULTADOS

Se reportaron todos los tipos ópticos de aguas marinas propuestos en la clasificación de Jerlov (1976) lo cual refleja la complejidad del ecosistema. El 95.5% (Fig. 2) de los tipos ópticos determinados correspondieron a las aguas costeras, típico de las condiciones estuarinas de la bahía de Cienfuegos. Se manifestó un predominio de las aguas tipo C9 hacia el interior de la bahía y de aguas tipo oceánicas (I, II y III) en las estaciones cercanas al canal de intercambio con el Mar Caribe (Fig. 3 y tabla I).

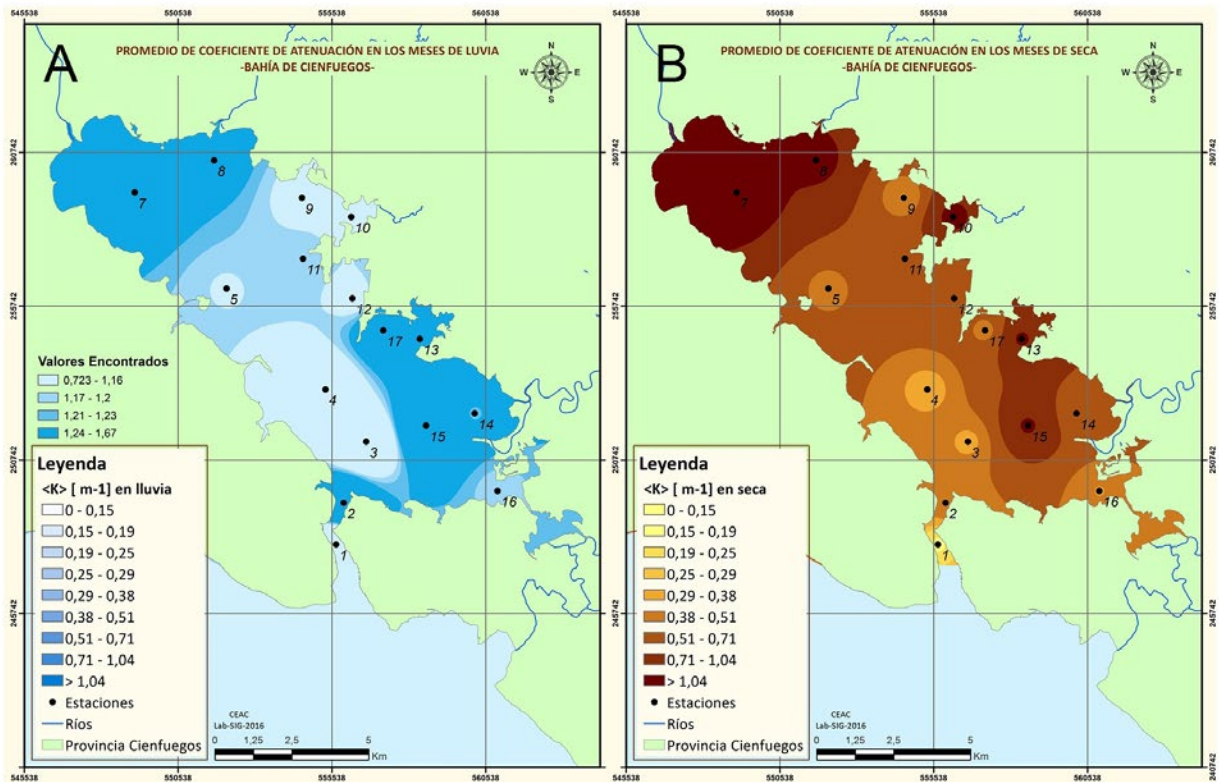


Fig. 3. Promedio anual (2009-2014) del coeficiente de atenuación $\langle K \rangle$ en la bahía de Cienfuegos en el período de (A) Lluvia y (B) Seca.

