2.7. Caracterización óptica de la materia orgánica disuelta en la cuenca media y baja del río Usumacinta, México

Soria-Reinoso Ismael[1]; Alcocer Javier[2,*]; Sánchez-Carrillo Salvador[3]; Vargas-Sánchez Mariana[1]; Rivera-Herrera Erika M.[1] y Oseguera Luis A.[2]

[1] Programa de Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.
[2] Grupo de Investigación en Limnología Tropical, FES Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. de los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090, Tlalnepantla, Estado de México.
[3] Departamento de Biogeoquímica y Ecología Microbiana, Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC (MNCN-CSIC), Serrano 115 Bis, E-28006 Madrid, España.
[*] Autor para correspondencia: jalcocer@unam.mx

Resumen

La materia orgánica disuelta (DOM) modula el ciclo del carbono (C) debido a su incorporación a través del metabolismo microbiano. No obstante, se conoce muy poco sobre la concentración y composición de la DOM en sistemas fluviales tropicales, caracterizados por una fuerte estacionalidad climática, tal y como sucede en el río Usumacinta, el principal sistema fluvial de México. El objetivo de este estudio fue evaluar la variación temporal (lluvias vs. secas) de la concentración y la composición de la DOM cromofórica (CDOM) en la cuenca media y baja del río Usumacinta, utilizando técnicas de espectroscopía de absorbancia UV-Vis. El río Usumacinta presenta un mayor contenido de compuestos aromáticos, de alto peso molecular y mayor contribución de lignina y celulosa durante la estación lluviosa, asociado al mayor aporte terrestre por escorrentía y lixiviación. En la estación seca aumentan los componentes autóctonos de CDOM (fitoplancton) debido a la intensa degradación microbiana y fotoquímica asociada al mayor tiempo de residencia del agua. En ambas temporadas se observó un incremento de la CDOM aguas abajo, posiblemente por el aporte terrestre alóctono desde los Pantanos de Centla localizados en la cuenca baja. La CDOM se correlacionó fuertemente con el carbono orgánico disuelto (DOC), demostrando la utilidad de integrar el DOC en sistemas fluviales tropicales mexicanos a partir de mediciones ópticas simples.

Palabras clave: *Absorción de CDOM; DOC; río tropical; Chiapas; México.*

Abstract

Dissolved organic matter (DOM) modulates the carbon (C) cycle due to its incorporation through microbial metabolism. However, knowledge about the concentration and composition of DOM in tropical rivers, particularly those with strong seasonal variations like the Usumacinta River in Mexico, remains limited. Therefore, the objective of this study was to evaluate the temporal variation (rainy versus dry season) of the concentration and composition of the chromophoric DOM (CDOM) in the middle and lower basin of the Usumacinta River, using UV-Vis absorbance spectroscopy techniques. The Usumacinta River has a higher content of high molecular weight aromatic compounds and a more significant contribution of lignin and cellulose during the rainy season, associated with the greater terrestrial contribution by runoff and leaching. In the dry season, the autochthonous CDOM components (phytoplankton) increases due to the intense microbial and photochemical degradation associated with the longer water residence time. In both seasons, CDOM increased downstream, possibly due to the allochthonous terrestrial contribution from extensive Centla wetlands located in the lower basin. CDOM correlated strongly with dissolved organic carbon (DOC), demonstrating the convenience of integrating DOC into Mexican tropical river systems from simple optical measurements.

Keywords: *CDOM absorption; DOC; tropical river; Chiapas; Mexico.*

Introducción

La materia orgánica disuelta (DOM) representa un vínculo fundamental entre los ciclos del carbono (C) terrestre y acuático. Una cantidad significativa de DOM terrestre se degrada en los sistemas fluviales a través de la mineralización fotoquímica y biológica y regresa a la atmósfera como CO_2 (Cole *et al.,* 2007, Battin *et al.,* 2008). La DOM cromofórica (CDOM) o coloreada representa la fracción de DOM que absorbe la luz (Li y Hur 2017). La CDOM es una fuente de energía que incluye compuestos solubles (p.ej., carbohidratos, aminoácidos, ácidos húmicos y fúlvicos) de alto y bajo peso molecular (PM) de origen autóctono o alóctono que están regulados por el metabolismo ecosistémico interno (p.ej., consumo microbiano, la fotodegradación y la floculación) (Zhang *et al.,* 2021).

La composición química de la CDOM determina sus propiedades ópticas, por lo que las mediciones a través de espectroscopía UV-Vis se han utilizado ampliamente para caracterizar la abundancia y calidad de la CDOM en sistemas fluviales (Spencer *et al.,* 2010, Lambert *et al.,* 2015, Wang *et al.,* 2019). Existen varios parámetros ópticos para caracterizar cualitativamente la CDOM. Los coeficientes de absorción (a_{CDOM}) de longitudes de onda específicos (a_{254}, a_{350}, a_{440}) proporcionan información del contenido de lignina, color y tienen relevancia en los ciclos biogeoquímicos (Massicotte *et al.,* 2017, Zhang *et al.,* 2021). Además, una serie de *proxies* ópticos simples relacionados con la aromaticidad de DOM y el PM, incluida la relación de pendiente espectral (S_R) (Helms *et al.,* 2008) y la absorbancia UV específica a 254 nm ($SUVA_{254}$) (Weishaar *et al.,* 2003) proporcionan información sobre la composición química y origen de la CDOM. Los a_{CDOM} presentan correlaciones positivas con el C orgánico disuelto (DOC) por lo que son un *proxy* confiable para predecir o estimar el DOC (Massicotte *et al.,* 2017).

