Capítulo 5

El Bajo Orinoco: aspectos hidrosedimentológicos, geoquímicos e influencia antrópica

Abrahan MORA¹, Alain LARAQUE², José Luis LÓPEZ³

1. Centro del Agua para América Latina y el Caribe. Tecnológico de Monterrey. Av. Eugenio Garza Sada Sur Nº 2501, CP 64849 Monterrey, Nuevo León, México.

abrahanmora@itesm.mx 2. GET - UMR CNRS / IRD / UPS – UMR 5563 du CNRS, UR 234 de l'IRD; OMP 14 Avenue Edouard Belin; 31400 Toulouse, Francia.

alain.laraque@ird.fr

3. Instituto de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Los Chaguaramos, Caracas, Venezuela.

lopezjoseluis7@gmail.com

En este capítulo se discute sobre la geomorfología del cauce principal del bajo Orinoco, la dinámica del sedimento total suspendido, las variaciones de sus flujos entre los períodos 1975-1985 y 2006-2010, y la geoquímica de elementos mayoritarios y traza entre los años 2003-2008 y 2007-2008, respectivamente. Cálculos recientes del flujo del material suspendido indicaron un menor valor del flujo de la carga suspendida del Orinoco (74x106 t/año), en comparación a los valores reportados durante el período 1975-1985 (entre 90x106 y 150x106 t/año). Esta diferencia podría ser explicada en parte por el impacto generado por las represas hidroeléctricas construidas en las faldas de la Cordillera de los Andes. Las series de caudales disponibles mostraron que el río Orinoco en Ciudad Bolívar posee un caudal promedio anual de 32.700 m³/s y una baja variabilidad interanual (1,66). Sin embargo, existe una alta variación estacional durante el ciclo hidrológico en los caudales (caudales mensuales máximo/mínimo = 37,2) y en los flujos del material en suspensión. Los patrones de concentración de los elementos mayoritarios disueltos (Na, Ca y Mg) indicaron que el contenido de estos elementos está controlado por un proceso de dilución. Sin embargo, la variación temporal de la concentración de Si y K puede ser influenciada por procesos biológicos. La solubilidad de algunos elementos traza disueltos (Fe, Mn, Zn, Cu, Cr) en el bajo Orinoco se encuentra determinada por ciertas variables como el pH, el potencial redox del sistema y posiblemente por el carbono orgánico disuelto. A pesar que las obras de ingeniería y diversas actividades como la agricultura han afectado ciertos sectores del bajo Orinoco, los estudios aquí realizados demostraron el buen estado de conservación del río Orinoco en su sección baja. Esto se debe principalmente a su alto caudal, el cual diluye la mayoría de los contaminantes que son aportados por las diversas actividades antropogénicas.

Palabras Clave: río Orinoco, caudales, flujos, sedimentos, elementos mayores, elementos traza, conservación.

INTRODUCCIÓN

Hasta su desembocadura en el océano Atlántico, la cuenca del río Orinoco cubre un área total que supera los 1x106 km², mientras que el río muestra un caudal promedio interanual de 37.600 m3/s (Córdova 1999, Silva 2005). Según el área de la cuenca y la descarga, la variabilidad temporal de los flujos de material disuelto y en suspensión podría proporcionar importantes indicadores del cambio climático y del impacto humano, especialmente si la cuenca de este río ha sido relativamente poco alterada por las actividades humanas. Desde hace tres décadas, los aspectos hidrosedimentarios y geoquímicos del Orinoco han sido estudiados ampliamente (e.j. Meade et al. 1983, 1990, Nordin y Meade 1985, Stallard 1985, 1987, Paolini et al. 1987, Lewis y Saunders 1989, Stallard et al. 1990, Weibezahn 1990, Meade 1994, Nordin et al. 1994, Pérez-Hernández y López 1998, Millán et al. 2001, Márquez 2011, Mora 2011). Aunque estos estudios han trabajado aspectos como la carga de sedimento en suspensión aportada por el Orinoco al océano Atlántico, las formas sedimentarias terrestres y fluviales en las llanuras de inundación, el transporte de carga de fondo y la variación temporal de algunos parámetros fisicoquímicos, la mayoría de estos trabajos han sido generalmente realizados usando sólo uno o dos ciclos hidrológicos y/o haciendo muestreos irregulares y de baja frecuencia. Por consiguiente, estos valores deben ser actualizados tomando en cuenta series temporales que incluyan una mayor frecuencia en la recolección de datos durante varios ciclos hidrológicos. Debido a la necesidad de actualizar los aspectos mencionados, este trabajo tuvo como objetivo, actualizar la información sobre los flujos de material suspendido y disuelto y la variabilidad espacio-temporal de elementos mayoritarios y trazas en el bajo Orinoco, considerando aspectos hidrosedimentológicos, geomorfológicos y geoquímicos del bajo Orinoco, que se extiende desde la confluencia con el río Apure hasta la desembocadura en el Delta del Orinoco (Silva 2005).

La cuenca del río Orinoco

La cuenca del Orinoco (Figura 1) está ubicada en el norte de América del Sur, entre 02° y 09°N y 75° y 62°O. El 70% del área de la cuenca se encuentra en Venezuela y el 30% en Colombia (Silva 2005). Las cabeceras del Orinoco se encuentran a 1.047 msnm en el Cerro Delgado Chalbaud y la longitud de su cauce principal es de unos 2.140 km (Silva 2005). La cuenca comprende tres grandes zonas fisiográficas: los Andes y la Cordillera de la Costa, los Llanos y el Escudo de Guayana. La geomorfología fluvial del río Orinoco presenta patrones de características mixtas entre trenzada y ligeramente sinuosa. El cauce principal trenzado se desarrolla en zonas de expansión de flujo, localizadas principalmente aguas abajo de la confluencia con el río Apure, que se caracterizan por numerosos bancos de arena e islas que dividen el flujo en varios canales (López y Pérez-Hernández 1999). El año hidrológico para el bajo Orinoco en su principal estación de aforo en Ciudad Bolívar (Figura 1) se inicia en abril y se caracteriza por un régimen unimodal donde las crecidas son entre agosto-septiembre y el estiaje entre febrero-abril (Figura 2). En esta estación de aforo la amplitud entre las aguas bajas y altas alcanza los 16 m.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de caudales, carga de sedimentos, carga disuelta y flujos. En la estación de Ciudad Bolívar fluyen las aguas que discurren por un 83,6% de la superficie total de la cuenca del Orinoco. Esta estación hidrológica con curva de gasto tiene la serie más larga de datos de caudal de toda la cuenca del Orinoco. De hecho, desde 1926 los niveles del río han sido registrados diariamente por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). Las curvas de gasto han sido desarrolladas por INAMEH y por la Universidad Central de Venezuela (UCV) en Puente Angostura, justo aguas arriba de Ciudad Bolívar, a través de aforos con correntímetros tradicionales. Por lo tanto, los datos de caudal usados en este estudio provienen de Córdova (1999) y de la base de datos del INAMEH. A partir de análisis estadísticos de las series de caudales del Orinoco, se buscaron segmentos homogéneos separados por discontinuidades (se define discontinuidad como un cambio en las características de la probabilidad de la serie de tiempo en un punto dado en el tiempo) (Figura 3). La noestacionalidad se define por la existencia de una singularidad representada por un cambio en la media (Aka et al. 1996). Los métodos utilizados aquí incluyeron la prueba de Pettitt (1979), estadística de U Buishand (Buishand 1982), el procedimiento bayesiano de Lee y Heghinian (1977) y la prueba de segmentación de Hubert (Hubert et al. 1989).

Se tomaron muestras de agua (en la superficie y lecho del río) en diversos sectores distribuidos a lo largo del bajo Orinoco (Figura 1) para determinar la composición granulométrica de los sedimentos en los sectores estudiados. De manera similar, el observatorio ORE-Hybam recolectó durante cuatro años (2007-2010) un total de 143 muestras de agua (0,5 l) a 30 cm de profundidad en el medio de la sección del río en la estación de Ciudad Bolívar, con una frecuencia de tres veces por mes (cada diez días) para la determinación de los sólidos suspendidos totales



Figura 1. Cuenca del río Orinoco (adaptado de Warne et al. 2002).