Tabla I. Valores medios y estadísticos de dispersión del coeficiente de atenuación (K) en (m^{-1}) para cada uno de los factores analizados.

| Factor | Nivel | Tamaño de muestra | Media | Error Estándar | Límite Inferior | Límite Superior |
|--------------------|-----------------|-------------------|-------|----------------|-----------------|-----------------|
| Media general | | 241 | 1.25 | 0.05 | 1.15 | 1.35 |
| Estación | 1 | 16 | 0.67 | 0.18 | 0.31 | 1.03 |
| | 2 | 16 | 1.22 | 0.18 | 0.86 | 1.58 |
| | 3 | 16 | 0.67 | 0.18 | 0.31 | 1.03 |
| | 4 | 16 | 0.74 | 0.18 | 0.38 | 1.10 |
| | 5 | 12 | 1.12 | 0.21 | 0.70 | 1.53 |
| | 7 | 15 | 1.75 | 0.19 | 1.37 | 2.12 |
| | 8 | 15 | 1.51 | 0.19 | 1.14 | 1.89 |
| | 9 | 15 | 1.00 | 0.19 | 0.62 | 1.37 |
| | 10 | 15 | 1.53 | 0.19 | 1.16 | 1.90 |
| | 11 | 16 | 1.20 | 0.18 | 0.84 | 1.56 |
| | 12 | 16 | 1.10 | 0.18 | 0.74 | 1.46 |
| | 13 | 16 | 1.22 | 0.18 | 0.86 | 1.58 |
| | 14 | 16 | 1.79 | 0.18 | 1.43 | 2.15 |
| | 15 | 16 | 1.03 | 0.18 | 0.67 | 1.39 |
| | 16 | 9 | 1.82 | 0.24 | 1.34 | 2.30 |
| | 17 | 16 | 1.62 | 0.18 | 1.26 | 1.98 |
| | Año | 2009 | 58 | 0.69 | 0.38 | -0.17 |
| 2010 | | 39 | 0.66 | 0.48 | -0.40 | 1.72 |
| 2011 | | 32 | 0.72 | 0.51 | -0.41 | 1.86 |
| 2012 | | 32 | 2.23 | 0.51 | 1.09 | 3.36 |
| 2013 | | 48 | 1.75 | 0.42 | 0.82 | 2.67 |
| 2014 | | 32 | 1.46 | 0.51 | 0.32 | 2.60 |
| Período dentro Año | febrero 2011 | 16 | 0.59 | 0.18 | 0.23 | 0.95 |
| | febrero 2012 | 16 | 1.21 | 0.18 | 0.85 | 1.56 |
| | febrero 2013 | 16 | 1.53 | 0.18 | 1.17 | 1.89 |
| | febrero 2014 | 16 | 0.69 | 0.18 | 0.33 | 1.05 |
| | junio 2009 | 15 | 0.48 | 0.19 | 0.11 | 0.85 |
| | junio 2010 | 10 | 0.73 | 0.23 | 0.27 | 1.19 |
| | junio 2013 | 16 | 1.53 | 0.18 | 1.17 | 1.89 |
| | marzo 2009 | 15 | 0.85 | 0.19 | 0.47 | 1.21 |
| | marzo 2010 | 15 | 0.72 | 0.19 | 0.34 | 1.09 |
| | noviembre 2009 | 14 | 0.57 | 0.20 | 0.18 | 0.95 |
| | noviembre 2010 | 14 | 0.53 | 0.20 | 0.14 | 0.91 |
| | septiembre 2009 | 14 | 0.85 | 0.20 | 0.46 | 1.23 |
| | septiembre 2011 | 16 | 0.86 | 0.18 | 0.50 | 1.22 |
| | septiembre 2012 | 16 | 3.25 | 0.18 | 2.89 | 3.61 |
| | septiembre 2013 | 16 | 2.76 | 0.18 | 2.40 | 3.12 |
| | septiembre 2014 | 16 | 2.22 | 0.18 | 1.87 | 2.59 |

Se encontraron diferencias significativas entre los años, estaciones de estudio y períodos climáticos (Tabla 2). Lo cual indica variación espacio-temporal del coeficiente de atenuación promedio de la luz y por lo tanto variaciones en las propiedades ópticas del estuario y en la cantidad de luz que penetra la columna de agua (Fig. 3).