El río Usumacinta es el más importante en cuanto a descarga hacia el Golfo de México superado solo por el río Mississippi. Recientemente se han realizado las primeras aproximaciones para evaluar no solo los flujos laterales de C (Cuevas-Lara *et al.,* 2021, Soria-Reinoso *et al.,* 2022a), sino también los flujos verticales de emisiones de CO_2 y CH_4 hacia la atmósfera del río Usumacinta (Soria-Reinoso *et al.,* 2020, 2022b), encontrándose que la estacionalidad climática tropical (lluvias vs. secas), la litología carbonatada y la presencia de extensos humedales (p. ej., "Pantanos de Centla") determinan, en gran medida, los balances de C. Sin embargo, hasta la fecha, no se ha caracterizado la abundancia y calidad de la CDOM a pesar de su importancia en los procesos biogeoquímicos y ecológicos como parámetros más sensibles que las mediciones de DOC a los cambios ambientales. Por tal motivo, el objetivo del presente estudio fue determinar los coeficientes de absorción y caracterizar la variación estacional (temporada de lluvias -TL- frente a la de secas -TS-) de la CDOM del río Usumacinta en su porción mexicana (cuenca media y baja) para establecer la línea base para futuras investigaciones relacionadas con el ciclo y balance del C.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Este estudio se realizó en la cuenca media y baja del río Usumacinta, sureste mexicano. El río Usumacinta forma parte de la Región Hidrológica No. 30 (RH 30) Grijalva-Usumacinta, que constituye el sistema fluvial más importante de México y de América Central, y el décimo de América del Norte (Benke y Cushing 2009). La RH 30 tiene un área drenaje de ~112 550 km^2 y ocupa el segundo lugar en cuanto a descarga hacia el Golfo de México después del río Mississippi con un caudal medio de ~2678 $m^3\ s^{-1}$ (Muñoz-Salinas y Castillo 2015).

El río Usumacinta nace en la Sierra de los Cuchumatanes en Guatemala (3800 m.s.n.m.), tras lo cual ingresa al territorio mexicano por la selva Lacandona y fluye a través de Chiapas, Tabasco y Campeche,

hasta que se le une el río Grijalva en la zona denominada Tres Brazos, ~24 km antes de su desembocadura en el Golfo de México (Soares y García 2017). En la cuenca baja destacan la Reserva de la Biósfera "Pantanos de Centla", el sistema de humedales más grande de Mesoamérica (Yáñez-Arancibia *et al.,* 2009). La cuenca del río Usumacinta tiene un clima tropical húmedo, con precipitaciones de ~1500 a 2500 mm año^{-1}. Se diferencia una temporada lluviosa -TL- en verano (junio-noviembre) debido a la prevalencia de los vientos alisios que aportan hasta el 80% de la precipitación anual y una temporada seca -TS- en invierno (diciembre-mayo; Grodsky y Carton, 2003). El río Usumacinta no está represado en su curso mexicano y drena por una de las áreas de bosque tropical más grandes de la región; su cuenca está constituida fundamentalmente por rocas carbonatadas (Benke y Cushing, 2009).

Metodología

Se realizaron dos campañas de muestreo, una en noviembre de 2021 (lluvias -TL-) y otra en abril de 2022, (secas -TS-). El trabajo de campo se realizó en seis estaciones correspondientes a los ríos Tzendales (M1), Lacantún (M2), el cauce principal del río Usumacinta en Frontera Corozal (M3) y Tres Brazos (B1), y la bifurcación hacia el río San Pedro-San Pablo (B3). Se tomaron muestras de Laguna Cometa (B2), como sitio representativo de los humedales de los Pantanos de Centla en la cuenca baja (Figura 1).

Figura 1. Estaciones de muestreo a lo largo de la cuenca del río Usumacinta (M = cuenca media, B = cuenca baja).

En cada sitio, en la parte central del cauce, se midieron los parámetros fisicoquímicos de la columna de agua [temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), pH y conductividad eléctrica (K_{25})] utilizando una sonda multiparamétrica Hydrolab DS5. Para caracterizar el DOC, la CDOM y la concentración de Clorofila-a (Clor-a) se recolectaron por duplicado muestras de agua superficiales (0.5 m) utilizando una botella de muestreo UWITEC de 5 L.

Para la medición del DOC, se filtraron 60 ml de agua a través de filtros Whatman GF/F previamente calcinados. Las muestras de agua se fijaron con H_3PO_4 (40%) y se almacenaron en frascos ámbar para evitar cualquier reacción fotoquímica. El DOC se midió en un Analizador TOC Shimadzu.

Las muestras de CDOM se filtraron sucesivamente, primero a través de filtros pre-combustionados Whatman GF/F (0.7 µm) y luego por filtros Millipore (0.22 µm). Las muestras se almacenaron en oscuridad y frío (4 °C) en frascos (prelavados con HCl) ámbar de borosilicato para evitar reacciones microbianas y de fotooxidación (Helms *et al.,,* 2008).