(SST) y una vez por mes para el estudio de las cargas disueltas. Se utilizaron filtros pre-pesados de acetato de celulosa de 0,45 µm para determinar la concentración de sólidos totales disueltos (STD) y SST y filtros pre-pesados GFF de 47 mm de diámetro para determinar la concentración de carbono orgánico disuelto (COD). Las filtraciones se hicieron en el laboratorio de la UNEG en Ciudad Guayana. Las muestras de agua para determinar las concentraciones de STD y COD fueron enviadas al laboratorio GET/UPS en Toulouse (Francia). Los aniones mayoritarios fueron determinados por cromatografía iónica, mientras que los macro y micro elementos (Na, K, Ca, Mg, Si, Fe, Al, Mn, Ti y P) fueron determinados por ICP-OES. Para los análisis de COD, se empleó el método de oxidación catalítica a alta temperatura. En la estación de Ciudad Bolívar se realizaron diez aforos sólidos en diferentes etapas del ciclo hidrológico. El procedimiento fue el siguiente: primero se realizó un aforo líquido mediante un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), el cual calcula la descarga de agua mediante la transmisión de ondas acústicas que son reflejadas por el material en suspensión y son nuevamente captadas por el equipo (Filizola y Guyot 2004). Luego, durante el aforo líquido, se realizó un muestreo del material suspendido en nueve sectores de la sección, correspondientes a profundidades (superficie, medio, fondo) ubicadas en tres verticales situadas a 25, 50 y 75% de la sección transversal del río (ver metodología descrita en Filizola y Guyot (2004)



Figura 2. Variación del caudal promedio mensual (Q- línea continua), de las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST - línea punteada) (a) y de los flujos de los SST (b) para el río Orinoco en Ciudad Bolívar durante el período 2007-2010 (Laraque et al. 2013a).



Figura 3. Fases homogéneas de flujo líquido, determinadas a partir de las series de tiempo de caudal mínimo mensual (1926–2010) para el río Orinoco en Ciudad Bolívar. Los caudales medios interanuales para cada fase homogénea de flujo son indicados por las líneas segmentadas (Laraque et al. 2013a).

(2004) y www.ore-hybam.org). No fue posible muestrear los SST con la misma frecuencia diaria con la que se realizó la lectura del caudal del río, por lo cual las frecuencias de muestreo de los SST fueron adaptadas a la variabilidad temporal de los SST durante el año hidrológico para optimizar el cálculo de los flujos. Los trabajos anteriormente publicados sobre los flujos sedimentarios en el Orinoco han sido realizados con datos de SST tomados mensual o quincenalmente. Sin embargo, como los SST poseen un régimen bimodal con alta variabilidad en sus concentraciones (Figura 2a), los datos de SST tomados cada diez días proporcionan un estimado mucho más confiable del flujo de sedimentos.

Ya que el régimen de sedimentos del río Orinoco no es sincrónico con su régimen hidrológico, la ausencia de una conexión clara entre los mismos anula la posibilidad de usar la función SST = f(Q) para calcular el flujo de sedimentos (Laraque et al. 2013a). Además, como los regímenes hidrológicos son relativamente uniformes y carecen de eventos de tipo crecida repentina, los valores diarios de concentración de SST entre los intervalos de diez días de muestreo fueron estimados usando el software Hydraccess versión 4.6 (www.ore-hybam.org), basado en una interpolación lineal entre dos muestreos. Esto se realizó multiplicando los valores de concentración por el caudal diario, proveyendo un estimado diario del flujo de material en suspensión. La concentración media mensual y anual de SST fue calculada dividiendo la carga correspondiente de SST entre el caudal mensual y anual, respectivamente (Laraque et al. 2009).

Elementos mayoritarios y trazas

Para determinar la variación temporal de elementos mayoritarios (Na, K, Ca, Mg y Si) y traza (Al, Fe, Mn, Zn, Cu y Cr) en el bajo Orinoco, se recolectó mensualmente una muestra de agua superficial a la altura de Puente Orinokia en Ciudad Guayana (Figura 1) entre enero 2003 y agosto 2008 para los elementos mayoritarios y entre junio 2007 y agosto 2008 para los elementos traza. Durante la colecta de muestras se determinó el pH y el oxígeno disuelto del agua a través de electrodos precalibrados.

Las muestras de agua para la determinación de los elementos mayores fueron filtradas a través de membranas de acetato de celulosa de 0,45 µm de diámetro de poro, mientras que las muestras para determinar los elementos traza fueron filtradas empleando membranas de 0,22 µm de diámetro de poro. Todas estas muestras fueron preservadas con ácido nítrico y almacenadas a 4 °C. Se determinaron los elementos Na, K, Ca, Mg y Si por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con un espectrofotómetro GBC Avanta, mientras que los elementos Al, Fe, Mn, Zn, Cu y Cr fueron determinados por EAA mediante atomización electrotérmica con horno de grafito (GF 3000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Granulometría y transporte de sedimentos

El lecho del bajo Orinoco está compuesto principalmente por arenas. La Figura 4 presenta la distribución de los tamaños de sedimentos para dos muestras tomadas del material en suspensión y del material del lecho, en noviembre del 2014, en el sector Aramaya, a unos 20 km aguas abajo de Ciudad Guayana. La muestra del lecho indicó un diámetro D₅₀ de 0,35 mm (sugiere que el 50 % en peso del sedimento es menor a ese tamaño), en el intervalo de arenas finas con un cierto contenido de grava (20%) y ausencia de material fino (limos y arcillas). El material suspendido presentó mayoritariamente limos y arcillas con un bajo contenido de arenas (12%), siendo el D_{50} igual a 0,02 mm. La Figura 5 muestra la variación espacial, a lo largo del cauce del medio y bajo Orinoco, del diámetro D_{50} de los sedimentos del lecho, relativos a muestras tomadas entre Puerto Ayacucho (km 1.180) y la boca del Orinoco (km 0, correspondiente al vértice o ápice del delta) en diferentes campañas de mediciones (Millán et al. 2001).

A diferencia de lo que sucede en los ríos aluviales, no se observó una reducción del tamaño medio de los sedimentos del lecho con la distancia aguas abajo en el curso del cauce principal del río en el tramo considerado. El valor del D₅₀ estuvo entre 0,20 y 0,60 mm para la mayor parte del tramo analizado, excepto entre las progresivas 0 y 100 km, donde el diámetro D₅₀ se redujo significativamente. El efecto de remanso que el Orinoco ejerce sobre los principales tributarios que provienen de los Llanos, impide que estos suministren los mayores tamaños de su carga sólida al Orinoco, siendo esto una de las causas de la ausencia de gravas en cantidades significativas en el cauce del Orinoco.

De acuerdo al mecanismo de transporte, los sedimentos pueden viajar como carga de fondo (partículas que están siempre en contacto con el lecho) o en suspensión (partículas sostenidas por la turbulencia). Las partículas más finas viajan siempre suspendidas por el flujo, lo que se conoce como carga lavada. Al transporte de las partículas del lecho, que pueden viajar como carga de fondo o carga suspendida, se le llama carga del material de fondo. En el río Orinoco, la carga lavada está compuesta fundamentalmente por los limos y arcillas, y la carga del material de fondo es compuesta principalmente por arenas. Estudios de Millán y López (2004) indican que la carga de fondo es muy variable con el caudal líquido y representa entre 1 y 8% de la carga total de sedimentos. Para el



Figura 4. Curvas granulométricas de sedimentos suspendidos y del fondo del Orinoco en el sector Aramaya, tomada en noviembre 2014.



Figura 5. Variación longitudinal del diámetro medio de los sedimentos del lecho a lo largo del cauce del río entre Puerto Ayacucho y la boca del Orinoco.

caudal medio del Orinoco en San Félix (37.600 m³/s), el porcentaje de partículas que viaja como carga de fondo es de 3,5% de la carga total, mientras que el 96,5% restante viaja en suspensión. Por otro lado, de acuerdo al origen del sedimento, la carga de material de fondo está en el orden de un 30% y la carga lavada en un 70%. Los mayores aportadores de sedimentos al río Orinoco son los tributarios que confluyen por su margen izquierda y que drenan el flanco este de Los Andes y los Llanos occidentales. La Tabla 1 presenta los caudales medios y acarreos anuales sedimentarios de los principales tributarios del Orinoco. Aunque las aguas del Orinoco provienen aproximadamente por partes iguales de los Andes y del Escudo de Guayana, la mayor parte del sedimento proviene de los Andes, en particular de los ríos Guaviare, Meta y Apure, que aportan el 85 o 90% del total (Meade et al. 1990).

Las planicies inundables

La mayor parte de la planicie inundable del bajo Orinoco se extiende por su margen izquierda, observándose innumerables lagunas rebalseras, algunas tan grandes como la laguna de Mamo (Colonnello 1990), con un área superficial de 18 km2, que interactúa con el flujo del Orinoco recibiendo sus cargas de agua y sedimentos en el período de ascenso del hidrograma, a través de caños que están secos en aguas bajas y se llenan en aguas altas, y que posteriormente invierten el sentido de la corriente para regresar sus cargas hidrosedimentarias al Orinoco en el período de recesión del hidrograma. Las planicies sirven como amortiguadoras de las crecientes del río y al mismo tiempo como almacenadoras de una parte de la carga de sedimentos (material fino) que se desborda sobre las márgenes y es transportado por los múltiples y pequeños caños difluentes. No existen estudios detallados que determinen los volúmenes de sedimentos que el río Orinoco transfiere a las planicies fluviales, pero es indudable que es un factor importante que debe ser tomado en cuenta para estimar el transporte anual y los balances de masa en el sistema fluvial.

