

CARBONO ORGANICO DISUELTO Y PARTICULADO EN GRANDES RIOS DE LA AMERICA DEL SUR

JORGE PAOLINI

En los últimos años se ha hecho hincapié en el papel de los ríos como elementos enlazantes en el ciclo biogeoquímico del carbono a nivel mundial, específicamente se ha destacado su importancia en la transferencia de carbono y nutrientes desde los ecosistemas terrestres hacia los océanos. Se ha estimado que el transporte de carbono para los grandes ríos está entre $0,2$ y $1,0 \times 10^{15}$ gC por año (Kempe, 1979; Meybeck, 1981, 1982, 1988; Richey *et al.*, 1980; Schlesinger y Melack, 1981). Estas cifras están basadas en datos obtenidos en su mayoría de las regiones templadas (Europa y Estados Unidos), tomando en cuenta pocos de los grandes ríos y extrapolaciones de pequeños ríos y quebradas. Los ríos tropicales están poco representados o ausentes en dichas estimaciones.

El proyecto internacional "Transporte de Carbono y Minerales en Grandes Ríos" comenzó en 1980 bajo el patrocinio del Comité Científico sobre Problemas del Ambiente (SCOPE) y el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), coordinado por el Prof. Dr. Egon T. Degens de la Universidad de Hamburgo, RFA. En dicho

proyecto se investigaron los principales ríos del mundo por un período de uno a tres años, con respecto al material transportado en forma disuelta y suspendida. Los resultados han sido publicados en cinco volúmenes (Degens, 1982; Degens *et al.*, 1983, 1985, 1987, 1988), y el resumen final estará próximamente a la disposición (Degens *et al.*, 1990).

Origen del Carbono Orgánico en los Ríos

El carbono orgánico transportado por los ríos generalmente se divide en la fracción disuelta (COD) ($< 0,45 \mu\text{m}$) y particulada (COP) ($> 0,45 \mu\text{m}$) en base a filtración. Esta distinción es puramente operacional ya que entre ambas fracciones existe un continuo intercambio.

El COD está constituido principalmente por sustancias húmicas (60 - 80%) así como por polisacáridos, polipéptidos y algún material coloidal; éstas afectan de muchas maneras las propiedades químicas del agua y son fuentes de alimento para los organismos heterotróficos. El COP está constituido por

microorganismos vivos y muertos, restos vegetales y material de suelos.

Respecto al origen del COD y COP en los ríos se considera que puede ser autóctono (interno) y alóctono (externo). Las principales fuentes autóctonas para ambas fracciones son la fotosíntesis y la degradación del fitoplancton en la columna de agua en los ríos, lagos y reservorios. La disolución del COP puede contribuir al COD y la adsorción del COD sobre las partículas puede contribuir al COP. Las fuentes alóctonas para el COP pueden ser la erosión de los suelos y los detritos de plantas transportados por la lluvia; en el caso del COD puede ser el lavado de la hojarasca localizada sobre los suelos y el percolado a través del mismo; estas sustancias alcanzan el ambiente acuático o través de la escorrentía superficial o por aguas subterráneas.

Para determinar el origen del COD y COP se utilizan diversas técnicas, entre las que podemos nombrar el estudio de la composición isotópica del carbono, determinación de biomarcadores específicos como azúcares, aminoácidos y derivados fenólicos de la lignina así como el estudio espectroscópico de la materia orgánica aislada.

/ PALABRAS CLAVE / Carbono / ríos / hidrología / Suramérica /

Jorge Paolini, se graduó de Químico en la Universidad de los Andes (Mérida, Venezuela) en 1972 y de Doctor en Ciencias del Agro en la Universidad de Göttingen (Rep. Fed. de Alemania) en 1978. Desde 1978 es Investigador Asociado del Centro de Ecología y Ciencias Ambientales del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Su principal interés de investigación es la bioquímica de suelos (sustancias húmicas y actividades enzimáticas) y la caracterización fisicoquímica de los ríos de la cuenca del Orinoco. Ha publicado más de 20 trabajos científicos. Recientemente fue distinguido con la Beca de la Fundación Alexander von Humboldt. Dirección: IVIC, Centro de Ecología y Ciencias Ambientales, Apdo. 21827, Caracas 1020-A, Venezuela.

Hidrología del Continente Suramericano

Aproximadamente el 66% del continente suramericano, con una superficie de $17,9 \times 10^6 \text{ Km}^2$ (12% de la superficie terrestre), es drenado por seis grandes sistemas fluviales, los cuales descargan anualmente al Océano Atlántico alrededor de 8.000 Km^3 de agua dulce. Un hecho significativo es que el 80% de dicha descarga es debida a un solo río, el Amazonas, cuya cuenca dreña el 40% del área continental. Este es el mayor sistema fluvial del mundo y el responsable de que el continente suramericano sea el mayor contribuyente de la escorrentía a nivel mundial (Baumgartner y Reichel, 1975). Por otro lado tenemos que la América del Sur contribuye apenas con el 13% de la cantidad total mundial de sedimentos transportados por los ríos a los océanos (Milliman y Meade, 1983).

En la Fig. 1 se muestra la vasta red de drenaje del continente suramericano; la vertiente Atlántica recibe aproximadamente el 90% de la escorrentía continental; solamente el río Magdalena descarga en la parte norte del continente.

A continuación describiremos brevemente las características más resaltantes de las principales cuencas hidrográficas del continente:

a) Río Amazonas

La cuenca amazónica se caracteriza por su amplia extensión (alrededor de $6,3 \times 10^6 \text{ Km}^2$) cubierta en gran parte por una densa vegetación de bosque húmedo tropical. El promedio de precipitación anual varía entre 2.000 a 2.500 mm. El caudal del Amazonas es de unos $175.000 \text{ m}^3/\text{seg}$, lo cual representa el 15% del volumen mundial de aguas continentales volcadas a los océanos (Baumgartner y Reichel, 1975).

El hidrograma del río Amazonas muestra un solo pico, con el mínimo de caudal al final de octubre o principios de noviembre y el máximo a finales de mayo o principios de junio. En Tefé la diferencia entre la altura de mira en aguas altas y aguas bajas es de 15,2 m y en Obidos es de 7,6 m (Sioli, 1975a, b).