Luego de climatizar las muestras a temperatura ambiente, se obtuvieron los espectros de absorbancia UV-Vis entre 200 nm y 800 nm, en intervalos de 1 nm, utilizando un espectrofotómetro de doble haz (Perkin Elmer, Lambda-35) con cubetas de cuarzo de 1 cm y agua ultrapura Milli-Q como blanco. Se restó la absorbancia media de 700 a 800 nm de todos los valores de absorbancia espectral para eliminar la línea base instrumental, la dispersión y efectos refractivos (Helms *et al.,* 2008). Los coeficientes de absorción neperianos a_{CDOM} (m^{-1}) se obtuvieron a partir de los datos de absorbancia corregidos (A) en función de la longitud de la cubeta (L; 0.01 m), según la ecuación 1.

$$a_{CDOM} = 2.303 * A/L \quad (1)$$

Se calcularon los valores de $SUVA_{254}$ dividiendo la absorbancia (A) a 254 nm por la concentración de DOC (mg L^{-1}) y se expresó en unidades de litro por miligramo de C por metro (Weishaar *et al.,* 2003). Las pendientes espectrales (S) se calcularon por ajuste lineal de los espectros de absorción del rango de longitud de onda (275-295 nm y 350-400 nm). El coeficiente de pendiente espectral S_R se calculó como $S_{275-295}$ dividido por $S_{350-400}$ (Helms *et al.,* 2008). La concentración de Clor-a se midió por extracción en acetona y fluorometría (EPA 445.0, Arar y Collins, 1997).

Las diferencias temporales (lluvias *vs.* secas) se determinaron mediante un análisis factorial de varianza (cuenca x temporada). Se realizó la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene para corroborar la normalidad y homocedasticidad de varianzas. Las variables que no cumplieron con estos supuestos fueron transformadas a escala logarítmica y estandarizados para tener una distribución de media de 0 y desviación estándar de 1. Se determinaron correlaciones no paramétricas (Spearman) con las variables fisicoquímicas, utilizando el programa SigmaPlot V14.0.

Resultados y Discusión

Variables fisicoquímicas

Las variables ambientales de la cuenca media y baja se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Variables ambientales de la cuenca media y baja del río Usumacinta durante lluvias 2021 (TL) y secas 2022 (TS).

Cuenca		T (°C)		OD (mg L^{-1})		pH		K_{25} (µS cm^{-1})		Clor-a (µg L^{-1})	
		TL	TS	TL	TS	TL	TS	TL	TS	TL	TS
Media	Promedio	24.2	28.2	8.1	6.9	7.8	8.1	573	683	0.42	2.41
	d.e	0.9	1.4	0.5	0.3	0.2	0.0	90	170	0.31	1.71
Baja	Promedio	27.3	29.6	4.5	6.0	7.6	8.8	563	13 240	1.97	7.11
	d.e	0.8	1.1	1.9	1.6	0.2	0.5	109	15 915	0.30	3.55
Global	Promedio	25.9	29.1	6.1	6.4	7.7	8.5	567	8456	1.19	4.78
	d.e	1.7	1.4	2.3	1.4	0.2	0.5	97	13 902	0.84	3.65
	Mín.	22.9	26.5	1.1	1.8	7.0	7.9	465	503	0.11	0.68
	Máx.	27.8	32.3	8.6	8.6	8.0	9.3	730	54 829	2.85	20.68

TL = temporada de lluvias; TS = temporada de secas; T = temperatura; OD = oxígeno disuelto; K_{25} = conductividad eléctrica estandarizada a 25ºC; Clor-a = concentración de Clorofila-a; d.e = Desviación estándar, Mín. = mínimo, Máx. = máximo.

La temperatura fue mayor en la TS (F=57.8; p<0.0001) y en la cuenca baja (F=28.2; p<0.001). El OD no presentó diferencias entre temporadas (p>0.05) pero si valores más altos en la cuenca media que en la baja (F=9.3; p<0.006). El pH (F=5.9; p<0.05) y la K_{25} (F=38.9; p<0.001) fueron significativamente diferentes (cuenca x temporada), con valores más altos de K_{25} en la cuenca baja y en la TS por el ingreso de una cuña salina, que no se presentó en la TL. La concentración de Clor-a fue significativamente mayor en la TS (F=43.3; p<0.0001), con valores más altos en la cuenca baja (F=47.7; p<0.0001), similar a lo reportado para el año 2017-2018 (Cuevas-Lara *et al.,* 2021, Soria-Reinoso *et al.,* 2022a).