Las configuraciones del fondo

En el período de aguas bajas son más visibles las grandes configuraciones que adopta el lecho del bajo Orinoco, constituidas, además de las islas, por dunas y barras o bancos de arena. Las dunas tienen usualmente alturas entre 2 y 3 m y longitudes cercanas a los 100 m. El material sedimentario está compuesto por arenas con diámetros entre 0,1 mm y 0,6 mm. Las dunas se superponen a grandes barras de arena, las cuales son configuraciones de mayor tamaño y pueden extenderse transversal y longitudinalmente por largas distancias, alcanzando más de 1 km a lo ancho del cauce y hasta varios kilómetros a lo largo del mismo. Las barras centrales se generan usualmente en zonas de expansión del flujo, donde este pierde su capacidad de transporte debido a la reducción de la velocidad, induciendo a la sedimentación del material arrastrado. Estas barras pueden convertirse en islas con el transcurrir del tiempo, mientras que las barras de punta se forman en las convexidades de las curvas. El origen de las barras de punta se asocia con la presencia de la corriente secundaria en los tramos curvos del río, donde el flujo erosiona la margen externa o cóncava y sedimenta la margen interna o convexa.

Las configuraciones del fondo son dinámicas y en continua evolución. Durante las crecientes, el arrastre del material de fondo hace que las dunas migren sobre la superficie de las barras hacia aguas abajo, hasta depositar su carga de sedimentos en el extremo de estas. La velocidad de propagación de las dunas ha sido estimada en aproximadamente 10 m/día, mientras que la de las barras laterales o centrales, en algunos sectores, ha sido estimada en el orden de entre 0,5 y 1 m/día (Marcucci 1989). Mayor estabilidad se observa en las barras puntuales. El viento parece ser también un factor importante en erosionar las barras

Tabla 1. Caudales medios y acarreos anuales de los principales tributarios del río Orinoco (Meade et al. 1990).

Río	Caudal medio (m ³ /s)	Transporte anual de sedimentos (10 ⁶ ton/año)
Ventuari	2.000	1
Guaviare	8.000	25-30
Meta	4.500	80
Apure	2.300	20-25
Caura	4.000	2
Caroní	5.000	2

y las dunas cuando están expuestas en aguas bajas (Nordin y Pérez-Hernández 1989), invirtiendo la dirección de migración hacia aguas arriba.

Zonas de expansión y contracción de flujo

Debido en parte a la presencia de los controles que ejercen las estribaciones del Escudo de Guayana, el tramo inferior del río Orinoco presenta una configuración geométrica caracterizada por la alternancia de zonas de expansión con zonas de contracción de flujo. Tramos estrechos entre 1,2 y 1,5 km de ancho se alternan con tramos muy anchos de hasta 7 u 8 km, donde el río se bifurca en múltiples brazos, presentando las características típicas de un río trenzado. En estos tramos el flujo se divide entre barras e islas con vegetación muy densa, algunas de las cuales son cubiertas parcialmente por los flujos en el período de aguas altas, y otras que desaparecen totalmente durante las crecientes cuando el río alcanza su máximo caudal.

La Figura 6a ilustra el proceso de degradación (erosión) y agradación (sedimentación) del lecho en diferentes momentos, en secciones obtenidas de los aforos realizados por el INC-MARN. Entre abril y agosto de 1994, el nivel del agua subió unos 8 m y el lecho descendió entre 1 m en el centro del cauce hasta unos 10 m hacia la margen derecha. En términos generales, en aguas bajas (abril) el lecho del río está a una cota más alta y en aguas altas (agosto-septiembre) el lecho está a una cota más baja. Durante la creciente, el lecho del río comienza a descender debido a un incremento en la velocidad del flujo y en su capacidad de transporte, lo cual inicia el proceso de erosión o degradación del sedimento de fondo. Con la recesión del hidrograma, que culmina en el período de aguas bajas, se produce el fenómeno contrario (sedimentación). El comportamiento de las secciones anchas del bajo Orinoco, donde el flujo se expande alrededor de islas y bancos de arena se ilustra con las imágenes de las Figuras 6b y 6c.

En el sector de la Isla Bernabela, a unos 30 km aguas arriba de Ciudad Bolívar, el cauce se divide en dos brazos, el brazo norte de aproximadamente 2 km de ancho y el brazo sur de 1 km de ancho, siendo el ancho total, incluyendo la isla, de unos 5 km. Las Figuras 6b y 6c presentan las variaciones del lecho durante el ciclo hidrológico. Se aprecia tanto en el brazo norte como en el brazo sur, que el lecho del río se incrementa en noviembre (aguas altas) y disminuye en abril (aguas bajas). Es decir, que al incrementarse los niveles del agua con la creciente, los lechos de ambos brazos del Orinoco sedimentan material, al contrario de lo que sucede en Punta Cuchillo (sección estrecha) donde el lecho se erosiona.

La mayor variación se observa en el brazo norte, donde el lecho desciende hasta 5 m durante la recesión de la creciente anual. Una explicación a este fenómeno es que durante las crecientes ocurre la degradación del lecho en las secciones estrechas y el material erosionado va a ser depositado en la próxima sección más ancha que se encuentre aguas abajo. Esta deposición en las secciones anchas durante el período de aguas altas, ocurre debido a la división del caudal en los diferentes brazos, por lo que se produce una reducción en su capacidad de transporte, induciendo a la sedimentación del material arrastrado. Por el contrario, en aguas bajas, la mayor parte del caudal en las zonas de expansión se concentra en una sección más pequeña del flujo, pudiendo este incrementar su velocidad y su capacidad de transporte para provocar el movimiento del sedimento del lecho.

Evolución y migración de márgenes

La rapidez en la erosión de las márgenes fluviales depende de muchas variables, destacando el tipo de material que las conforma (cohesivo o no-cohesivo), la vegetación y la velocidad del flujo. En el caso del bajo Orinoco, con desniveles de 12 a 16 m entre aguas altas y bajas, el colapso de los taludes se produce usualmente en el borde de recesión de la creciente debido a las subpresiones generadas cuando las aguas infiltradas en las márgenes retornan al cauce principal. Fotografías aéreas e imágenes satelitales muestran evidencias del desplazamiento de las márgenes del Orinoco, en especial la margen izquierda encallada en los depósitos sedimentarios de origen andino. La margen derecha presenta una mayor estabilidad al estar encallada en un control geológico bien definido donde afloran las estribaciones del Escudo de Guayana. Un caso notable de desplazamiento de márgenes del río Orinoco se evidencia en la zona de expansión ubicada en el sector Isla El Troncón en Caicara del Orinoco. La torre cuatro del tendido eléctrico de 230 KV entre Puerto Ayacucho y Valle de la Pascua, construida en 1989 sobre la margen izquierda del Orinoco, se encuentra ahora en el medio del cauce del río, a unos 300 m de la margen, expuesta a los flujos directos de la corriente fluvial. Las cartas de navegación del Instituto Nacional de Canalizaciones (INC 1990, 2011) muestran que la torre fue construida sobre tierra firme en un sitio localizado a 100 m de distancia de dicha margen, por lo que la migración de la margen hacia el sur puede estimarse en unos 400 m para un período de 22 años, lo cual indica una tasa de desplazamiento cercana a los 20 m/año. Igualmente, las curvas del Orinoco migran longitudinalmente según un proceso de erosión de la margen cóncava o exterior, y otro proceso de sedimentación sobre la



Figura 6. Variaciones en el tiempo de la sección transversal del río Orinoco en Punta Cuchillo (a) y en el brazo norte (b) y sur (c) de la Isla Bernabela (la línea horizontal a trazos indica la superficie del agua).

margen convexa o interna. Marcucci (1989) ha estimado que las tasas de erosión en las partes cóncavas de algunas curvas del río Orinoco -entre Caicara y Ciudad Guayana- es de 30 a 40 m/año.

Dinámica del material suspendido y disuelto en el Orinoco

Caudales del Orinoco: El río Caroní posee un caudal promedio interanual de 4.800 m3/s (Córdova 1999) y desemboca hacia la margen derecha del Orinoco a unos 100 km aguas abajo de Ciudad Bolívar. Sumando la superficie de la cuenca del Caroní y los aportes de este río al Orinoco, el caudal medio anual del Orinoco en Barrancas (justo antes del Delta del Orinoco) alcanza los 37.600 m3/s, lo que corresponde a 37,6 l/(s km²) de caudal específico. Este caudal específico es uno de los más altos a nivel global para cuencas con áreas superiores a los 1x106 km², siendo inclusive superior a los 34,6 l/(s km²) que presenta el río Amazonas (Callède et al. 2010) y tres veces superior a los 11,7 l/(s km²) estimados para el río Congo (Laraque et al. 2001), que es el segundo río con un mayor caudal anual promedio a nivel global (41.000 m^3/s). La comparación entre los caudales anuales y las tendencias interanuales para el Orinoco en Ciudad Bolívar indican que no ha existido una tendencia clara a largo plazo desde 1926 hasta 2010 (Laraque et al. 2013a). Durante el período de estudio (2007-2010), el caudal medio anual del Orinoco en Ciudad Bolívar $(32.000 \text{ m}^3/\text{s})$ fue muy similar al caudal promedio anual determinado a largo plazo (32.700 m3/s). Sin embargo, los caudales de estiaje fueron más altos después de 1980 (Figura 3). Como el caudal medio anual para los períodos estudiados fue similar al presentado por el Orinoco en su serie hidrológica completa, los flujos de SST calculados para el período de estudio (2007-2010) podrían ser representativos de su serie completa, asumiendo que las condiciones de la cuenca no han cambiado significativamente.