Sioli (1965), basado en las características fisicoquímicas, el color y la transparencia de disco Secchi, distingue tres tipos de ríos en la cuenca amazónica:

i) Ríos de "aguas blancas": son ríos de aguas muy turbias (transparencia de disco Secchi 0,1 a 0,5

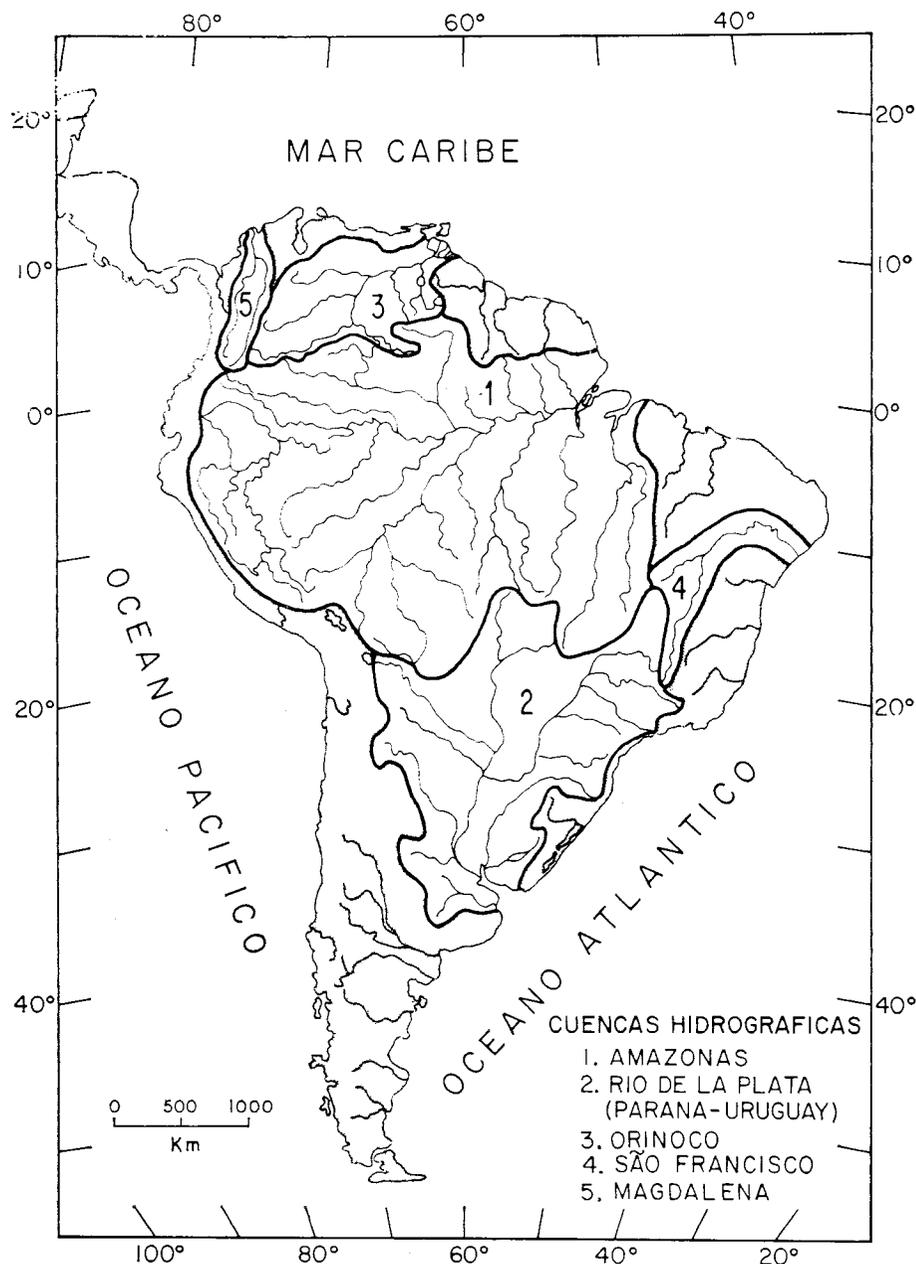


Fig. 1. Mapa del continente suramericano mostrando las principales cuencas hidrográficas.

m), con abundantes sólidos en suspensión, ricos en nutrientes y PH cercano a 7. Típicos ejemplos de estos ríos están representados por el Solimões, el Madeira, el Branco y el Purús.

ii) Ríos de "aguas claras": son ríos de aguas límpidas, de color amarillo verdoso hasta verde oliva, con transparencia de disco Secchi entre 0,8 y 4,3 m, PH cercano a la neutralidad y con un bajo contenido de nutrientes. A este grupo pertenecen los ríos Tapajós, Xingú, Tocantins, Jurueña, São Miguel y Machado.

iii) Ríos de "aguas negras": éstos se caracterizan por un color

marrón similar a una infusión de té, con transparencia de disco Secchi entre 1,3 y 2,3 m, PH ácido inferior a 4 y con bajo contenido de nutrientes y de sólidos suspendidos. Su color oscuro se debe a las elevadas concentraciones de sustancias húmicas (Leenheer, 1980; Paolini, 1978, 1979; Vegas-Vilarrubia *et al.*, 1988a, 1988b) Los ríos representativos de este grupo son el Negro, el Tefe y el Cururú.

b) Río Paraná

Este río, de longitud cercana a los 4.000 Km dreña una cuenca que excede los $2,6 \times 10^6 \text{ Km}^2$ lo cual

lo caracteriza como el segundo sistema fluvial del continente. Su descarga anual se estima en 15.000 m³/seg. Entre sus tributarios podemos citar los ríos Bermejo y Pilcomayo originados en los Andes; el río Paraguay, su principal tributario, originado en las tierras bajas tropicales del Matto Grosso; el Iguazú cuyo origen se ubica en la ladera húmeda de la Serra do Mar y finalmente los ríos Salado y Carcaraña, los cuales drenan las planicies de loess del Chaco-Pampa.

El Paraná Superior, tramo comprendido desde sus cabeceras en la Serra dos Preneos (Brasil) hasta su confluencia con el río Paraguay, está circunscrito a un canal definido y con una planicie de inundación restringida. Posteriormente se transforma en un río de llanura (Paraná Medio e Inferior) con un amplio valle de inundación cuyo ancho varía entre 10 y 40 Km.

El Paraná, antes de unirse con el río Uruguay, para dar origen al Río de la Plata, forma un amplio delta interior de 320 Km de largo y 60 Km de ancho.

Cuando el río está entre su nivel medio y bajo, el canal principal del mismo ocupa aproximadamente el 10% del valle de inundación y los canales secundarios y caños de tamaño variable entre un 2 a un 5% (ambiente de tipo lótico). Gran cantidad de lagunas y áreas cenagosas ocupan entre el 20 y 50% del área del valle, proporción similar a la descrita por Junk (1985) para el río Amazonas.

c) *Río Orinoco*

La cuenca del río Orinoco constituye la tercera en extensión del continente con un área de más de 1 x 10⁶ Km². En términos de descarga (36.000 m³/seg) ocupa el tercer lugar del mundo superado sólo por el Amazonas y el Zaire (Paolini *et al.*, 1987). El hidrograma anual alcanza su máximo a mediados de agosto o a principios de septiembre y el mínimo durante los meses de febrero y marzo. A través del Brazo Casiquiare el Orinoco se comunica con el Amazonas vía el río Negro.