Concentración de DOC y CDOM

El DOC no presentó diferencias significativas (p>0.05) entre la TL (3.54±3.21 mg L^{-1}) y la TS (3.06±2.69 mg L^{-1}) pero sí valores más altos en la cuenca baja que en la media (F=35.5; p<0.0001; Figura 2a). En la TL los valores mínimos se registraron en el río Lacantún (M2; 0.53 mg L^{-1}) y máximos en Laguna Cometa (B2; 9.74 mg L^{-1}). Mientras tanto, en la TS el DOC mínimo (1.04 mg L^{-1}) y máximo (11.61 mg L^{-1}) se midieron en el cauce principal en Frontera Corozal (M3) y Laguna Cometa (B2), respectivamente. No se detectaron diferencias temporales del DOC porque en Tzendales (M1), Lacantún (M2) y Laguna Cometa (B2) el DOC fue mayor en secas (Figura 2a). Esto se explica posiblemente porque en Tzendales (M1) y Lacantún (M2) se registraron eventos de lluvias en la TS durante los días previos al muestreo, lo cual explicaría el mayor arrastre y lixiviación de DOC alóctono. Mientras tanto, el elevado DOC registrado en Laguna Cometa (B2) en la TS puede asociarse al aporte autóctono (fitoplancton), lo cual se verifica por la correlación del DOC con la Clor-a (r = 0.54, p < 0.05).

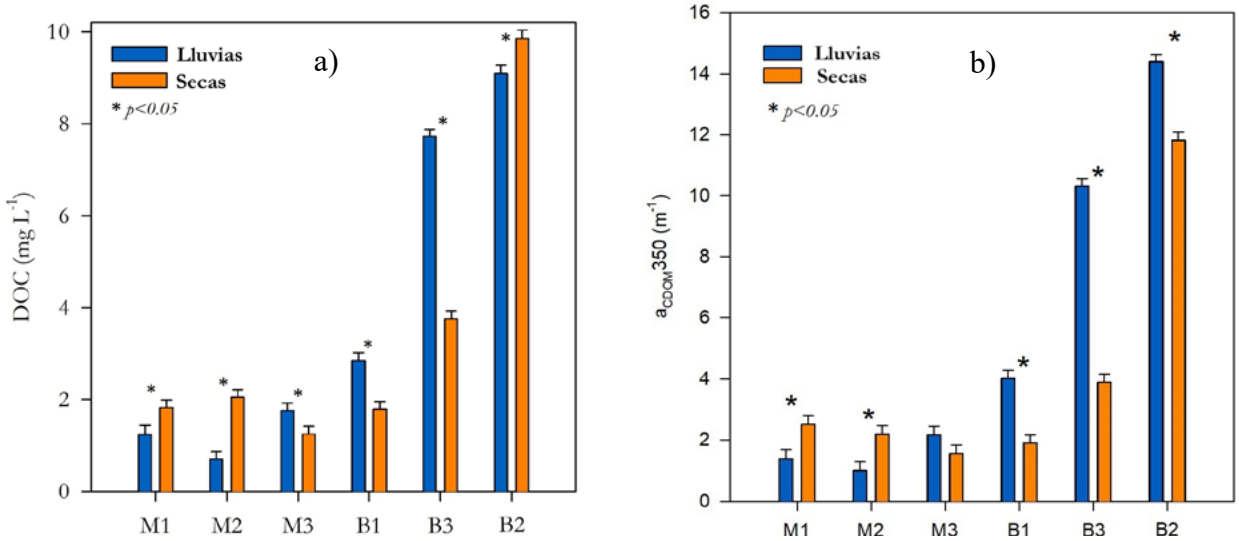


Figura 2. Variación longitudinal del DOC (a) y de la absorción promedio de CDOM a 350 nm (a_{350}) (b) del río Usumacinta durante la época de lluvias 2021 (TL) y secas 2022 (TS).

La concentración de CDOM se reporta como a_{350}, *proxy* de lignina terrestre y parámetro útil para el estudio de los ciclos biogeoquímicos en los sistemas acuáticos (Zhang *et al.,* 2021). Al igual que el DOC, no se detectaron diferencias significativas (p>0.05) entre la TL (5.70±4.85 m^{-1}) y la TS (3.98±4.11 m^{-1}) pero sí un incremento significativo de la a_{350} en la cuenca baja (F=30.8; p<0.0001; Figura 2b). Los valores más altos se registraron en Laguna Cometa (B2) en ambas temporadas (14.32±3.17 m^{-1}); mientras que, el mínimo de la TL (0.96 m^{-1}) se registró en el río Lacantún (M2) y de la TS (0.43 m^{-1}) en el Frontera Corozal (M3). Se observó una alta correlación entre los a_{CDOM} dentro de sus regiones del espectro de luz ultravioleta (a_{254}; a_{320}; a_{350}; a_{365}; r^2=0.79-0.99; p<0.001), por lo que presentaron un comportamiento longitudinal similar. Así mismo, los a_{CDOM} (254, 350 y 440) se correlacionaron fuerte y positivamente con el DOC (r>0.71) para ambas temporadas, como se ha observado en varios sistemas fluviales (Spencer

et al., 2012). Por lo tanto, se derivaron relaciones CDOM-DOC robustas para la cuenca media y baja del río Usumacinta, diferenciando el efecto temporal (Figura 3a y b).