Concentraciones y flujos de SST en el Orinoco entre 2007 y 2010: En una serie de diez aforos sólidos realizados durante el ciclo hidrológico por cuatro años se demostró que una muestra de agua superficial es representativa del promedio de concentraciones de SST de las muestras tomadas en varios sitios de la sección transversal del río en Ciudad Bolívar (Laraque et al. 2013a). Esta homogeneidad espacial es inusual (por la heterogeneidad en las concentraciones de SST presentadas por el Orinoco) y persiste por kilómetros aguas abajo hasta la confluencia con el río Caroní. Igualmente, no se identificaron diferencias significativas en las concentraciones del material suspendido y disuelto en muestras recolectadas verticalmente.

El río Orinoco es conocido por la asimetría lateral existente entre una orilla y la otra, la cual se extiende desde su fuente hasta su desembocadura y se mantiene por el continuo aporte de SST de los tributarios de la margen izquierda, provenientes de los Andes, mientras los tributarios de la margen derecha, que vienen del Escudo de Guayana, se caracterizan por poseer aguas negras con muy poco sedimento suspendido (Lewis y Saunders 1989, Nordin y Meade 1985, Stallard 1987). Sin embargo, esta heterogeneidad lateral se interrumpe localmente al nivel de Ciudad Bolívar, debido al efecto de los afloramientos rocosos ubicados entre la confluencia del río Meta y la desembocadura del Orinoco (Warne et al. 2002). Uno de estos afloramientos rocosos produce los rápidos llamados "El Paso del Infierno", los cuales han sido descritos por Stallard (1987) y se ubican aguas abajo de Muscinacio, lugar en donde empieza la homogenización completa de los sedimentos en suspensión en la sección transversal del río.

En general, existen diversos controles que producen una homogenización del material suspendido aguas abajo de Muscinacio. Entre ellos están: (i) los rápidos del "Paso del Infierno", (ii) una sucesión de meandros caracterizados por curvas cerradas que promueven el transporte del agua de una orilla a la otra, (iii) la existencia de varios cruces de líneas de corrientes, aguas abajo de las islas fluviales, (iv) la alternancia de contracción y expansión en la sección transversal del río, (v) el relieve variable del fondo del cauce que también acentúa la mezcla total de SST y (vi) la presencia de una forma de tipo embudo en puente Angostura, en donde el ancho del Orinoco se reduce desde 5-8 km a 1 km. Además, en la sección de Ciudad Bolívar existen afloramientos del Escudo de Guayana que provocan vórtices y turbulencia en el flujo, promoviendo aún más la homogenización.

Variaciones temporales de las concentraciones de SST: Durante un año las concentraciones de SST muestreadas in situ con una frecuencia de cada diez días tuvieron una relación de 70 entre los valores extremos (mínimo de 3 mg/l y máximo de 206 mg/l, con un promedio de 74,24 mg/l) (Tabla 2). Sin embargo, al ponderar estas concentraciones con los caudales y al promediar los cuatro años hidrológicos estudiados, el cociente entre valores extremos disminuyó a 3,1, con valores medios mensuales entre 38 y 117 mg/l y un promedio de 74 mg/l (Tabla 3). Este valor promedio de 74 mg/l en la concentración de SST fue un poco menor al reportado por Lewis y Saunders (1989) y por Meade et al. (1990) (80 y 93 mg/l, respectivamente). Aunque el Orinoco presenta un régimen hidrológico unimodal en Ciudad Bolívar, el régimen

MORA, LARAQUE Y LÓPEZ

Parámetro	Media	Mínimo	Máximo	Máx/Mín
Q diario (m ³ /s)	31.416	3.324	76.290	23,0
STD (mg/l)	30,1	11,3	48,7	4,3
COD (mg/l)	4,2	1,7	9,3	5,5
SST (mg/l)	73,9	3,0	206,0	68,7

Tabla 2. Valores promedios diarios y rangos de Q, STD, COD y SST determinados en el Orinoco en Ciudad Bolívar durante el periodo de estudio (Laraque et al. 2013a).

Tabla 3. Promedios mensuales de las concentraciones y flujos de Q, SST, SDT y COD determinados en el Orinoco en Ciudad Bolívar durante el periodo de estudio (Laraque et al. 2013a).

Meses	Q (m ³ /s)	SST (mg/l)	STD (mg/l)	COD (mg/l)	Total (mg/l)	SST (kg/s)	STD (kg/s)	COD (kg/s)	Total (kg/s)
Enero	12.583	40,0	35,1	3,7	79	503	442	46	992
Febrero	8.483	39,3	39,6	4,0	83	333	336	34	703
Marzo	6.218	37,9	39,9	3,0	81	235	248	19	502
Abril	9.546	58,9	35,8	3,4	98	563	341	33	937
Mayo	21.478	116,9	32,6	3,8	153	2.510	701	82	3.294
Junio	36.058	110,7	29,7	4,2	145	3.993	1.069	151	5.213
Julio	54.872	85,6	26,9	5,0	117	4.697	1.476	273	6.446
Agosto	66.762	59,6	28,5	4,9	93	3.978	1.902	325	6.206
Septiembre	62.012	66,5	28,3	3,8	99	4.124	1.756	237	6.117
Octubre	45.306	73,3	29,1	3,7	106	3.322	1.320	167	4.809
Noviembre	33.470	78,4	30,1	3,6	112	2.624	1.008	121	3.753
Diciembre	24.136	52,9	35,6	5,1	94	1.277	860	122	2.259
Promedio	31.744	73,9	30,1	4,2	108	2.347	955	134	3.436
Mínimo	6.218	37,9	26,9	3,0	79	235	248	19	502
Máximo	66.762	116,9	39,9	5,1	153	4.697	1.902	325	6.446
Máx/Mín	10,74	3,1	1,5	1,7	1,94	20	8	17	13

sedimentario es bimodal, con un primer pico durante la crecida de aguas y un segundo pico durante el período de recesión de las aguas. Como lo han señalado Meade et al. (1983) y Weibezahn (1990), el primer pico durante la crecida se explica por la remobilización del sedimento en el cauce del río y por el aporte del material lavado a través de surcos y erosión en vertientes y laderas de los cerros adyacentes.

Durante el período de mayor caudal, se observaron bajas concentraciones de SST debido a una disminución en su disponibilidad y por el efecto de dilución. El segundo pico de SST durante la fase de recesión se debe al efecto de remanso que ejerce el Orinoco en las zonas de confluencia con los tributarios andinos de la margen izquierda, causando una deposición de la carga de sedimentos de los tributarios en varias unidades geomorfológicas de las zonas de confluencia (Pérez-Hernández y López 1998). Durante el período de rápida recesión (disminución de más de 16 metros en pocas semanas), la energía de la pendiente y la velocidad del flujo en los tributarios se incrementa, y los sedimentos previamente depositados son remobilizados y transportados aguas abajo hacia el curso principal del Orinoco, produciendo entonces un segundo pico sedimentario; sin embargo, este pico también puede ser producido por un incremento en el aporte del sedimento fino proveniente del colapso de bancos compuestos de limos y arenas, promovido por la desaturación de las orillas arenosas durante la recesión del hidrograma, lo cual se produce a lo largo del cauce de 2.000 km de longitud del río Orinoco.

Flujo anual de SST: El régimen del flujo de los SST en el bajo Orinoco es ligeramente asincrónico con el régimen de flujo líquido (Figura 2b), debido a que el flujo sedimentario se encuentra afectado por el alto contenido de SST, que presenta una fuerte variación estacional (Figura 2a). El flujo medio anual calculado de material sólido en el Orinoco durante el período de estudio fue de 74×10^6 t/año. Este valor fue alrededor de un 20% más bajo que los valores de 90x106 t/año y 93,2x106 t/año reportados respectivamente por Lewis y Saunders (1989) y por Paolini et al. (1987), y fue sólo la mitad del valor de 150×10^6 t/año (± 50×10^6 t/año) reportado por Meade et al. (1990). Estos tres valores fueron determinados en diferentes estudios desarrollados entre 1982 y 1985. Meade et al. (1990) sugieren que la razón para este amplio intervalo de variación es la escasez de datos disponibles de caudales y de sedimentos suspendidos. Los diferentes procedimientos para calcular el flujo de SST también contribuyen a las diferencias entre los flujos estimados. Sin embargo, este estudio aporta un conjunto mayor de datos para cálculos de flujo de SST, debido a la alta frecuencia de muestreo durante cuatro años.