El Orinoco nace en la Sierra de Parima (Venezuela) y a lo largo de su curso de 2.150 Km recibe más de 2.000 tributarios. Estos últimos se dividen en dos grupos:

i) Tributarios de la margen derecha: son ríos de color negro o té, naturaleza ácida y pobres en electrolitos. El COD y la sílice reactiva son los componentes mayoritarios. Las cabeceras de los mismos están localizadas en el Es-

cudo Guayanés. Esta antigua superficie de erosión de edad Precámbrica está cubierta en casi su totalidad por una densa vegetación de bosque húmedo tropical con la excepción de algunas áreas al norte y al sureste, donde predomina la vegetación de tipo sabana. Ejemplos de estos ríos lo constituyen el Atabapo, el Ventuari, el Caura y el Caroní. Este último es el río con mayor potencial hidroeléctrico de la cuenca del Orinoco y en él se encuentra en operación la mayor central hidroeléctrica del mundo, con una capacidad instalada de 10.000 mw.

ii) Tributarios de la margen izquierda: son ríos ricos en electrolitos y sedimentos en suspensión. Las cabeceras de algunos de estos tributarios están localizadas en los Andes sobre areniscas marinas, carbonatos y esquistos provenientes de aguas marinas poco profundas o aguas salobres. Otros tributarios se originan en los Llanos, región de origen cuaternario cubierta por sedimentos fluvio-lacustrinos. La vegetación predominante es del tipo de sabana con bosque de galería a lo largo de las márgenes de los ríos en la región llanera, mientras que en la región andina tenemos vegetación boscosa. Entre los tributarios de mayor importancia tenemos el Guaviare, el Apure y el Meta, los cuales aportan el 90% del material acarreado por el Orinoco (Meade *et al.*, 1983).

d) *Río São Francisco*

El São Francisco es otro de los ríos más largos de la América del Sur, con una longitud de 2.900 Km y posee una cuenca de drenaje de 631.000 Km². Su cabecera está localizada en la Serra do Canastra al suroeste del Estado de Minas Gerais (Brasil).

Su promedio anual de descarga es de 3.800 m³/seg con el máximo de descarga durante el mes de febrero y el mínimo en diciembre. El río constituye una importante vía fluvial hacia el interior brasileño y a lo largo de su curso se han construido tres grandes represas (Tres Marías, Sobradinho y Paulo Alfonso) para la producción de energía eléctrica, suministro de agua a las zonas urbanas e industriales de la región e irrigación de zonas agrícolas.

e) *Río Magdalena*

El río Magdalena drena un área de 257.000 Km², donde está establecida entre el 70 y el 80% de la población colombiana, y tiene una longitud de 1.316 Km. Sus principales tributarios son: el Cauca, el Sogamoso, el César y el San Jorge.

El régimen de descarga es bimodal debido a la distribución de las precipitaciones; los valores más bajos se observan durante los meses de enero y febrero (alrededor de 4.000 m³/seg), y alcanzan su máximo caudal durante los meses de noviembre-diciembre (10.000 m³/seg). El valor medio de descarga al Mar Caribe es de 6.000 m³/seg.

f) *Río Uruguay*

Con una longitud de 1.838 Km se une con el río Paraná para formar el Río de la Plata. Su cuenca de 240.000 Km² ocupa el 6º lugar entre las cuencas suramericanas y su descarga anual se ha estimado en 4.600 m³/seg. Es regulado por el embalse de Salto Grande cuyo volumen de almacenamiento es de 5.000 Hm³.

Por último, la vertiente al Océano Pacífico representa apenas el 5,6% del agua dulce del continente. Debido a la escasez de lluvias en la región comprendida entre el sur del Ecuador y el norte de Chile y a la proximidad de los Andes a la costa del Pacífico, estos ríos son cortos y solamente algunos de ellos transportan agua durante todo el año como el Guayas en Ecuador, el Santa (110 m³/seg) en Perú, el Aconcagua (79 m³/seg), el Mapo (102 m³/s), el Maule (250 m³/seg) y el Bio-Bio (350 m³/seg) en Chile.

Aspectos Bioquímicos de los ríos Suramericanos

Excepto por los trabajos realizados en el río Amazonas por Williams (1968) y del grupo de investigación dirigido por el Prof. Dr. Harald Sioli del Instituto Max Planck de Limnología (MPI) (RFA) (Rai, 1978; Schmidt, 1972), la información referente a los constituyentes orgánicos de los ríos suramericanos es escasa. No es sino a partir de 1980 cuando dichos estudios se intensifican participando tanto organizaciones nacionales como internacionales. Así podemos citar entre otros a Richey y Salati (Universidad de Washington, USA - INPA, Manaus); Furch y Junk (MPI de Limnología, RAF - INPA Manaus) en el Amazonas; Paolini y Herrera (IVIC, Venezuela-Universidad de Hamburgo, RFA); Lewis y Weibezahn (Universidad de Colorado, USA - Universidad Simón Bolívar, Venezuela) en el Orinoco; Paredes (Universidad Federal de Bahía, Brasil), en el São Francisco; Depetris (CONICET, Santa Fe, Argentina - Universidad de Hamburgo, RFA) en el Paraná; Mañosa y Depetris (Embalse Salto Grande, Uruguay - Uni-

versidad de Hamburgo, RFA) en el Uruguay y Salas y Spitzky (Universidad de Hamburgo, RFA) en el Magdalena.

A continuación trataremos de resumir los principales resultados de dichas investigaciones.

Río Amazonas

Richey *et al.* (1980) y Wissmar *et al.* (1981) estudiaron el contenido de COD y COP a lo largo del canal principal del río Amazonas durante la época de creciente (febrero-marzo) y de mayor caudal (mayo-junio) del río. Estos autores encontraron que las concentraciones de COD eran similares para ambos períodos. Así tenemos que durante el período de ascenso del río la concentración promedio fue de 4,2 mg/L y para la época de mayor caudal fue de 6,5 mg/L. Estos valores fueron superiores a los encontrados por Williams (1968) de 2,0-3,5 mg/L para la época de sequía o mínimo de descarga.

Para el COP el comportamiento fue diferente; así, durante la época de ascenso del hidrograma se observaron los mayores valores estando éstos dentro del intervalo de 8 a 20 mg/L. Sin embargo, durante la época de mayor descarga los valores observados fueron menores, entre 1,0 y 3,7 mg/L. Durante ambos períodos el promedio del porcentaje de carbono orgánico en el sedimento fue de 10,4%.

Recientemente Ertel *et al.* (1986) durante una campaña de mediciones realizadas durante los meses de febrero-marzo 1984 (a mitad del limbo ascendente del hidrograma) encontraron que la concentración promedio de cop en el río Solimões era de $3,83 \pm 0,15$ mg/L mientras que en el río Amazonas (después de la confluencia del río Negro) los valores eran de $4,82 \pm 0,33$ mg/L; el incremento observado se debía a la contribución del río Negro (COD 10,8 mg/L) el cual suministra el 22% del agua y el 43% del COD del río Amazonas en Manaus para dicho período. Otros tributarios del Amazonas medidos durante dicha campaña arrojaron los siguientes valores: río Jutai (7,37 mg/L); río Purús (5,87 mg/L); río Jurúa (6,36 mg/L); río Icó (3,58 mg/L); río Japurá (3,78 mg/L) y río Madeira (3,83 mg/L); de todos ellos los cinco últimos pertenecen a los ríos de "aguas blancas" o turbias. Estos autores además encontraron que las sustancias húmicas representan el 60% del COD, siendo la relación ácido fúlvico a ácido húmico (AF:AH) en el canal principal de $4,7 \pm 1,0$.