Las variaciones temporales determinadas por la interacción años–períodos, demostraron la estacionalidad del coeficiente de atenuación (Fig. 3). Los valores del coeficiente de atenuación de la luz entre los años analizados presentaron mayor dispersión en el período seco en comparación con el período de lluvia, donde se manifiesta

Tabla I. Análisis de Varianza para el coeficiente de atenuación y los factores estación, año y períodos climáticos.

| Fuente de variación | Suma de Cuadrados | Grados de libertad | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|---------|---------|
| Modelo | 204 | 30 | 6.8 | 13 | < 0.001 |
| Residual | 111 | 21 | 0.5 | | |
| Total (Corr.) | 315 | 24 | | | |
| Factores | | | | | |
| Estación | 33 | 15 | 2.1 | 4 | < 0.001 |
| Año | 82 | 5 | 16.4 | 2 | 0.16 |
| Período (Año) | 82 | 10 | 8.2 | 15 | < 0.001 |
| Residual | 111 | 21 | 0.55 | | |
| Total (corregido) | 315 | 24 | | | |

poca variación interanual. Unido a esto, el período lluvioso y las estaciones del lóbulo norte mostraron los mayores valores de atenuación (Fig. 3 y tabla I).

Los años 2012, 2013 y 2014 presentaron los mayores valores del coeficiente de atenuación en el período lluvioso (tabla I), destacándose los valores del mes de septiembre de 2012. Los mínimos totales se encontraron en el período seco, específicamente en noviembre de 2010 y en junio 2009. Las mayores diferencias significativas entre períodos, lo presentó el período lluvioso de 2012 y los menores en lluvia-2011 y seca-2012.

Considerando la variación espacial del coeficiente de atenuación promedio de la luz en la columna de agua se obtuvo que la estación con el menor valor fue la 1 con 0.05 m^{-1} y mayor valor la 16 con 6.682 m^{-1} .

La tabla II resume los resultados de ajustar un modelo estadístico lineal general que relaciona a $\langle K \rangle$ con los tres factores predictivos. El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado, explica 65 % de la variabilidad en $\langle K \rangle$. R^2 ajustado, el cual es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 60 %, o sea que el modelo explica casi dos tercios de la variabilidad.

DISCUSIÓN

El predominio de los tipos ópticos de aguas costeras le otorga a la bahía de Cienfuegos la característica de estuario positivo. Los estuarios positivos son aquéllos en los cuales los aportes de agua dulce superan las pérdidas; es decir, cuando la cantidad de agua que entra en un estuario proveniente de lluvias, escorrentía, ríos y aguas subterráneas supera la cantidad de agua que el estuario pierde como consecuencia del flujo de agua hacia fuera del estuario y la evaporación (Olsen, *et al.*, 2006). Esta correlación pudiera establecerse si se toma en consideración que un mayor ingreso de agua dulce al estuario, pudiera traducirse en un incremento de la turbidez, debido a la deposición de material particulado y disuelto, la remoción de los sedimentos bentónicos, el enriquecimiento por nutrientes y consecuentemente el aumento de la producción primaria del fitoplancton; factores todos que contribuyen a la atenuación de la luz (Kirk, 2011) y por tanto al valor del coeficiente de atenuación.

La variación espacial de los valores del coeficiente de atenuación obtenidos en el presente trabajo es similar a lo reportado por Palazov (2004), en un sistema estuarino en el Mar Negro. Donde se

observa un aumento de los valores del coeficiente en las estaciones interiores de la bahía y una disminución en las que se localizan próximas al punto de intercambio con el océano. Específicamente en las zonas poco profundas del interior de la bahía de Cienfuegos, se observa un debilitamiento considerable de la intensidad de la corriente que potencia un aumento del tiempo de residencia del agua proveniente de las descargas fluviales y residuales. Esto pudiera favorecer la deposición de material particulado en los sedimentos y quizás un aumento de la transparencia, debido a este factor. Sin embargo, la mayor residencia de los nutrientes en la columna de agua pudiera favorecer la actividad fotosintética del fitoplancton y contribuir por tanto a la atenuación de la luz (Caravaca, 2011).

El predominio de las aguas C9 le otorgan al ecosistema una marcada turbidez. Este tipo de agua fue abundante en las estaciones 7 (Desembocadura del río Damují), 8 (Desembocadura del río Salado) y 10 (Desembocadura del río Inglés) en el período lluvioso. En las cuales, además de las perturbaciones ópticas generadas por el régimen hidrodinámico característico en las zonas estuarinas, son afectadas además por la carga contaminante de compuestos principalmente nitrogenados y fosforados, que tienen un incremento en la etapa lluviosa (Moreira *et al.*, 2014). Aunque los nitratos y fosfatos disueltos no contribuyen sustancialmente a la atenuación de la luz, influyen positivamente en el aumento del metabolismo celular y por tanto del crecimiento de las microalgas (incluyendo cianobacterias), las cuales contribuyen directamente a la atenuación (Ji, 2007).