Como el régimen sedimentario no está sincronizado con el régimen hidrológico (Figura 2a), las concentraciones de SST y los valores de caudales evidencian una histéresis similar a la reportada por Meade et al. (1990). Por lo tanto, la función SST = f (Q) para calcular el flujo de sedimentos, no es aplicable al caso del Orinoco. Por esta razón, en el presente estudio se ha usado la interpolación entre las concentraciones de SST en vez de usar las curvas de gasto sedimentario, las cuales fueron utilizadas para obtener los primeros flujos estimados de SST en el Orinoco (Meade et al. 1983, 1990, Nordin y Meade 1985).

Repartición de las concentraciones y flujos de SST, SDT y COD: En el Orinoco (Tabla 4), las concentraciones de material suspendido (68,5%) predominan sobre las concentraciones de material disuelto (31,5%). Los SST reflejan la degradación mecá-

nica de los suelos y son aportados por la rápida erosión de la Cordillera de los Andes. Esta alta, joven y activa cadena montañosa y la Cordillera de la Costa, cubren conjuntamente el 35% de la cuenca y ofrecen un variado relieve frecuentemente objeto de deslaves, lo que da origen a la principal fuente de sedimentos. Adicionalmente, la agricultura intensiva prevalece en las montañas de los Andes, así como en el piedemonte (Lasso et al. 2010).

El COD representa sólo el 4% de la concentración total de carga transportada y es esencialmente aportado por los tributarios de aguas negras que drenan el Escudo de Guayana. Esta área de drenaje está cubierta principalmente por selva, matorrales y humedales y su área total, de aproximadamente 300.000 km², representa alrededor del 30% del total de la cuenca del río Orinoco (Lasso et al. 2010). La Tabla 4 muestra los valores de los flujos medios anuales de SST, SDT y COD para el Orinoco en Ciudad Bolívar entre los años 2007 y 2010. El caudal medio anual fue de 32.700 m³/s, mientras que los flujos de SST, SDT y COD fueron de 74x106 t/año, 30x106 t/año y 4x106 t/año, respectivamente. En general, se podría concluir que en la cuenca del Orinoco, la meteorización física predomina sobre la meteorización química (88,5 t/km² año para los SST vs 36 t/km² año para los SDT) y sobre la producción biológica (5,1 t/km² año para el COD).

Origen y comportamiento de elementos mayoritarios en el bajo río Orinoco

En el bajo Orinoco, la abundancia de elementos mayoritarios viene dada principalmente por la meteorización de rocas (aporte geogénico). La zona andina comprende una diversa mezcla de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, constituidas por carbonatos, silicatos y evaporitas o rocas salinas (Edmond et al. 1996), las cuales se meteorizan y dan origen a los elementos mayoritarios disueltos en el Orinoco. El Na en las aguas del Orinoco se deriva de la meteorización de rocas salinas (NaCl o halita) y plagioclasas (albitaoligoclasa), mientras que el contenido de Ca y Mg se

Tabla 4. Carga media anual y flujos específicos de Q, SST, STD, COD y carga total determinados en el Orinoco en Ciudad Bolívar durante el periodo de estudio (Laraque et al. 2013a).

	Q	SST	STD	COD	Carga Total
Unidades	10º m³/año	106 t/año	106 t/año	106 t/año	10º t/año
Carga Media Interanual	1000	74	30	4	108
Unidades Flujos Específicos	l/s km² 37,9	t/km² año 88,5	t/km² año 36,0	t/km² año 5,1	t/km² año 130

debe a la meteorización de silicatos (plagioclasas) y carbonatos (calcita y dolomita), aunque cierta proporción de Ca también deriva de la meteorización de evaporitas, como en el caso de la anhidrita (CaSO₄) y el yeso (CaSO₄.2H₂O). El mayor contenido del K disuelto en el Orinoco proviene de los silicatos y feldespatos potásicos, los cuales son abundantes en el Escudo de Guayana. Aunque estos elementos son aportados también por fuentes atmosféricas, tales como los aerosoles marinos, el aporte geogénico es tan elevado que las contribuciones marinas son consideradas como irrelevantes (Edmond et al. 1996).

Debido a que el contenido de elementos mayoritarios en las aguas del Orinoco deriva principalmente de la meteorización química de rocas, el comportamiento temporal de sus concentraciones se encuentra controlado por un proceso de dilución. Las Figuras 7a, 7b y 7c muestran que existe una disminución de las concentraciones de Na, Ca y Mg en las aguas del Orinoco a medida que se incrementa el caudal. Este comportamiento es producto de la dilución producida por la mezcla de aguas subterráneas, muy mineralizadas, con las aguas superficiales, poco mineralizadas, durante los períodos de precipitación. Sin embargo, cabe destacar que la variación temporal de la concentración de macroelementos en las aguas del Orinoco no solo es afectada por la dilución, ya que los valores de caudal se incrementan en un factor de 20, mientras que las concentraciones de Na, Ca y Mg solo decrecen

en un factor que varía entre tres y cuatro entre los períodos de bajo y alto caudal. Esto se debe a un aumento en la meteorización química a medida que se incrementan los valores de escorrentía en la cuenca, fenómeno que ha sido reportado a escala global (Gaillardet et al. 1999).

Otros elementos como el K y el Si son también aportados por la meteorización y pueden ser influenciados por la actividad biológica. A diferencia de las concentraciones de Na, Ca y Mg, las concentraciones de K no muestran una clara relación con el caudal; es decir, los valores de K son casi constantes o presentan pequeñas variaciones a lo largo del ciclo hidrológico según los registros. Estudios realizados en el río Apure por Mora et al. (2010) indican que este tributario aporta al Orinoco grandes cantidades de K, el cual es producido por la descomposición del material vegetal que se encuentra en las planicies inundables durante los períodos de alto caudal. A diferencia de la planicie de inundación del río Orinoco, que se encuentra constituida por diversas lagunas que bordean el cauce principal, la planicie de inundación del Apure es tipo delta interno y cubre amplias extensiones de áreas inundables que presentan una densa vegetación.

Durante los períodos de inundación, el río Apure se desborda e inunda estas amplias extensiones de las planicies inundables asociadas, promoviendo la descomposición de la vegetación sumergida y la lixiviación de altas cantidades de K almacenado por las plan-



Figura 7. Variación de la concentración de Na (a), Ca (b), Mg (c) y K (d) disuelto en función del caudal en el bajo río Orinoco (muestras mensuales tomadas durante el período 2003-2008 en Puente Orinokia).



Figura 8. Variación temporal de la concentración de K (a) y Si (b) disuelto a lo largo del bajo Orinoco (sector 1 antes de la confluencia con el río Apure, sector 2 después de la confluencia con el Apure y sector 3 a la altura de Puente Orinokia) (Mora 2011).

tas hacia el cauce principal, generándose un importante aporte de K biogénico desde el Apure al Orinoco durante esta época del año (Mora et al. 2010). La Figura 8 muestra las variaciones temporales de la concentración de K y Si disuelto en el río Orinoco determinadas por Mora (2011) en tres sectores: 1) antes de la confluencia Apure-Orinoco, 2) después de la confluencia Apure-Orinoco a la altura de Las Majadas y 3) en el bajo río Orinoco a la altura de puente Orinokia (Puerto Ordaz).