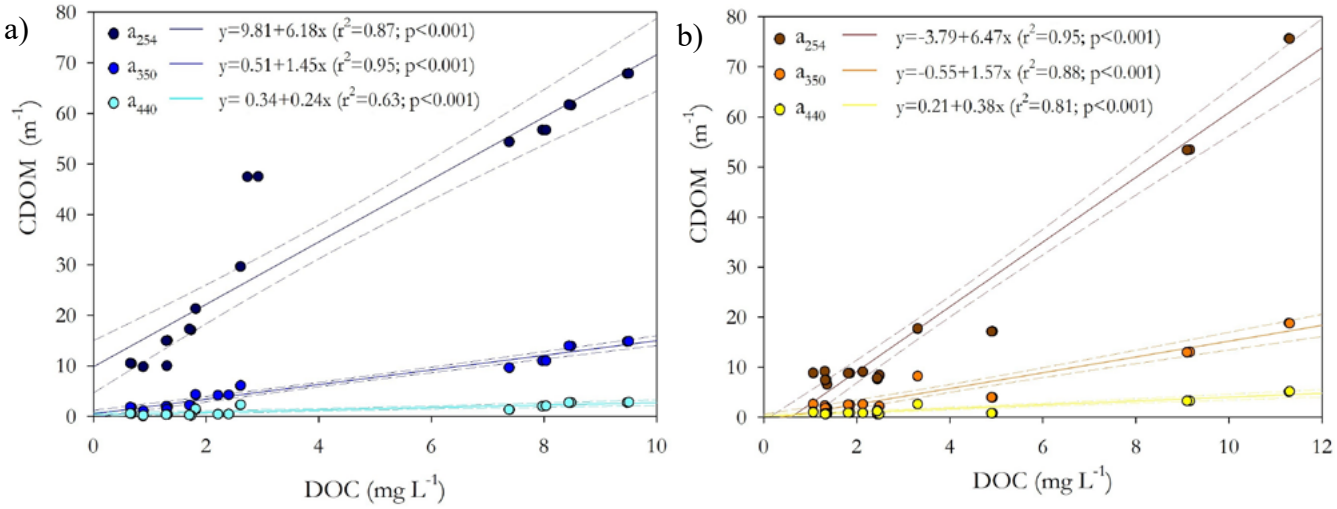


Figura 3. Relaciones entre el carbono orgánico disuelto (DOC) y la absorción de materia orgánica disuelta cromofórica (CDOM) para la temporada de lluvias (a) y de secas (b) en la cuenca media y baja del río Usumacinta.

Fuentes y procesamiento de CDOM

Los valores de $SUVA_{254}$ (Figura 4a) variaron de 3.07 a 5.84 L mg C^{-1} m^{-1} (4.62±2.03 L mg C^{-1} m^{-1}) en la TL y de 1.53 a 3.18 L mg C^{-1} m^{-1} en la TS (2.13±0.76 L mg C^{-1} m^{-1}). Se observaron diferencias significativas entre ambas temporadas (F=39.8; p<0.0001), pero no entre la cuenca media y baja (p>0.05). $SUVA_{254}$ se ha correlacionado positivamente con el grado de aromaticidad de la DOM (Weishaar *et al.,* 2003). Esto se verifica para el río Usumacinta por la correlación del $SUVA_{254}$ con la Clor-a (r=-0.52; p<0.05), lo cual indica una mayor proporción relativa de compuestos menos aromáticos en la TS.

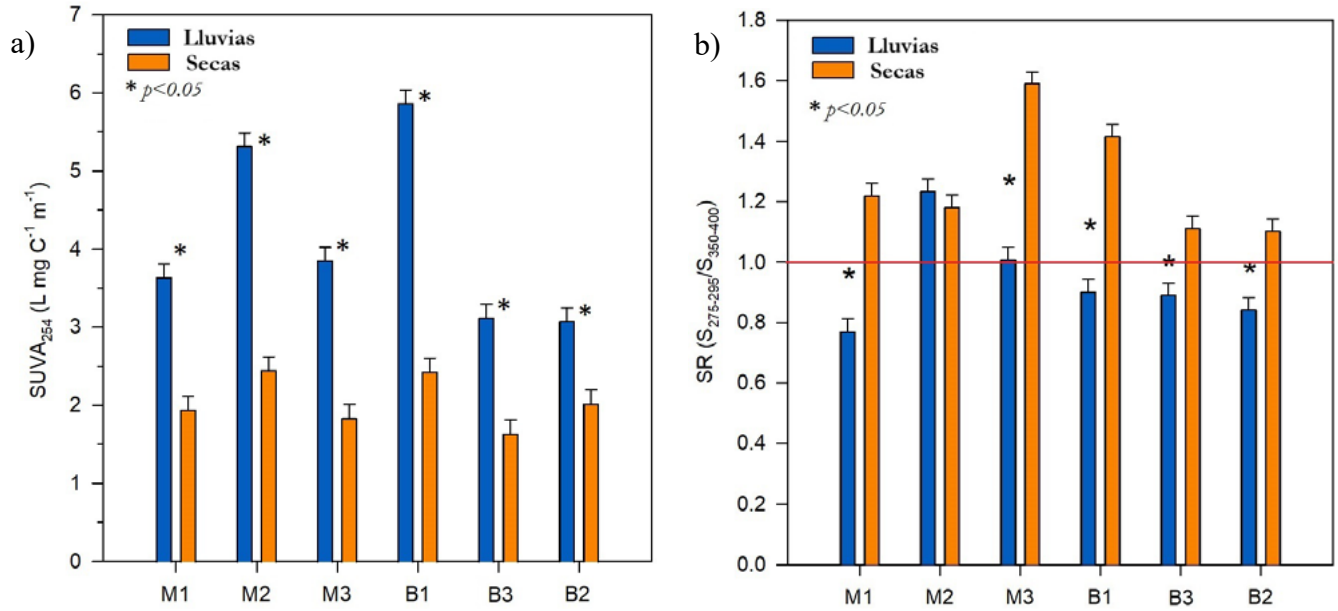


Figura 4. Variación longitudinal de los parámetros cualitativos de la CDOM (a) Absorbancia UV específica a 254 nm ($SUVA_{254}$) y (b) coeficiente de pendiente espectral (S_R) en el río Usumacinta durante la época de lluvias (TL) y secas (TS). En (b) se distingue el límite de 1 para diferenciar compuestos de alto y bajo peso molecular.