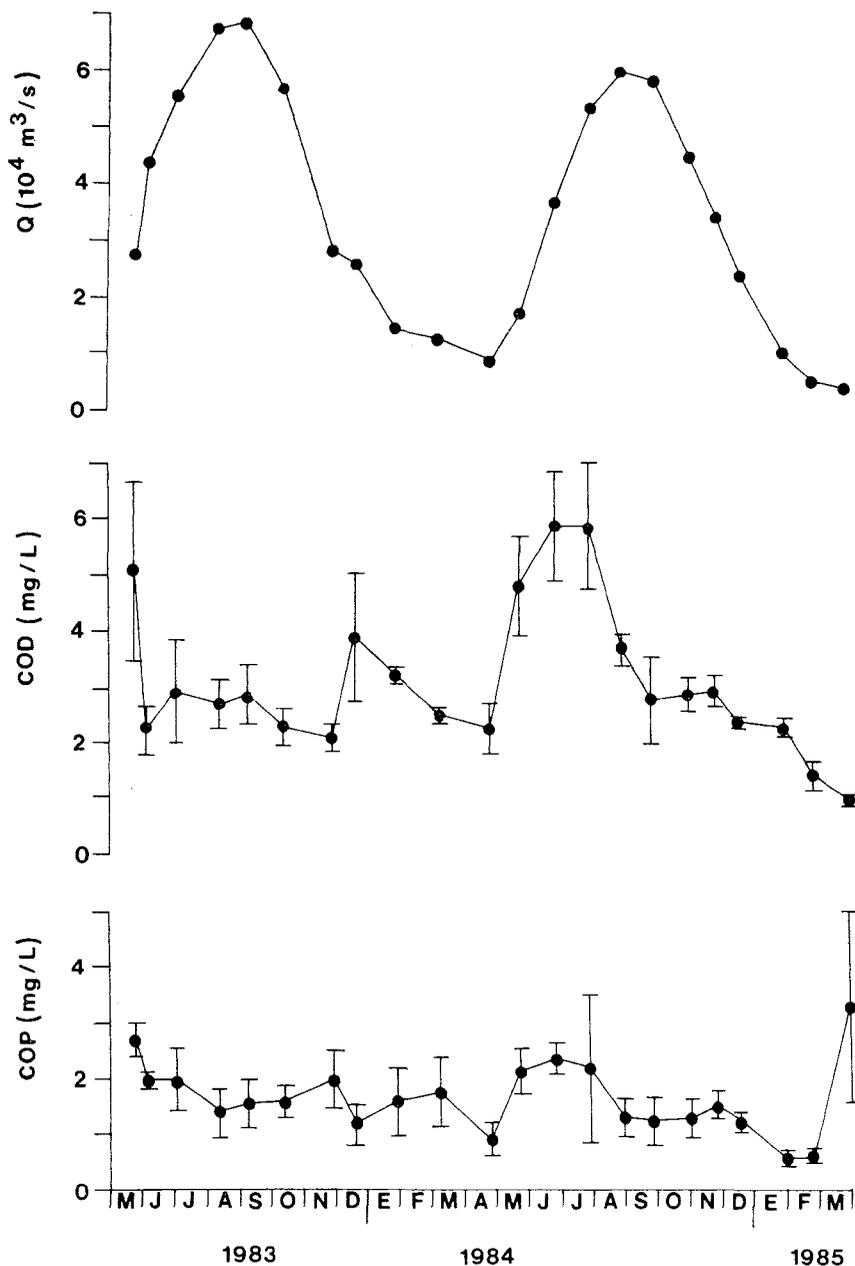


Fig. 2. Variaciones estacionales del caudal (Q) y las concentraciones de COD y COP para el río Orinoco en Ciudad Bolívar durante los años 1983-1985.

La composición y el flujo de COP en el río Amazonas fue estudiado en detalle por Hedge *et al.* (1986) en muestras obtenidas durante cuatro campañas realizadas durante 1982-1983. Estos autores dividieron el material particulado en dos fracciones, una fracción fina ($<63 \mu\text{m}$) y otra gruesa ($>63 \mu\text{m}$). El porcentaje promedio de carbono en el sedimento en el canal principal del río fue de 1,19% (d.s. = 0,19) para la fracción fina y de 1,01% (d.s. = 0,52) para la fracción gruesa. Los tributarios del río

Amazonas mostraron mayores concentraciones de carbono por peso de sedimento; así estos autores obtuvieron un promedio de 2,48% (d.s. = 2,60) para la fracción fina y de 1,42% (d.s. = 1,18) para la gruesa.

Estos resultados conjuntamente con los estudios de la composición isotópica del carbono y de los derivados fenólicos de la lignina, indican que restos de plantas vasculares y material húmico derivado del suelo constituyen el grueso del material orgánico trans-

portado por el Amazonas y éste además es de naturaleza refractaria ya que los procesos de degradación ocurren primero en los ambientes terrestres.

El río Negro con una concentración de COD de 10 mg/L fue estudiado por Leenheer (1980) y encontró que la materia orgánica en los ríos de aguas negras se origina a partir del lavado de los productos de descomposición de la hojarasca depositada sobre los suelos arenosos de la región. Este estudio confirma los resultados encontrados por Paolini (1978, 1979) en el Alto río Negro y ya sugeridos por Klinge (1967).

Ferreira *et al.* (1988) estudiaron el transporte de carbono y nutrientes del río Madeira, el cual es el principal tributario de aguas blancas del río Amazonas y encontraron los siguientes resultados: COD = 2,96 mg/L (intervalo 1,67 - 3,60) y COP = 3,05 mg/L (intervalo 0,61 - 5,94). Para el transporte de carbono estos autores estimaron los siguientes valores: $2,73 \times 10^6$ y $2,82 \times 10^6$ ton C/año para el COD y COP, respectivamente.

Los lagos de la Amazonia Central representan ecosistemas acuáticos los cuales han sido estudiados con cierto grado de detalle, ya que ellos permanecen aislados del canal principal del río durante el período de aguas bajas, comportándose entonces como ambientes leníticos, y a medida que transcurre la estación lluviosa van recibiendo aportes de agua y material del canal principal hasta prácticamente desaparecer durante el período de aguas altas.

Rai (1978) estudió el lago Tupé, un lago de aguas negras, respecto a la distribución de carbono orgánico, clorofila "a" y feopigmentos. La concentración de COD varió entre 10 - 14 mg/L, siendo la variación estacional más importante que la vertical. De modo que las concentraciones de COD alcanzan sus valores máximos entre los meses de mayo y junio debido a la entrada de detritos alóctonos vía río, al aumentar el nivel del lago. Posteriormente las concentraciones disminuyen por dilución y aumentan de nuevo debido a la producción de fitoplancton al disminuir el nivel del lago.