La Figura 8a muestra que antes de la confluencia con el río Apure, las concentraciones de K presentan un comportamiento unimodal en el Orinoco, con máximos valores de concentración durante los meses de menor caudal (febrero, marzo y abril) y mínimos valores durante los meses de alto caudal. Esto indica que antes de la confluencia Apure-Orinoco, la mayor parte del K contenido en las aguas del Orinoco es derivado de la meteorización de silicatos y feldespatos potásicos, y la variación temporal de este elemento es controlada por un proceso diluctivo, al igual que el resto de los elementos mayoritarios. Sin embargo, después de la confluencia Apure-Orinoco (sectores 2 y 3) las concentraciones de K permanecen casi constantes a lo largo del ciclo hidrológico, debido al K biogénico aportado por el río Apure durante los períodos de inundación. Así, durante la época de bajo caudal, la mayor parte del K en el bajo Orinoco es derivado de la meteorización de rocas, mientras que durante la época de alto caudal, el K geogénico disminuye por un proceso de dilución y el K biogénico se incrementa por la descomposición del material vegetal, lo cual deriva en una baja variabilidad de las concentraciones de K en el bajo Orinoco durante el ciclo hidrológico. La sílice tuvo un patrón

temporal parecido al del Na, Ca y Mg, con una tendencia hacia los altos valores de concentración en los períodos de sequía y mínimos valores en el período de mayor caudal del río. Este comportamiento indica que el Si se genera por la meteorización de silicatos y sus variaciones temporales están determinadas por la dilución. Sin embargo, la Figura 8b muestra una clara disminución en las concentraciones de Si en los sectores muestreados durante los meses de febrero y marzo, meses en los cuales las concentraciones de SST en el río Orinoco son mínimas (Laraque et al. 2013b) y la transparencia del agua alcanza valores máximos. La disminución de la concentración de SST en las aguas del Orinoco durante estos meses por efecto de la sedimentación del material suspendido, causa un incremento en el paso de luz a través de la columna de agua y produce un aumento de la biomasa fitoplanctónica, principalmente en los taxa de diatomeas Melosira y Rizhosolenia (Lewis 1988), las cuales tienen la particularidad de tomar el Si disuelto para la formación de su exoesqueleto silícico (Seckbach y Kociolek 2011). Por consiguiente, la disminución en las concentraciones de Si durante el período de aguas bajas en el Orinoco puede ser debido a que este elemento tiende a ser tomado por las comunidades de diatomeas, las cuales se incrementan a medida que aumentan los valores de transparencia (Lewis 1988).

Variación temporal de algunos elementos traza disueltos en el bajo río Orinoco

Los patrones temporales de las concentraciones de elementos traza disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu y Cr) en el bajo Orinoco indican que estos elementos poseen altas concentraciones durante los períodos de alto caudal y mínimas concentraciones durante la época



Figura 9. Variación temporal del pH, oxígeno disuelto y de la concentración de algunos elementos traza disueltos en un sector del bajo Orinoco a la altura de puente Orinokia.

seca (Figura 9). Esta tendencia es inversa a la encontrada por Márquez (2011) en el Orinoco medio, principalmente debido a que los elementos aquí estudiados fueron los que se encuentran en la fracción disuelta (< 0,22 μ m), mientras que Márquez (2011) reporta los elementos contenidos en la fracción total, la cual incluye el sedimento suspendido. La Tabla 5 muestra los coeficientes de correlación de Pearson entre cada uno de los parámetros analizados en las aguas del bajo Orinoco entre el 2007 y el 2008. Elementos como el Mn y el Fe, los cuales son sensibles a cambios de las condiciones redox en sistemas acuáticos, presentaron una correlación negativa con el pH y el oxígeno disuelto.

Durante la época de subida de aguas y aguas altas, el pH de las aguas del Orinoco disminuye como consecuencia de la dilución producida por las aguas superficiales poco mineralizadas. Igualmente, durante esta época, el oxígeno disuelto alcanza sus valores mínimos (cerca de 4 mgO₂/l), debido al proceso de descomposición bacteriana de la materia orgánica disuelta (Mora 2011), lo que favorece condiciones más reductoras en el medio. Estas condiciones promueven la reducción de MnO₂ y Fe³⁺ a Mn²⁺ y Fe²⁺ (respectivamente), los cuales son mucho más solubles que sus especies oxidadas (Mora 2011). Por consiguiente, las condiciones reductoras y una disminución en los valores de pH durante los períodos de alto caudal incrementan la solubilidad del Mn y el Fe disuelto en las aguas del Orinoco. Cabe resaltar que durante los períodos de menor caudal, las concentraciones de Fe y Mn fueron menores debido a que el pH y el oxígeno disuelto alcanzan sus máximos valores en las aguas del Orinoco, promoviendo la oxidación y la formación de oxihidróxidos de Fe y Mn, los cuales tienden a ser incorporados en la fracción particulada. Similarmente, la Tabla 5 indica que el Cr presentó una fuerte relación positiva con el Cu, lo cual siguiere que la solubilidad de ambos elementos puede estar controlada por un mismo proceso geoquímico. Algunos estudios indican que los coloides orgánicos de bajo peso molecular poseen una alta capacidad para acomplejar al Cu y al Cr (Benedetti et al. 2003), lo cual podría indicar que ambos elementos se encuentran acomplejados con coloides orgánicos de bajo peso molecular en la fracción < 0,22 µm. Sin embargo, es necesario realizar estudios de ultrafiltración en las aguas del bajo Orinoco para verificar esta hipótesis.

INFLUENCIA ANTRÓPICA Y ESTADO DE LA CONSERVACIÓN

Estado actual del bajo río Orinoco. Debido a la carencia de actividades industriales antes de Puerto Ordaz, el bajo Orinoco podría considerarse como un sistema hídrico poco intervenido. Sin embargo, existen diversos factores y escenarios que han alterado el buen estado de conservación del bajo Orinoco en varios sectores. Antes del Delta del Orinoco, se

encuentra la zona industrial Matanzas, lugar donde se ubican las industrias procesadoras de mineral de Fe y Al en Venezuela, las cuales pueden incorporar cantidades considerables de metales pesados al Orinoco. Recientemente se conoce que no existen cambios considerables de la concentración de metales pesados disueltos en el río aguas abajo de la zona industrial Matanzas (Mora 2011), probablemente debido a la dilución producida por el caudal que posee el Orinoco. Similarmente, aunque estudios llevados a cabo por Mora et al. (2013), indican que existe una abundancia atípica de Fe, Zn, Cr y Pb en los sedimentos de fondo del río Orinoco cerca de la zona industrial, este enriquecimiento es muy bajo, ya sea porque la dilución es muy alta o porque el continuo dragado de sedimentos para el mantenimiento del canal de navegación no permite visualizar la acumulación de metales pesados en el sedimento. Igualmente, la contaminación química existente en ciertos sistemas lagunares tales como la laguna Castillero (Márquez et al. 2008) y otras lagunas de inundación contaminadas con lodo rojo (Mora et al. 2015), también pudieran alterar la composición química de las aguas del río durante el período de descenso del hidrograma, debido a la conectividad existente entre el cauce principal del río y los diversos cuerpos de agua de la planicie inundable.

Por otro lado, diferentes proyectos de ingeniería han afectado el funcionamiento natural del sistema fluvial, con consecuencias negativas para la biota y las poblaciones indígenas que allí residen. Un ejemplo de ello es el cierre del caño Mánamo, en el Delta del Orinoco, el cual produjo una acidificación y salinización de los suelos recuperados con dicho cierre, una expansión progresiva de manglares y la subsecuente migración de indígenas Warao hacia poblados cercanos (Montoya et al. 2011, Monente et al. 2017). Principales amenazas y propuestas para la conservación. Aunque no existen estudios sobre los efectos directos que pudieran ocasionar ciertas prácticas agrícolas sobre el río Orinoco, la intensificación de la quema de las sabanas, el incremento en el uso de agroquímicos y la sustitución de la vegetación autóctona de la región por cultivos tales como el algodón, verduras y frutas en islas y riberas del bajo Orinoco, alteran el ciclo biogeoquímico del carbono y de otros nutrientes. Esto se debe a que el carbono orgánico en el Orinoco se deriva de la descomposición microbiana de la vegetación autóctona asociada a bosques y sabanas que son inundados durante el período de alto caudal (Medina et al. 2005).

La minería aurífera, a pesar de que se desarrolla en zonas del alto Orinoco y alto Caroní (Lasso et al. 2006, Machado-Allison 2017), pudiera también impactar zonas del bajo Orinoco debido a la posible deposición de sedimentos contaminados con mercurio en las planicies de inundación. Igualmente, los vertidos industriales procedentes de la zona industrial Matanzas y las lagunas de sedimentación de lodos rojos localizadas en dicha zona industrial representan un peligro inminente para la biota acuática y para el río en general (Mora et al. 2013, Mora et al. 2015), debido a que la rotura de los diques de contención de estos lagos alcalinos ocasionaría el derrame de millares de toneladas de este peligroso residuo hacia el río, ocasionando una catástrofe ecológica sin precedentes.

Por otro lado, la construcción de diques y represas en las faldas de la cordillera de los Andes y en el Escudo de Guayana pueden producir variaciones en el caudal, interrumpir la conectividad longitudinal y disminuir el flujo sedimentario aguas abajo del Orinoco, alterando el hábitat acuático y afectando la tasa de reproducción de invertebrados y peces (Montoya et al. 2011). Algunos estudios han realizado algunas predic-

Tabla	5.	Coeficientes	de (correlaciones	de	Pearson	para	los	elementos	traza	у	los
paráme	etro	s químicos ev	alua	dos en las agu	as c	iel bajo C)rinoc	ю.				