El incremento de la atenuación en el período lluvioso era un resultado esperado.

Ya que el aumento de las precipitaciones contribuye al aumento de nutrientes, genera turbulencia en la columna de agua y demás eventos señalados anteriormente. En el período lluvioso tiende a aumentar la capacidad de carga del estuario debido al arrastre fluvial de los ríos, que traen una carga considerable de sedimentos y de materia orgánica. También hay reportes de factores que contribuyen a una mayor atenuación como el aumento de la densidad media del fitoplancton en el LN (Moreira *et al.*, 2014), donde se encuentran tres de los cinco ríos que desembocan en la bahía. Además, en este período, disminuye el tiempo de residencia de las aguas de la bahía, que pasa de 50 días en el período seco a 39 días en el lluvioso, lo cual implica mayor turbulencia (Seisdedo *et al.*, 2011).

Los máximos valores del coeficiente de atenuación promedio de la luz en el período lluvioso de 2012 y las mayores diferencias significativas entre este año con los demás estudiados, se relaciona con un aumento del promedio anual de precipitaciones en la ciudad de Cienfuegos, reportado por el Centro Meteorológico Provincial (Valle, 2015). Específicamente en los meses del período de lluvia de 2012, se alcanzan los valores máximos de precipitaciones según Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y de atenuación del período analizado. Por lo que el régimen fluvial es un factor ambiental importante que influye en los valores del coeficiente de atenuación.

En las estaciones cercanas al canal de intercambio con el Mar Caribe (1, 2 y 3) los valores del coeficiente de atenuación se corresponden con los tipos ópticos más claros, típicos de aguas oceánicas, de Jerlov (1976). Esto pudiera ser causa de las

corrientes originadas por la marea que están presentes en la circulación general de la bahía y poseen particular importancia en su canal de entrada, donde las características morfológicas de ser alargado, estrecho y profundo determinan que las corrientes de mareas sean reversibles. Durante el influjo en la zona del canal se observa como penetra agua del Mar Caribe a velocidades que suelen ser moderadas en las partes más anchas del canal e intensas en las más angostas (Caravaca, 2011). Por lo que hay un intercambio constante con el océano adyacente y de aguas mucho más transparentes que poseen una menor atenuación de la luz.

Específicamente, la estación 1, mostró las mayores diferencias de atenuación con respecto a las demás estaciones, ya que está en intercambio directo con el Mar Caribe oligotrófico (Pérez, 2001) y por tanto con aguas de gran transparencia. En contraste, las estaciones 5 y 9 no mostraron muchas diferencias con respecto a las demás estaciones, debido a su ubicación geográfica que les permite una menor incidencia antropogénica, fluvial y de las corrientes acuáticas que rigen el ecosistema (Caravaca *et al.*, 2012).

La variación espacio-temporal del coeficiente de atenuación promedio de la luz debe estar relacionada con las variaciones en la abundancia de componentes que afectan a la atenuación, reportadas por Jerlov (1976) y Kirk (2001), como es el caso de la clorofila a y los SSS. Sin embargo, debido a la insuficiencia de datos con mediciones de estos elementos en la zona de estudio, resulta difícil determinar la posible contribución de cada uno de los mismos en el valor total de atenuación.

El coeficiente de atenuación puede considerarse como un estimador de la

claridad del agua. La concentración de fitoplancton y de sedimentos orgánicos e inorgánicos disueltos en el agua marina obstaculizan el paso de la luz a través, por lo que esta variable no diferencia entre turbidez producida por materia orgánica o inorgánica. En este sentido, su relación con otros factores ambientales pudiera explicar el aumento de la atenuación debido a un incremento de la clorofila a o a un incremento en el aporte de material en suspensión (tanto orgánica como inorgánica) procedente de tierra.

Las elevadas concentraciones de clorofila a en el lóbulo norte y en las desembocaduras de los ríos dan lugar a un incremento en la turbidez debido a la presencia masiva de microalgas haciendo que el color de las aguas en estos sitios sea entre oscuro, verdoso o pardo-rojizo. Analizando la tendencia de los gráficos obtenidos para ambas variables (Fig. 4A) en el período de estudio, se detecta que existen valores máximos y mínimos del coeficientes de atenuación que no tienen sus homólogos en la serie de la concentración de clorofila a , por ejemplo en la estación 8 y 13, por lo que en estas estaciones otros factores son los que pudieran estar influenciando en el valor del $\langle K \rangle$ y cuyo origen podría estar vinculado a los aportes fluviales.