La concentración de COP varía entre 1,0 - 4,5 mg/L a nivel superficial con un máximo en junio. Su variación es paralela a la fluctuación del nivel del lago y las variaciones verticales son más marcadas que en el caso del COD. De acuerdo al autor éstas pueden ser explicadas por los procesos de degradación que ocurren en la columna de agua.

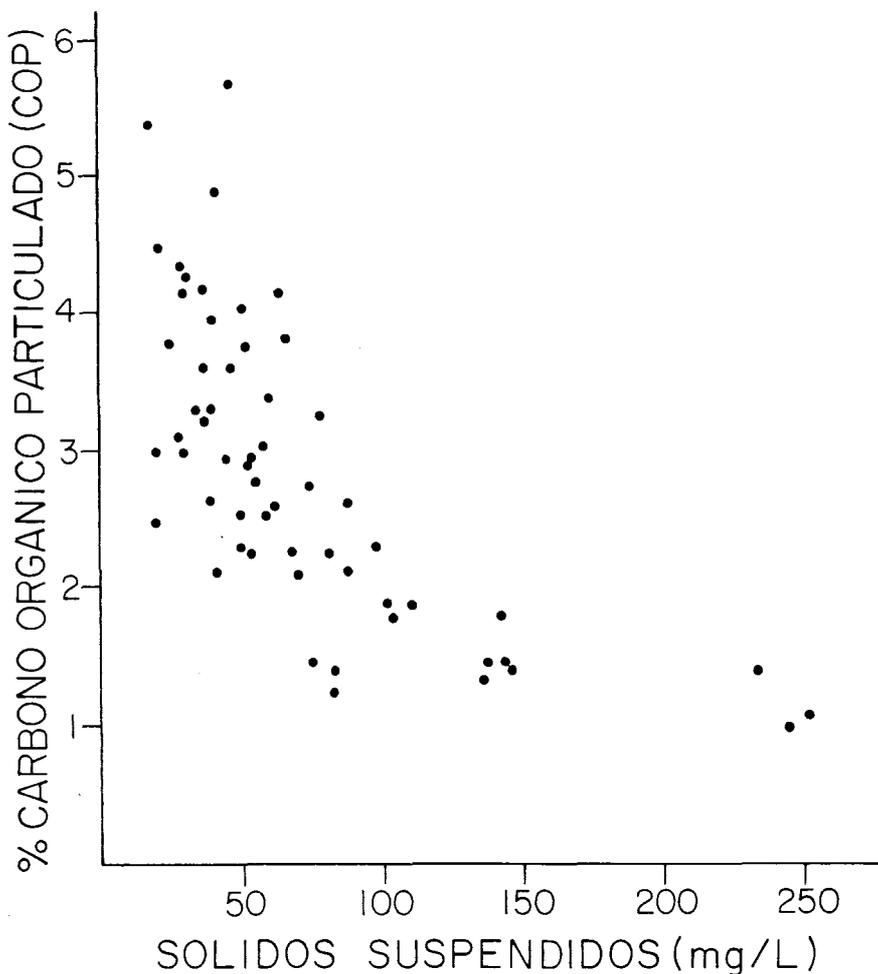


Fig. 3. Variación entre el porcentaje de carbono orgánico particulado (% COP) versus la concentración de sólidos suspendidos.

Furch y Junk (1985) estudiaron en el Amazonas Central el lago Camaleão (lago de varzea) respecto a las variaciones estacionales y verticales de COD. Estos autores encontraron que el agua del lago es más rica en COD que la del río Solimões excepto para el mes de julio cuando ocurre el máximo de inundación. Las concentraciones de COD pueden alcanzar valores de hasta 20 mg/L durante el período de aguas bajas (a partir de octubre), cuando no existe conexión entre el lago y el río. El incremento de COD durante este período probablemente se debe, por un lado, a un mayor intercambio con el sedimento, y por el otro a un lavado por la lluvia del material vegetal muerto expuesto en el fondo seco del lago. De este modo tenemos que el mayor impacto de las planicies de inundación sobre el COD en el canal principal del río, sucede durante el período de creciente y de aguas altas. Para el río Solimões la máxima concentración de COD

ocurre previa o durante el pico de descarga, al igual que otros grandes ríos tropicales como el Orinoco, el Níger y el Ganges.

Río Orinoco

En la Fig. 2 se muestran las variaciones estacionales de descarga, COD y COP para el río Orinoco en Ciudad Bolívar durante el período comprendido entre mayo de 1983 y marzo de 1985. Como se observa en dicha figura, el COD es la fracción orgánica dominante; sus concentraciones varían entre 0,88 y 7,51 mg/L con un promedio aritmético de 3,04 mg/L (d.s. = 1,37; n = 124) y un promedio ponderado por descarga de 3,13 mg/L; ambos valores están dentro del intervalo observado para el 80% de los ríos mundiales (Meybeck, 1982).

La concentración de COD es mayor en el limbo ascendente del hidrograma (mayo y junio) cuando el lava-

do de material del suelo y de plantas puede ocurrir debido a las primeras precipitaciones. Este efecto de "flushing" ha sido observado también en algunos ríos y quebradas de las zonas templadas (Fisher y Likens, 1973; Larson, 1978; Lewis y Grant, 1978) y aun en grandes ríos del mundo como el Amazonas (Richey *et al.*, 1980); el Ganges, el Bramaputra y el Indus (Ittekkot *et al.*, 1986) y aun para el mismo Orinoco en años anteriores (Németh *et al.*, 1982; Paolini *et al.*, 1983, 1987). Entre el COD y la descarga se encontró un coeficiente de correlación lineal significativo epro bajo ($r = 0,23$; $n = 118$).

La concentración de COP varía entre 0,46 y 4,79 mg/L con un promedio aritmético de 1,59 mg/L (d.s. = $\pm 0,83$; $n = 124$) y con un promedio ponderado por descarga de 1,62 mg/L. Ambos valores están dentro del intervalo (1 - 30 mg/L) observado para el 99% de los ríos del mundo (Meybeck, 1982). Al igual que en el COD, la concentración de COP fue mayor durante el limbo ascendente del hidrograma y también la correlación entre COP y descarga fue significativa pero baja. Ahora bien, entre la concentración de COP y la de sólidos totales la correlación es significativa ($r = 0,55$; $n = 116$). Resultados similares fueron observados para el río Mississippi por Nordin y Meade (1981).

El porcentaje de carbono orgánico en el sedimento varió entre 0,83% y 10,86% y la relación entre ambos parámetros puede verse en la Fig. 3. La tendencia observada es similar a la discutida por Ittekkot (1988), Meybeck (1982) y Milliman *et al.* (1984); en otras palabras, a medida que aumenta la concentración de sólidos suspendidos, disminuye el porcentaje de carbono en los mismos. Este comportamiento se debe a la dilución de los detritus de plantas y del plancton por los productos minerales de la erosión de los suelos durante el período de aguas altas (Meybeck, 1982). Adicionalmente, al haber mayor concentración de sólidos suspendidos en el río, se reduce la penetración de luz y por consiguiente la producción primaria del fitoplancton y el COP autóctono (Thurman, 1985).