El coeficiente de pendiente espectral (S_R) se ha propuesto como un *proxy* inverso del PM (Helms *et al.,* 2008). Los valores de S_R (Figura 4b) fluctuaron entre 0.69 y 1.26 en la TL (1.09±0.37) y entre 1.07 y 1.58 en la TS (1.19±0.35). No se encontraron diferencias significativas entre la cuenca media y baja ($p>0.05$) pero se distinguen valores >1 en la TS y <1 en la TL, excepto Lacantún (M2). Esto explica que hay un enriquecimiento de compuestos de bajo PM (< 1000 Da; menor humificación) derivados de fuentes autóctonas en la TS. Mientras tanto, en la TL se produce una acumulación de compuestos de alto PM (> 1000 Da) de origen terrestre (Helms *et al.,* 2008). Los valores de S_R también pueden incrementar debido a la fotodegradación de CDOM (rompimiento de enlaces y pérdida de DOM de alto PM). En la TS, la fotodegradación podría aumentar por la menor turbidez y contenido de sólidos suspendidos totales (Cuevas-Lara *et al.,* 2021) que limitan la penetración de luz.

El $SUVA_{254}$ y S_R se han utilizado como *proxies* para rastrear las fuentes y procesos de DOM en los sistemas fluviales. En general, altos valores de DOC durante los periodos de alto flujo, están relacionados con mayor aromaticidad (alto $SUVA_{254}$) y PM medio-alto (S_R bajo). En el flujo base, el mayor tiempo de residencia aumenta la probabilidad de descomposición de DOC terrestre; por lo tanto, el bajo PM y menor aromaticidad en secas probablemente reflejan procesos de degradación fotoquímica o microbiana. Los cambios estacionales en las propiedades de CDOM se han verificado para ríos tropicales (Spencer *et al.,* 2010, Lambert *et al.,* 2015) y templados (Spencer *et al.,* 2012).

Conclusiones

El presente estudio reporta por primera vez la variación de las propiedades ópticas de CDOM en el río Usumacinta. Se observó que la variación temporal tropical juega un rol fundamental en la concentración de CDOM. La elevada aromaticidad ($SUVA_{254}$), el contenido de lignina (a_{350}), color (a_{440}) y la acumulación de compuestos de alto peso molecular ($S_R<1$) son indicativos de CDOM terrígena que ingresa al río durante la temporada de lluvias. Por otro lado, los compuestos de menor peso molecular (SR>1) y poco aromáticos ($SUVA_{254}$) están asociados con una mayor contribución del metabolismo microbiano al almacén ("pool") de CDOM, indicativos de producción interna de CDOM en la temporada de secas. Se determinaron correlaciones CDOM-DOC útiles para posteriores estudios relacionados con el ciclo y presupuesto del C en sistemas fluviales.

Agradecimientos

El presente trabajo fue sufragado por el proyecto PINCC 2020 "*Cuerpos Acuáticos Epicontinentales: Papel en la Dinámica del Carbono y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en México"*, PINCC 2021 "*Cuerpos acuáticos epicontinentales: papel en la dinámica del carbono y emisiones de gases de efecto invernadero en México. Continuación*", PINCC 2023 "*Cuerpos Acuáticos Epicontinentales: Papel en la Dinámica del Carbono y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en México. Segunda parte: Eutroficación y emisión de GEI*", el proyecto DGAPA/PAPIIT IN216818 *"Flujos de carbono, nutrientes y sedimentos en un sistema lótico tropical"* y el proyecto ICOOP-CSIC *"Los grandes ríos del neotrópico y su contribución al ciclo de carbono global (COOPA20472)".* Un agradecimiento especial al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. Asimismo, a Fundación Natura y Ecosistemas Mexicanos AC, a los colegas del equipo de Limnología Tropical de la FES Iztacala (UNAM) por su apoyo en el trabajo de campo.

Literatura citada

Arar, E. J., y G. B. Collins. 1997. Method 445.0 In vitro determination of Chlorophyll a and Pheophytin ain marine and freshwater algae by fluorescence. Página U.S. Environmental Protection Agency. United Sates Environmental Protection Agency, Office of Research

and Development. National Exposure Research Laboratory, Cincinnati.

Battin, T. J., L. A. Kaplan, S. Findlay, C. S. Hopkinson, E. Marti, A. I. Packman, J. Denis Newbold, and F. Sabater. 2008. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. Nature Geoscience 1:95–100. https://doi.org/10.1038/ngeo101.

Benke, A. C., and C. E. Cushing. 2009. Rivers of North America. Páginas 425–437 *en* Elsevier, editor. Encyclopedia of Inland Waters.