	Mn	Zn	Al	Fe	Cu	Cr	O ₂	рН
Mn	1							
Zn	0,15	1						
Al	-0,10	0,21	1					
Fe	0,69	0,28	0,13	1				
Cu	0,55	-0,01	-0,30	0,20	1			
Cr	0,70	0,15	-0,34	0,46	0,85	1		
O_2	-0,61	0,02	0,29	-0,64	-0,25	-0,47	1	
pН	-0,85	0,09	0,08	-0,72	-0,19	-0,43	0,61	1

ciones sobre los efectos a futuro del cambio climático sobre el Delta del Orinoco. Por ejemplo, el incremento en el nivel del mar podrían traer como consecuencia una erosión moderada de las áreas costeras del delta, migración de manglares, inundación general y pérdida de humedales, afectando a la biota autóctona de la zona deltaica y produciendo cambios en el ambiente tradicional de los indígenas Warao, los cuales podrían migrar y abandonar sus territorios ancestrales (Vegas-Vilarrúbia et al. 2015).

A pesar que la minería, las industrias, el uso de las tierras para la agricultura y la construcción de centrales hidroeléctricas (Guri, Macagua, Caruachi y Tocoma), entre otras obras ingenieriles, han afectado sectores del bajo Orinoco, los trabajos llevados a cabo en los últimos 30 años y los estudios aquí realizados demuestran el buen estado de conservación del río Orinoco en su sección baja, posiblemente debido al gran caudal del río y a la gran amplitud de su planicie de inundación. Sin embargo, los proyectos de envergadura tales como la construcción de represas hidroeléctricas en los ríos Caura y Cuchivero, el trasvase de agua del río Caura al río Paragua, la continua acumulación de lodos rojos en las advacencias del río, la explotación de la faja petrolífera del Orinoco y el ahora cuestionado arco minero a lo largo de la ribera derecha del río Orinoco pudieran afectar considerablemente las características hidrosedimentarias, geomorfológicas, geoquímicas y biológicas del bajo río Orinoco.

Lo anterior indica la necesaria e imperiosa realización de diversos estudios de orden geoquímico, biológico, ecológico y sociocultural que amplíen el conocimiento sobre el estado actual del bajo Orinoco, su corredor ribereño y su planicie de inundación, de manera de identificar los posibles cambios que se produzcan a futuro como consecuencia de las acciones humanas. Similarmente, dado que en la actualidad no existen alternativas viables que reduzcan las consecuencias de la construcción de grandes represas hidroeléctricas, es importante evitar la realización de este tipo de obras sobre los tributarios andinos y sobre los tributarios provenientes del Escudo de Guayana. Esto debido a que los grandes reservorios disminuyen el flujo sedimentario y causan alteraciones irreversibles en el régimen hidrológico, afectando la calidad del hábitat y la composición y estructura de las comunidades de peces tanto en los reservorios como aguas abajo de los reservorios (Agostinho et al. 2008).

BIBLIOGRAFÍA

Aka, A., Lubes, H., Masson, J., Servat, E., Paturel J. y Kouame B. 1996. Analysis of the temporal variability of runoff in Ivory Coast: statistical approach and phenomena characterization. *Hydrological Sciences Journal*. 30 (6): 959-970. Agostinho, A. A., Pelicice, F. M. y Gomes, L. C. 2008. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Brazilian Journal of Biology*. 68: 1119-1132.

- Benedetti, M. F., Mounier, S., Filizola, N., Benaim, J. y Seyler, P. 2003. Carbon and metal concentrations, size distributions and fluxes in major rivers of the Amazon basin. *Hydrological Processes*. 17: 1363-1377.
- Buishand, T. A. 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology* 58: 11-27.
- Callède, J., Cochonneau, G., Vieira Alves, F., Guyot, J. L., Guimarães, V. S. y De Oliveira, E. 2010. Les apports en eau de l'Amazone à l'Océan Atlantique. *Revue des sciences de l'eau* 23: 247-273.
- Colonnello, G. 1990. Elementos fisiográficos y ecológicos de la cuenca del río Orinoco y sus rebalses. *Interciencia* 15(6): 476-485.
- Córdova, J. R. 1999. Caracterización del funcionamiento hidrológico e hidráulico-fluvial del Delta del Orinoco. PDVSA. Informe de Desarrollo Armónico de Oriente. DAO, FUNINDES, USB.
- Edmond, J. M., Palmer, M. R., Measures, C. I., Brown, E. T. y Huh, Y. 1996. Fluvial geochemistry of the eastern slope of the northeastern Andes and its foredeep in the drainage of the Orinoco in Colombia and Venezuela. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 2949-2976.
- Filizola, N. y Guyot, J. L. 2004. The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon. *Hydrological Sciences Journal* 49: 143-153.
- Gaillardet, J., Dupré, B. y Allègre, C. J. 1999. Global silicate weathering and CO2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology* 159: 3-30.
- Hubert, P., Carbonnel, J. P. y Chaouche, A. 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques – Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*. 110: 349-367.
- Instituto Nacional de Canalizaciones. 1990. Cartas de navegación del río Orinoco, tramo Jobal-Matanzas.
- Instituto Nacional de Canalizaciones. 2011. Cartas de navegación del río Orinoco, tramo Jobal-Matanzas.
- Laraque, A., Mahe, G., Orange, D. y Marieu, B. 2001. Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *Journal of Hydrology* 245: 104-117.
- Laraque, A., Bernal, C., Bourrel, L., Darrozes, J., Christophoul, F., Armijos, E., Fraizy, P., Pombosa, R. y Guyot, J.L. 2009. Sediment budget of the Napo River, Amazon basin, Ecuador and Peru. *Hydrological Processes*. 23: 3509-3524.
- Laraque, A., Castellanos, B., Steiger, J., López, J. L., Pandi, A., Rodríguez, M., Rosales, J., Adèle, G., Pérez, J. y Lagane, C. 2013a. A comparison of the suspended and dissolved matter dynamics of two large intertropical rivers draining into the Atlantic Ocean: the Congo and the Orinoco. *Hydrological Processes*. 27: 2153-2170.
- Laraque, A., Moquet, J. S., Alkattan, R., Steiger, J., Mora, A., Adèle, G., Castellanos, B., Lagane, C., López, J. L., Pérez, J., Rodríguez, M. y Rosales, J. 2013b. Seasonal variability of total dissolved fluxes and origin of major

dissolved elements within a large tropical river: The Orinoco, Venezuela. *Journal of South American Earth Sciences.* 44: 4-17.

- Lasso, C. A., Giraldo, A., Lasso-Alcalá, O. M., León-Mata, O., DoNascimiento, C., Milani, N., Rodríguez-Olarte, D., Señaris, J. C. y Taphorn, D. 2006. Peces de los ecosistemas acuáticos de la confluencia de los ríos Orinoco y Ventuari, Estado Amazonas, Venezuela: resultados del AquaRAP 2003. (pp: 114-122). En: Lasso, C. A., Señaris, J. C., Alonso, L. E., & Flores, A. L. (Eds.). Evaluación Rápida de la Biodiversidad de los Ecosistemas Acuáticos en la Confluencia de los Ríos Orinoco y Ventuari, Estado Amazonas, (Venezuela). Boletín RAP de Evaluación Biológica 30, Conservación Internacional. Washington D.C.: USA.
- Lasso, C. A., Usma, J. S., Trujillo, F. y Rial, A. 2010. Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle de Ciencias Naturales, Instituto de Estudios de la Orinoquia, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Lee, A. F. y Heghinian, S. M. 1977. A shift of the mean level in sequence of independent normal random variables: a Bayesian approach. *Technometrics*. 19(4): 503-506.
- Lewis, W. M. y Saunders, J. F. 1989. Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River. *Biogeochemistry*. 7: 203-240.
- Lewis, W. M. 1988. Primary production in the Orinoco River. *Ecology*. 69(3): 679-692.
- López, J. L. y Pérez-Hernández, D. 1999. Some morphological aspects of the Orinoco River. En: Proceedings of the IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics. Genova, Italia. 6 al 10 de septiembre, 1999.
- Machado-Allison. 2017. La conservación de ambientes acuáticos: petróleo y otras actividades mineras en Venezuela. Capítulo 9. (pp: 189-201). En: Rodríguez-Olarte, D. (Ed.). Ríos en riesgo de Venezuela. Vol. I. Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.
- Marcucci, E. 1989. Evaluación de las zonas que restringen la navegación en el canal El Jobal-Matanzas. Bauxiven, C.A.
- Márquez, A. 2011. Descripción de las características fisicoquímica y concentración de metales pesados en las aguas del Orinoco medio, Estado Bolívar, Venezuela. Trabajo de Ascenso presentado como requisito obligatorio para ratificar la categoría de profesor agregado. Universidad de Oriente. Cumaná, Venezuela.
- Márquez, A., Senior, W., Martínez, G., Castañeda, J. y González, A. 2008. Concentraciones de metales en sedimentos y tejidos musculares de algunos peces de la laguna de Castillero, Venezuela. *Revista Científica FCV-LUZ*. 18(2): 1-13.
- Meade, R. H. 1994. Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. *Quaternary International.* 21: 29-39.
- Meade, R. H., Nordin, C. F., Pérez-Hernández, D., Mejia, A. y Paredes Godoy, J. H. 1983. Sediment and water discharge in Río Orinoco, Venezuela and Colombia. (pp:

1134-1144). En: Proceedings of the Second International Symposium on River Sedimentation. Water Resources and Electric Power Press, Nanjing, China. 11 al 16 de octubre, 1983.