La relación COD/COT varía entre 0,85 y 0,20 con un valor promedio de 0,66 (d.s. = $\pm 0,12$; $n = 118$) confirmando la importancia del COD en el transporte de carbono en el río Orinoco.

Respecto a la relación C/N en el material particulado, ésta varió durante el período de estudio entre 2 - 17 con un promedio de 8,9 coincidiendo con el valor observado por Meybeck (1982)

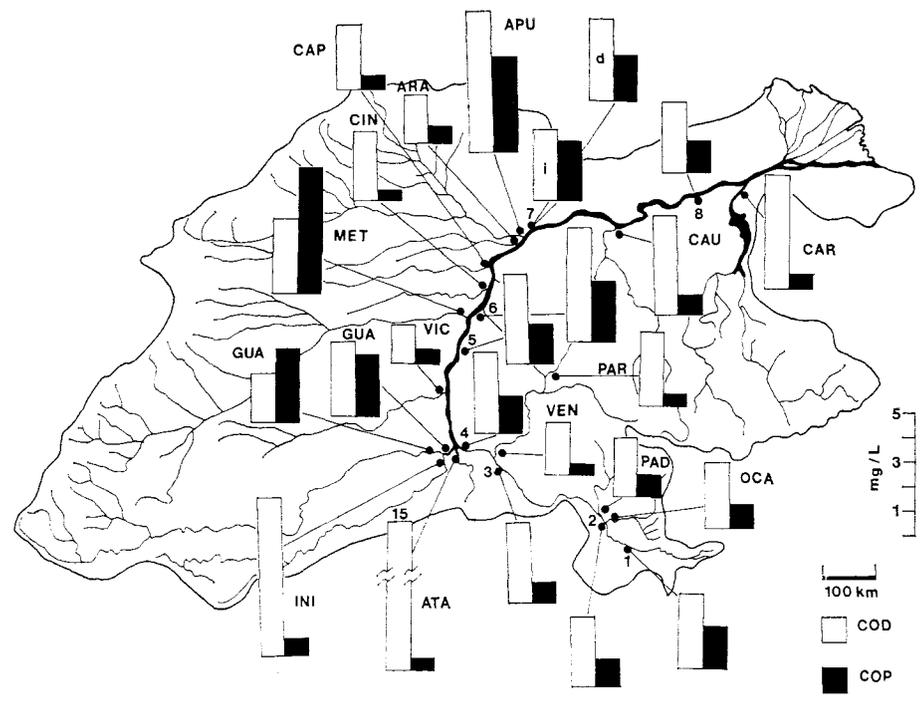


Fig. 4. Concentraciones de COD y COP a lo largo del canal principal del río Orinoco y sus principales tributarios durante octubre de 1984. Estaciones del canal principal: 1) Platanal; 2) Aguas arriba del Ocamo; 3) Aguas arriba del Ventuari; 4) Aguas arriba del Guaviare; 5) Isla Ceiba o Bachaquito; 6) Aguas arriba del Parguaza; 7) Curiquima (i = margen izquierda; d = margen derecha) y 8) Ciudad Bolívar. Tributarios margen derecha OCA = Ocamo; PAD = Padamo; VEN = Ventuari; PAR = Parucito; ATA = Atabapo; CAU = Caura; CAR = Caroní. Tributarios margen izquierda: GUA = Guaviare, aguas arriba y aguas abajo del Inirida; INI = Inirida; VIC = Vichada; MET = Meta; CIN = Cinaruco; CAP = Capanaparo; ARA = Arauca; APU = Apure.

de 8 - 10 para varios ríos. Los valores más bajos se observan durante el período de aguas bajas el cual coincide con la mayor producción primaria del río (Lewis, 1988), mientras que valores más altos tienden a ser comunes durante el período de mayor descarga.

El transporte anual de carbono orgánico del río Orinoco en Ciudad Bolívar se estimó en $5,5 \times 10^{12}$ gC/año (Paolini *et al.*, 1987) y si a este valor le añadimos el transportado por el Caroní de $1,04 \times 10^{12}$ gC/año (Paolini, 1986; Paolini *et al.*, 1987) tendríamos un valor de $6,6 \times 10^{12}$ gC/año. Este valor es similar al encontrado por Lewis y Saunders (1989) en Barrancas, aguas abajo de la confluencia del Caroní con el Orinoco, para ese mismo período de estudio.

Las concentraciones de COD y COP a lo largo del canal principal del Orinoco y de algunos de sus principales tributarios se muestran en la Fig. 4. En el canal principal las concentraciones de COD se mantienen casi constantes con un valor promedio de 3,47 mg/L (d.s. = 0,68, $n = 9$). Todos los tributarios de la margen derecha, excepto por los ríos Ata-

bapo, Caura y Caroní muestran valores similares al canal principal; este hecho es sorprendente si tomamos en cuenta el color oscuro de esas aguas. Por otro lado, los tributarios de la margen izquierda presentan concentraciones inferiores al canal principal, siendo la única excepción el río Apure.

Para el COP se observa el siguiente comportamiento: cuando las aguas turbias de los tributarios andinos confluyen en el canal principal del Orinoco, la concentración de COP se incrementa por el aumento de sólidos suspendidos. Aunque entre las bocas del Meta y del Apure se observa una ligera disminución debido a que gran parte de los sedimentos transportados por el Orinoco se depositan en este tramo (Meade *et al.*, 1983).

Las contribuciones al COP del canal principal del Orinoco son pequeñas para los tributarios de la margen derecha que drenan al Escudo Guayanés y algunos tributarios de la margen izquierda (Vichada, Inirida y Cinaruco, entre otros) cuyas cabeceras se encuentran en los Llanos propiamente, o drenan viejas superficies de erosión, te-

renos bajos, zonas dominadas por vegetación de sabana y suelos ricos en cuarzo de pobre desarrollo pedológico. En cambio, los tributarios de la margen izquierda cuyas cabeceras están localizadas en los Andes contribuyen, significativamente con el COP del canal principal del Orinoco.

Río Paraná

El río Paraná fue estudiado por Depetris y Lenardón (1982, 1983) en la ciudad de Santa Fe, 600 Km aguas arriba de su desembocadura, respecto a su material transportado en forma disuelta y particulada. Estos autores encontraron mayores concentraciones de COD durante los períodos de aguas altas y la atribuyen a un lavado de compuestos orgánicos de los suelos presentes en la cuenca de drenaje y, también, a la influencia del material descompuesto en las planicies de inundación, los cuales pasarían al canal principal del río durante dicho período.

Cuando se grafican las concentraciones de COD vs los valores de descarga, se obtiene una curva de histéresis en forma de bucle (*hysteresis loop*), la cual muestra la dependencia del sistema de su historia previa (Depetris y Cascante, 1985).