Otro elemento de gran importancia en el coeficiente de atenuación promedio de la luz son los SSS, debido a su influencia en la atenuación en los primeros metros de la columna de agua. Por tanto, tiene su contribución en la cantidad de radiación suministrada a los organismos fotosintetizadores del plancton y del bentos. Como los sólidos suspendidos orgánicos o inorgánicos están relacionados con la atenuación de la luz (Ordóñez, 2010),

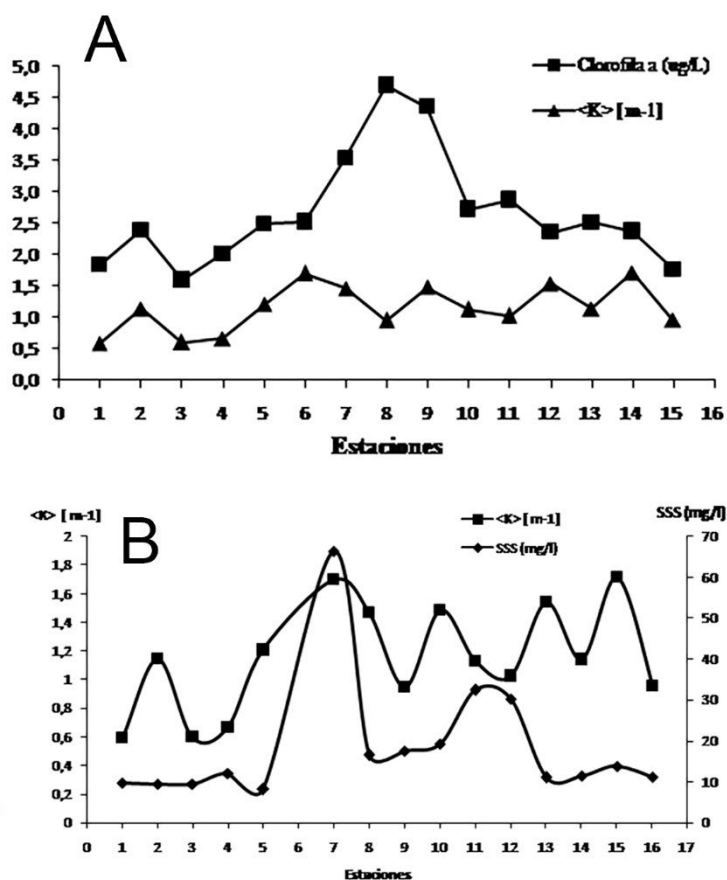


Fig. 4. Comportamiento promedio anual (2009-2014) por estaciones en la Bahía de Cienfuegos de (A) clorofila a y coeficiente de atenuación (K); y (B) sólidos suspendidos en la superficie (SSS) y coeficiente de atenuación (K).

fundamentalmente los tomados en la superficie de la columna de agua, se espera que su comportamiento sea similar a K . Sin embargo, en varias estaciones (5, 11–14) se encontró que no había una correspondencia (Fig. 4B) por lo que la falta de correlación entre estas dos variables se debieron a otros factores que estaban influyendo en la atenuación a la hora de la colecta. El aumento desproporcionado de los SSS en la estación 6 se debe a un registro en septiembre del 2012 fuera de los límites detectados hasta el momento y que

se le atribuyó a una descarga de sedimentos del río Damují en correspondencia a la inusual temporada de lluvia.

CONCLUSIONES

En el período 2009-2014 en 16 estaciones de monitoreo de la bahía de Cienfuegos se presentaron todos los tipos ópticos de Jerlov (1976). Además, se manifestó un predominio de las aguas C9 (las más oscuras) correspondiendo con la clasificación de aguas costeras, típico de ecosistemas estuáricos altamente antropizados, con una infraestructura económica marcada muy cercana al área de estudio, característica relevante de la bahía de Cienfuegos.

El coeficiente de atenuación promedio de la luz de las aguas de la bahía de Cienfuegos mostró variación espacio-temporal, donde el mayor valor del coeficiente de atenuación se presentó en el período lluvioso del 2012 en la estación 16 (aguas

C9) y el menor en la estación 1 en el año 2009 (aguas I). Mientras que los predominios de los tipos ópticos más oscuros se reportaron hacia el lóbulo norte de la bahía, donde se encuentran las zonas industriales y la mayor cantidad de ríos.