- Meade, R. H., Weibezahn, F. H., Lewis, W. M. y Pérez-Hernández, D. 1990. Suspended-sediment budget for the Orinoco River. (pp: 55-79). En: Weibezahn, F. H., Alvarez, H. y Lewis, W. M (Eds). *El Río Orinoco como Ecosistema*. Impresos Rubel, Caracas, Venezuela.
- Medina, E., Francisco, M., Sternberg, L. y Anderson, W. T. 2005. Isotopic signatures of organic matter in sediments of the continental shelf facing the Orinoco Delta: Possible contribution of organic carbon from savannas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 63: 527-536.
- Millán, S. y López, J. L. 2004. Transporte de sedimentos en el río Orinoco. En: *Libro de resúmenes del XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Sao Pedro, Brasil. 18 al 22 de octubre, 2004.
- Millán, S., López, J. L. y Falcón, M. 2001. Sediment loads delivered to the Orinoco delta. En: *Proceedings of the V Latin American and Caribbean Congress in Fluid Mechanics*. Caracas, Venezuela. 14 al 17 de mayo, 2001.
- Monente, J. Colonnello, G y Herrera, O. 2017. Los ríos del Delta del Orinoco: situación y riesgo. Capítulo 6 (pp: 127-149). En: Rodríguez-Olarte, D. (Ed.). Ríos en riesgo de Venezuela. Vol. I. Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.
- Montoya, J. V., Castillo, M. M. y Sánchez, L. 2011. La importancia de las inundaciones periódicas para el funcionamiento y conservación de los ecosistemas inundables de grandes ríos tropicales: Estudios en la cuenca del Orinoco. *Interciencia*. 36(12): 900-907.
- Mora, A. 2011. Variación temporal y espacial de la concentración de cationes mayoritarios y elementos traza disueltos en el sistema Río Orinoco, Venezuela. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Mora, A., Baquero, J. C., Alfonso, J. A., Pisapia, D. y Balza, L. 2010. The Apure River: geochemistry of major and selected trace elements in an Orinoco River tributary coming from the Andes, Venezuela. *Hydrological Processes*. 24: 3798-3810.
- Mora, A., Alfonso, J. A., Baquero, J. C., Handt, H., Vásquez, Y. 2013. Elementos mayoritarios, minoritarios y traza en muestras de sedimentos del medio y bajo río Orinoco, Venezuela. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 29 (3): 165-178.
- Mora, A., Pisapia, D., González, N., Handt, H., Moreau, C., Vásquez, Y., Márquez, L. y Alfonso, J. A. 2015. Impact of the red mud disposal on several floodplain lagoons of the lower Orinoco River. *Water, Air, and Soil Pollution*. 226: 179.
- Nordin, C. F. y Meade, R. H. 1985. The Amazon and the Orinoco. (pp: 385-390). En: *McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology*. McGraw-Hill Inc., New York. USA.
- Nordin, C. y Pérez-Hernández, D. 1989. Sand waves, bars, and windblows sands of the Río Orinoco, Venezuela and Colombia. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper. 2326-A.
- Nordin, C. F., Mejía, A. y Delgado, C. 1994. Sediment

studies of the Orinoco River, Venezuela. (pp: 243-265). En: Schumm, S. A. y Winkley, B. R. (Eds.). *The variability of large alluvial rivers*. American Society of Civil Engineers, New York, USA.

- Paolini, J., Hevia, R. y Herrera, R. 1987. Transport of carbon and minerals in Orinoco and Caroni rivers during the years 1983–1984. (pp: 325-338). En: Degens, E. T. (Ed). Transport of carbon and minerals in major world rivers, lakes and estuaries. Part 4. SCOPE/UNEP Sonderband 55, Mitt Geol-Paläont Inst Univ Hamburg.
- Pérez-Hernández, D. y López, J. L. 1998. Algunos aspectos relevantes de la hidrología del Río Orinoco. (pp: 138-154). En: López, J. L., Saavedra, I. y Dubois, M. (Eds.). *El Río Orinoco Aprovechamiento Sustentable*. Instituto de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Pettitt, A. 1979. A non-parametric approach to the changepoint problem. *Applied Statistics*, 28 (2): 126-135.
- Seckbach, J. y Kociolek, J. P. 2011. Diatoms: General Introduction. (pp: 11-12). En: Seckbach, J. y Kociolek, J.P. (Eds.). *The Diatom World*. Springer Dordrecht Heidelberg, London New York.
- Silva, G. 2005. La cuenca del río Orinoco: visión hidrográfica y balance hídrico. Revista Geográfica Venezolana. 46: 75-108.
- Stallard, R. 1985. River chemistry, geology, geomorpho-

logy, and soils in the Amazon and Orinoco basins. (pp: 293-316). En: Drever, J. I. (Ed). *The chemistry of weathering*. D. Reidel Publishing Compagny, Dordrecht, Holland.

- Stallard, R. 1987. Cross-channel mixing and its effect on sedimentation in the Orinoco River. *Water Resources Research.* 23: 1977-1986.
- Stallard, R., Koehnken, L. y Johnsson, M. J. 1990. Weathering processes and the composition of inorganic material transported through the Orinoco River system, Venezuela and Colombia. (pp: 81-119). En: Weibezahn, F. H., Álvarez, H. y Lewis, W. M (Eds.). *El Río Orinoco como Ecosistema*. Impresos Rubel, Caracas, Venezuela.
- Vegas-Vilarrúbia, T., Hernández, E., Rull, V. y Rull Vegas, E. 2015. The Orinoco megadelta as a conservation target in the face of the ongoing and future sea level rise. *Science of the Total Environment.* 515-516:129-142
- Warne, A. G., Meade, R. H., White, W. A., Guevara, E. H., Gibeaut, J., Smyth, R. C., Aslan, A. y Tremblay, T. 2002. Regional controls on geomorphology, hydrology, and ecosystem integrity in the Orinoco Delta, Venezuela. *Geomorphology* 44: 273-307.
- Weibezahn, F. H. 1990. Hidroquímica y sólidos suspendidos en el alto y medio Orinoco. (pp: 151-210). En: Weibezahn, F. H., Alvarez, H. y Lewis, W. M (Eds.). *El Río Orinoco como Ecosistema*. Impresos Rubel, Caracas, Venezuela.

Ríosen Riesgo de Venezuela 1

Douglas Rodríguez Olarte Editor

Ríos en Riesgo de Venezuela 1

Edición a cargo de

Douglas Rodríguez Olarte Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado Barquisimeto. Venezuela

Información



Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. UCLA RIF G200000775 / www.ucla.edu.ve

> **Rector** Francesco LEONE

Vicerrectora Académica Nelly VELÁSQUEZ

Vicerrector Administrativo Edgar ALVARADO **Secretario General** Edgar RODRÍGUEZ

Decano de Agronomía Nerio NARANJO

Museo de Ciencias Naturales UCLA Colección Regional de Peces

Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela

Serie

Ríos en Riesgo de Venezuela (Volumen 1)

Editor Douglas RODRÍGUEZ OLARTE

Revisión de textos y estilo Donald C. TAPHORN, Críspulo J. MARRERO

> **Diseño y diagramación** Douglas RODRÍGUEZ OLARTE

Sugerencias de cita. Obra completa: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). 2017. Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 1. Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.

Capítulo: Galán, C. y Herrera, F. 2017. Ríos subterráneos y acuíferos kársticos de Venezuela: Inventario, situación y conservación. Capítulo 7 (pp: 153-171). En: Rodríguez-Olarte, D. (Editor). Ríos en riesgo de Venezuela. Volumen 1. Colección Recursos hidrobiológicos de Venezuela. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Barquisimeto, Lara. Venezuela.

Primera edición digital: 15 febrero 2017 © los autores, 2017

236 p. Incluye bibliografías, figuras y tablas Depósito Legal. Biblioteca Nacional de Venezuela: LA2016000137 ISBN Obra completa: 978-980-12-9274-6 ISBN Volumen 1 digital: 978-980-12-9350-7



1. Ecosistemas fluviales. 2. Geografía y clima. 3. Calidad de aguas. 4. Insectos acuáticos. 5. Ictiofauna. 6. Vegetación. 7. Perturbaciones. 8. Conservación. 9. Venezuela.

Esta publicación y su contenido no representan necesariamente la expresión de opinión o juicio por parte de las instituciones de adscripción de los autores, incluyendo denominaciones, opiniones, inclusión de nombres, registros, datos o información complementaria proporcionada por los autores. Así, todos los aportes y opiniones expresadas son de la entera responsabilidad de los autores correspondientes.