La concentración promedio de COD ponderada por descarga para el período comprendido entre marzo 1981 y noviembre 1984 fue de 9,3 mg/L (Depetris y Cascante, 1985). Respecto al COP la concentración promedio ponderada por descarga fue de 2,1 mg/L para el mismo período, con una variación comprendida entre 0,4 - 25,2 mg/L (Depetris y Cascante, 1985). Al igual que el Orinoco, las concentraciones de COP muestran la tendencia de aumentar al aumentar las concentraciones de sedimentos, y una dilución moderada al aumentar la descarga. La cantidad de carbono orgánico transportado por el río Paraná se estimó en $7,2 \times 10^6$ ton C/año (Depetris y Paolini, 1990).

Depetris y Kempe (en preparación) estudiaron el impacto de la oscilación de El Niño en 1982 sobre los parámetros fisicoquímicos del río Paraná en el cual la descarga del río alcanzó valores excepcionalmente altos. La concentración de COP ponderada por descarga para la época pre-El Niño era de 3,5 mg/L ($16,3 \times 10^6$ ton C/año) y disminuyó a 1,3 mg/L ($9,3 \times 10^5$ ton C/año) durante el fenómeno de El Niño. Por otro lado, el COD aumentó su promedio ponderado por descarga de 6,1 a 10,2 mg/L

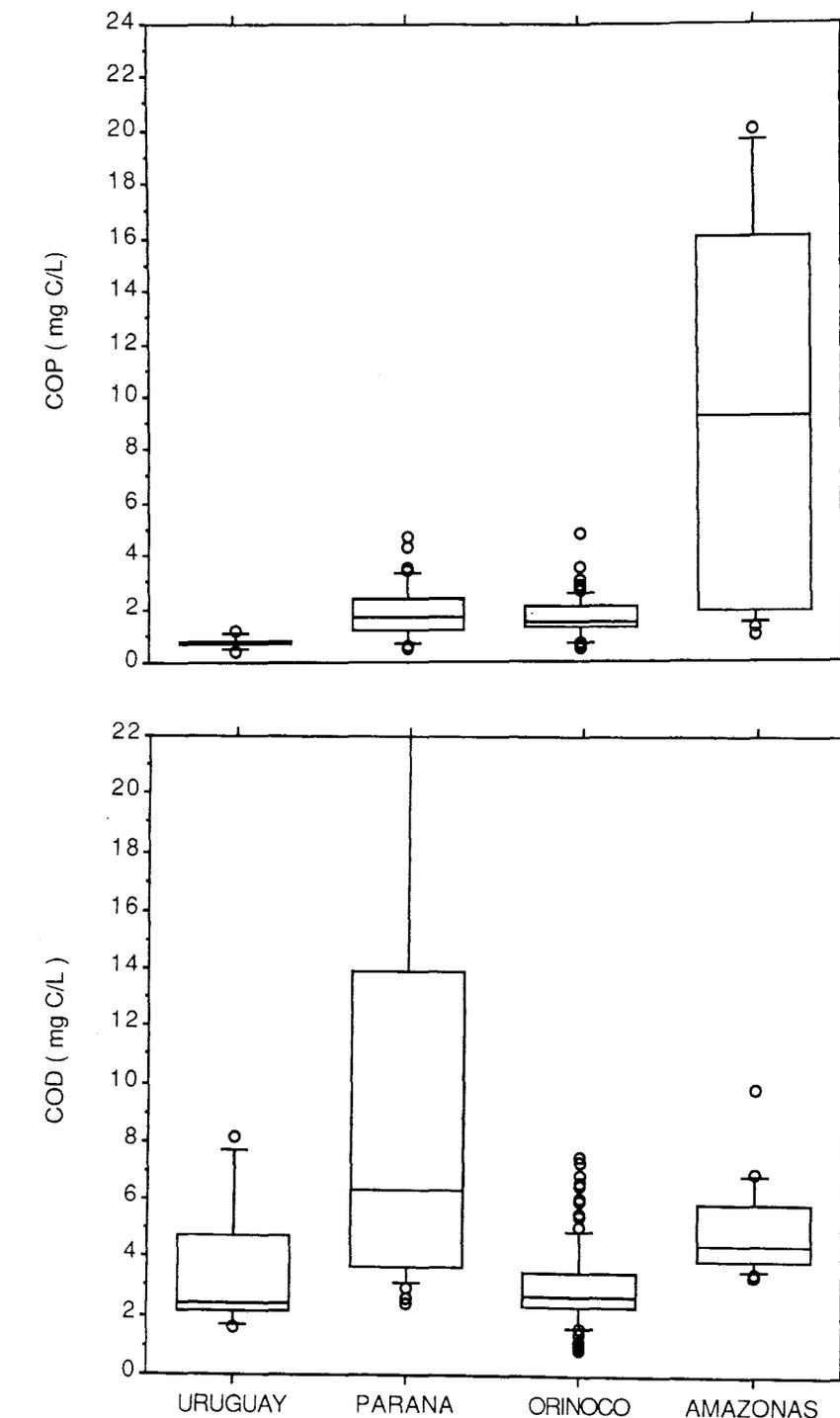


Fig. 5. Cajas Gráficas para COD y COP de los ríos Uruguay, Paraná, Amazonas y Orinoco.

por lo cual duplicó su transporte de $2,8$ a $7,5 \times 10^6$ ton C/año.

Río Uruguay

El río Uruguay en Salto Grande fue estudiado por Mañosa y Depetris (1990) durante el ciclo hidrológico comprendido entre diciembre 1985 y febrero 1987 respecto a sus componentes orgánicos y calcularon su

transporte en $0,6 \times 10^6$ ton C/año. Las concentraciones de COD mostraron valores extremos de 1,6 y 8,2 mg/L, con un promedio ponderado por descarga de 3,4 mg/L y estos valores no mostraron correlación con la descarga. El COD representa entre un 2,2 y un 21% del peso del sedimento transportado, variando su concentración entre 0,4 y 1,2 mg/L y con un promedio ponderado por descarga de 0,7 mg/L. A diferencia del COD, el COP sí

presenta una clara relación con la descarga.

En la Fig. 5 se resume en forma de cajas gráficas (*Box-Plots*) la información disponible respecto al carbono orgánico en forma disuelta y particulada de los grandes ríos suramericanos. Se puede observar para todos estos ríos que la forma disuelta del carbono es la predominante aunque en el caso del río Amazonas diera la impresión que el COP fuese predominante pero no es cierto, ya que los datos utilizados en la elaboración de la gráfica disponibles en la literatura (Richey *et al.*, 1980; Wissmar *et al.*, 1981) corresponden sólo a dos fechas y a todo lo largo del canal principal del río. Para los otros ríos (Orinoco, Paraná, Uruguay) se disponía de datos distribuidos durante todo el ciclo hidrológico y en un solo punto de muestreo.

Rendimiento Anual de Carbono Orgánico por Área en ríos Suramericanos

El transporte específico de carbono o rendimiento anual de carbono por unidad de área, expresado en ha año $\text{gC}/\text{m}^2\text{año}$, es un parámetro relacionado con la descarga específica ($\text{L}/\text{km}^2 \text{seg}$). Meybeck (1981) compiló la información disponible hasta entonces (75 ríos) y encontró que el 90% de los mismos mostraban valores dentro del intervalo comprendido entre 0,4 y 10 $\text{gC}/\text{m}^2 \text{año}$ y éstos estaban relacionados a factores climáticos. Este mismo autor asigna valores de 3 a 15 $\text{gC}/\text{m}^2 \text{año}$ para los ríos tropicales aunque Schlesinger y Melack (1981) posteriormente estimaron un valor de 5 $\text{gC}/\text{m}^2 \text{año}$.