Cole, J. J., Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg, and J. Melack. 2007. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. Ecosystems 10:171–184. 10.1007/s10021-006-9013-8.

Cuevas-Lara, D., J. Alcocer, D. Cortés-Guzmán, I. F. Soria-Reinoso, F. García-Oliva, S. Sánchez-Carrillo, and L. A. Oseguera. 2021. Particulate organic carbon in the tropical Usumacinta River, southeast Mexico: Concentration, flux, and sources. Water 13 (11): 1561. 10.3390/w13111561.

Helms, J. R., A. Stubbins, J. D. Ritchie, E. C. Minor, D. J. Kieber and K. Mopper. 2008. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. Limnology and Oceanography 53:955–969 https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955.

Lambert, T., F. Darchambeau, S. Bouillon, B. Alhou, J. D. Mbega, C. R. Teodoru, F. C. Nyoni, P. Massicotte and A. V. Borges. 2015. Landscape Control on the Spatial and Temporal Variability of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Dissolved Organic Carbon in Large African Rivers. Ecosystems 18:1224–1239. https://doi.org/10.1007/s10021-015-9894-5.

Li, P. and J. Hur. 2017. Utilization of UV-Vis spectroscopy and related data analyses for dissolved organic matter (DOM) studies: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 47:131–154. https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1309186

Massicotte, P., E. Asmala, C. Stedmon and S. Markager. 2017. Global distribution of dissolved organic matter along the aquatic continuum: Across rivers, lakes and oceans. Science of the Total Environment 609:180–191. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.076.

Muñoz-Salinas, E. and M. Castillo. 2015. Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. Catena 127:270–278. 10.1002/esp.3880.

Soares, D. y A. García. 2017. La cuenca del río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático. Primera ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México.

Soria-Reinoso, I., J. Alcocer, L. Oseguera-Pérez, R. Aucancela, D. Cuevas-Lara, D. Cortés-guzmán, M. Merino-Ibarra, J. A. Ramírez-Zierold, y J. Valenzuela. 2020. Dinámica de la presión parcial de CO2 a lo largo del río Usumacinta, México. Página 602 *en* M. Hernández, M. Rojo, M. Fuentes, A. Velázquez, y M. Bolaños, editores. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2020. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Xochimilco, CDMX, México.

Soria-Reinoso, I., J. Alcocer, S. Sánchez-Carrillo, F. García-Oliva, D. Cuevas-Lara, D. Cortés-Guzmán and L. A. Oseguera. 2022a. The Seasonal Dynamics of Organic and Inorganic Carbon along the Tropical Usumacinta River Basin (Mexico). Water 14:2703. 10.3390/w14172703.

Soria-Reinoso, I., S. Sánchez-Carrillo, J. Alcocer, M. Vargas-Sánchez, y L. A. Oseguera. 2022b. Variación temporal y espacial de las concentraciones y flujos de CH4 en el Río Usumacinta, México. Páginas 51–58 *en* M. Hernández, O. Briones-Virrareal, M. Bolaños, y P. Ibarra, editores. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2022. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Instituto de Ecología (INECOL)., Texcoco, Estado de México, México.

Spencer, R. G. M., K. D. Butler and G. R. Aiken. 2012. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 117. 10.1029/2011JG001928

Spencer, R. G. M., P. J. Hernes, R. Ruf, A. Baker, R. Y. Dyda, A. Stubbins and J. Six. 2010. Temporal controls on dissolved organic matter and lignin biogeochemistry in a pristine tropical river, Democratic Republic of Congo. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 115:1–12. 10.1029/2009JG001180.

Wang, X., Y. Wu, H. Bao, S. Gan and J. Zhang. 2019. Sources, Transport, and Transformation of Dissolved Organic Matter in a Large River System: Illustrated by the Changjiang River, China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 124:3881–3901. 10.1029/2018JG004986.

Weishaar, J. L., G. R. Aiken, B. A. Bergamaschi, M. S. Fram, R. Fujii and K. Mopper. 2003. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. Environmental Science and Technology 37:4702–4708. 10.1021/es030360x.

Yáñez-Arancibia, A., J. W. Day and B. Currie-Alder. 2009. Functioning of the Grijalva-Usumacinta River Delta, Mexico: Challenges for Coastal Management. Ocean Yearbook 23:473–501. https://doi.org/10.1163/22116001-90000205.

Zhang, Y., L. Zhou, Y. Zhou, L. Zhang, X. Yao, K. Shi, E. Jeppesen, Q. Yu and W. Zhu. 2021. Chromophoric dissolved organic matter in inland waters: Present knowledge and future challenges. Science of the Total Environment 759. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143550.

Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México.