El coeficiente de atenuación promedio de la luz y su relación con la clorofila a y SSS no tuvieron correspondencia en algunas estaciones de muestreo, por lo que para esos puntos pudiera estar influyendo otros factores que inciden en la atenuación de la luz.

REFERENCIAS

- ARST, H., HALTRIN, V. y ARNONE, R. (2002). Informative Water Layer, Determined by Attenuation Depth, in Water Bodies of Different Turbidity. *Oceans*, 4.
- BOSS, E. (2014). Overview of Optical Oceanography. *Ocean Optics*.
- CARAVACA, M. (2011). *Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cienfuegos. Análisis y aplicación de la gestión ambiental*. (Tesis de Doctorado), Facultad Química Farmacia. Departamento Ingeniería Química. Santa Clara: Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas.
- CARAVACA, A. M., DOUILLET, P. y GARCÍA, O. D. (2012). Flushing time in the Cienfuegos bay, Cuba. *Natural Resource Modeling*, 25(3).
- CHRISTIAN, G. (2009). *Química Analítica*. Sexta Edición. México, D. F., McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S. A. de C. V.
- CLARK, R. J. (1983). *Coastal ecosystem management*. Sons, W., ed. New York.
- GUTIÉRREZ, P. y VARA, S. R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda edición. Mcgraw & HILL/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- HIRATA, T. y HØJERSLEV, N. (2008). Relationship between the irradiance reflectance and inherent optical properties of seawater. *Journal of geophysical research*, 113.
- JI, Z. (2008). *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries*. John Wiley & Sons, I.
- KIRK, O. (2011). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Press, C. U.
- KUEHL, O. (2001). *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. Segunda edición. Thompson Learning, 520-548.
- MOREIRA, Á., SEISDEDDO, M., LEAL, S., COMAS, A., DELGADO, G., REGADERA, R., ALONSO, C. Y MUÑOZ, A. (2007). Composición y abundancia del fitoplancton de la bahía de Cienfuegos, Cuba. *Rev. Invest. Mar.*, 28(2), 97-109.
- MOREIRA, A., SEISDEDDO, M., MUÑOZ, A., COMAS, A. y ALONSO, C. (2014). Spatial and temporal distribution of phytoplankton as indicator of eutrophication status in the Cienfuegos Bay, Cuba. *Revista de Gestão Costeira Integrada / Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 1-14.
- MOREL, A. y PRIEUR, L. (2005). *Analysis of variations in ocean color*. France.
- SEISDEDOS, M., MORALES, Y., SUÁREZ, R. y ARENCIBIA, G. (2011). Análisis de la respuesta de la bahía de Cienfuegos a los cambios en las concentraciones de nutrientes. *Rev. Cub. de Invest. Pesq.*, 28(2), 27-33.
- SEISDEDDO, M. (2014). *Informe Final Anual Evaluación de Calidad Ambiental de la bahía de Cienfuegos*. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos.
- OLSEN, S. B., PADMA, T. V. y RICHTER, B. D. (2006). Guía para el Manejo del Flujo de Agua Dulce a los Estuarios. En *USAID, The Nature Conservancy, The Coastal Resource Center - University of Rhode Island*. Washington DC.
- ORDÓÑEZ, J. (2010). *Limnología del embalse de Sau*. (Tesis Doctoral). Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona.
- PALAZOV, A. (2004). Application of light attenuation measurement for the determination of vertical plankton distribution in seawater. *VLIZ Special Publication 16*, 217-226
- PEREZ, R. (2001). *Papel de la Frontogénesis en la Interconectividad Mar Caribe-Golfo de Mexico*. Instituto de Oceanología

- Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Cuba.
- RODRIGUEZ, N. (2015). Turbidez. *Michael Jay*.
- POMBROL, A. V. (2015). *Potencial fotosintético de microalgas reportadas en florecimientos y su relación con las propiedades ópticas de la Bahía de Cienfuegos, Cuba*. (Tesis de Diploma). Universidad Central Marta Abreu, Santa Clara.
- ZAR, J. H. (1999). *Biostatistical analysis*. New Jersey: 4th ed. Prentice-Hall.