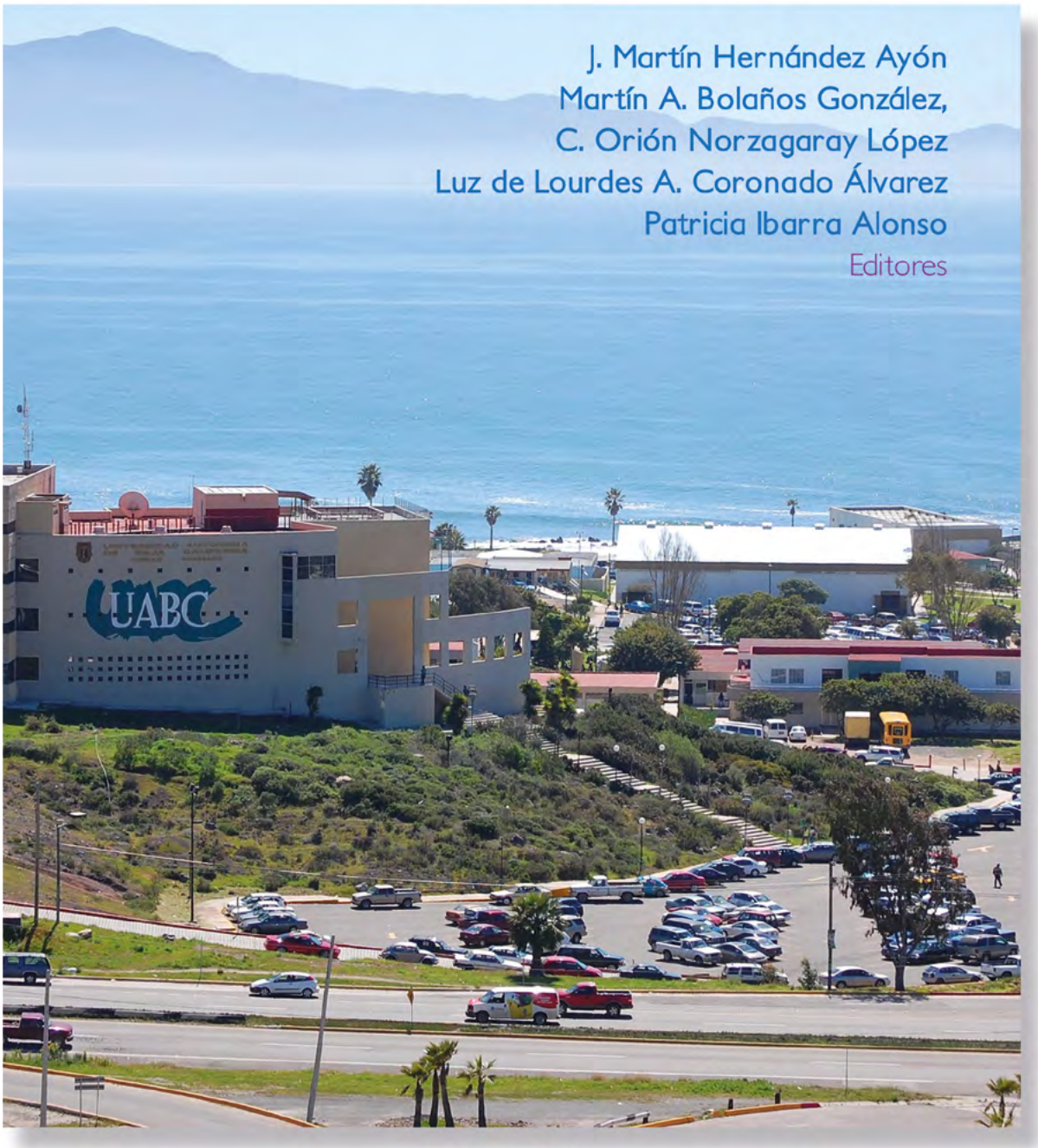
Síntesis a 2023

PROGRAMA MEXICANO DEL CARBONO

2023

Año 5

Número 5



J. Martín Hernández Ayón
Martín A. Bolaños González,
C. Orión Norzagaray López
Luz de Lourdes A. Coronado Álvarez
Patricia Ibarra Alonso
Editores

PMC Programa Mexicano del Carbono
Red Temática del CONACYT

Instituto de Investigaciones Oceanológicas

Stanford | México Clean Economy 2050

The Ocean Foundation

PMC

Programa Mexicano del Carbono

Red Temática del **CONAHCYT**

Forma correcta de citar:

Hernández Ayón J. M.; Bolaños González M. A.; Norzagaray López C. O.; Coronado Álvarez L. e Ibarra Alonso P. (Editores). 2023. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2023. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Texcoco, Estado de México, México. ISSN 2954-4882. 326 p.

Programa Mexicano del Carbono A.C.
Calle Chiconautla No. 8 Interior A
Colonia Lomas de Cristo, Texcoco, Estado de México, México

www.pmcarbono.org
Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).
Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.

Diseño Gráfico: Oscar J. Velázquez R.

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL CICLO DEL CARBONO Y SUS INTERACCIONES EN MEXICO. Año 5, No. 5, enero - diciembre de 2023. Es una publicación anual editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C., calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, www.pmcarbono.org Editor responsable: José Martín Hernández Ayón. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-121910292200-102, ISSN 2954-4882. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: José Martín Hernández Ayón, Calle Chiconautla No. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, C.P. 56225 Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, diciembre de 2023.

Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2023

J. Martín Hernández Ayón, Martín A. Bolaños González,
C. Orión Norzagaray López, Luz de Lourdes A. Coronado Álvarez
y Patricia Ibarra Alonso

EDITORES

Programa Mexicano del Carbono (PMC)

Universidad Autónoma de Baja California (UABC)

Ensenada, Baja California, México

Diciembre 2023