En la Fig. 6 se muestra la relación entre el transporte específico del carbono y la descarga específica para los datos disponibles de algunos ríos suramericanos. Esta relación resultó altamente significativa ($r = 0,94$; $n = 10$). Los mayores rendimientos corresponden a ríos de aguas negras (Caroní, Caura y Negro) a diferencia de ríos típicos de aguas blancas (Madeira y Apure) que presentaron menores rendimientos.

Conclusiones

1. La relación COD/COP para los ríos suramericanos es siempre mayor que uno y a menudo entre 2 y 3.

2. Las concentraciones de COD tienden a incrementarse con el aumento de la descarga y los rendimientos de COD por unidad de área son mayores comparados con otros ríos a nivel mundial.

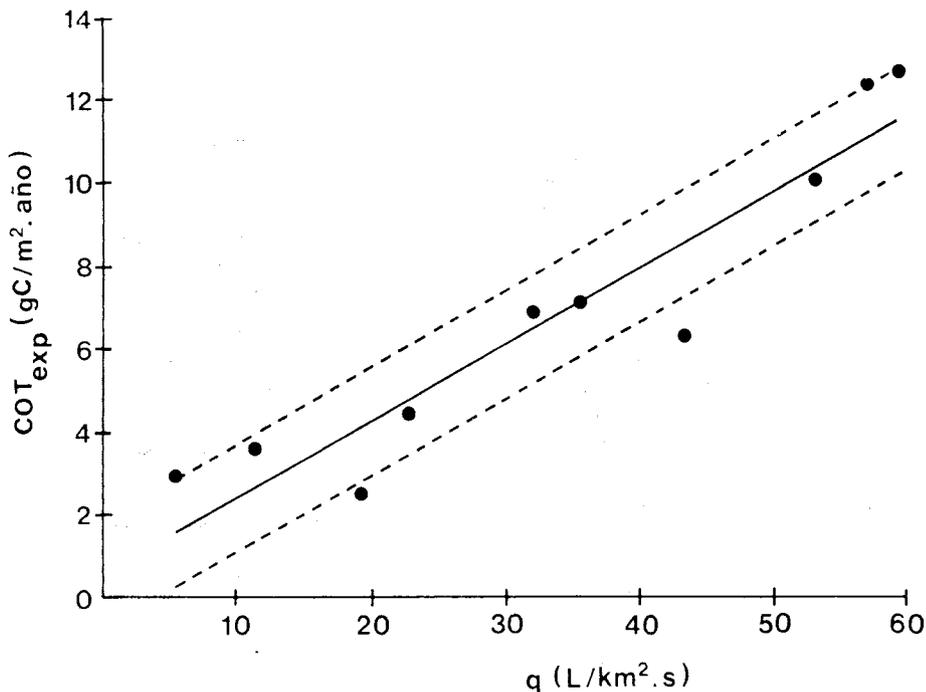


Fig. 6. Rendimiento de carbono orgánico por unidad de área (COT_{exp}) versus descarga específica (q) para algunos ríos suramericanos. Datos tomados de: Depetris y Paolini, 1990; Ferreira *et al.*, 1988; Lewis *et al.*, 1986; Lewis y Saunders, 1989; Mañosa y Depetris, 1990; Paolini *et al.*, 1987; Richey *et al.*, 1990; Saunders y Lewis, 1988.

3. Las concentraciones de COP están a menudo correlacionadas positivamente con los sólidos suspendidos y particularmente durante el limbo ascendente del hidrograma son mayores en comparación con otros períodos.

4. Desde un punto de vista global, los ríos suramericanos contribuyen con un 8 a un 13% del flujo total del carbono hacia los océanos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es dedicado a la memoria del Profesor Egon T. Degens quien en vida fue el motor del proyecto internacional "Transporte de Carbono y Minerales en Grandes Ríos".

Algunas de las ideas desarrolladas en este artículo fueron producto del intercambio de información y trabajo conjunto entre el autor y los Dres. Venu Ittekkot, Stefan Kempe y Alejandro Spitz del Centro Internacional de Carbono de la Universidad de Hamburgo (Rep. Fed. de Alemania) y el Dr. Pedro Depetris (CONICET, Argentina).

Especial agradecimiento al Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (MARNR) en las Oficinas de la Zona 11 (Ciudad Bolívar) y Proyecto Orinoco-Apure (Caracas) por el apoyo logístico prestado, que hicieron posibles los muestreos en el río Orinoco y a la Fundación Alejandro Humboldt (Rep. Fed. de Alemania) por financiar la estadia del autor en la ciudad de Hamburgo, período en el cual gran parte del trabajo fue elaborado.

REFERENCIAS

- Baumgartner, A. y E. Reichel (1975): The world water balance. Elsevier, Amsterdam, 179 pp.
- Degens, E. T. (Editor): (1982): Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Part I. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 52: 1-766.
- Degens, E. T., S. Kempe y H. Soliman (Editores) (1983): Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Part II. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 55: 1-535.
- Degens, E. T., S. Kempe y R. Herrera (Editores): (1985): Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Part III. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 58: 1-645.
- Degens, E. T., S. Kempe y Can Wei-Bin (Editores) (1987): Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Part IV. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 64: 1-512.
- Degens, E. T., S. Kempe y S. Naidu (Editores) (1988): Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Part V. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 66: 1-442.
- Degens, E. T., S. Kempe y J. Richey (Editores) (1990): Biogeochemistry of Major World Rivers. John Wiley and Sons Ltd., Chichester (en prensa).
- Depetris, P. y A. M. Lenardón (1982): Particulate and dissolved phases in the Paraná river. En: "Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers" Part I (E. T. Degens, ed.) *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 52: 385-395.

- Depetris, P. y A. M. Lenardón (1983): A second report on particulate and dissolved phases in the Paraná river. In: "Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers" Part II (E. T. Degens, S. Kempe y H. Solimán, eds.) *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 55: 167-181.
- Depetris, P. y E. Cascante (1985): Carbon Transport in the Paraná River. En: "Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers", Part III. (E. T. Degens, S. Kempe y R. Herrera, eds.) *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 58: 299-304.
- Depetris, P. y J. Paolini (1990): Biogeochemistry of South American Rivers: the Paraná and the Orinoco. En: Biogeochemistry of Major World River (eds. E. T. Degens, S. Kempe and J. E. Richey). John Wiley and Sons, Chichester (en prensa).
- Ertell, J. R., J. I. Hedges, A. H. Devol, J. E. Richey y M. N. Góes Ribeiro (1986): Dissolved humic substances of the Amazon river system. *Limnol. Oceanogr.* 31: 739-754.
- Ferreira, J. R., A. H. Devol, L. A. Martinelli, B. R. Forsberg, R. L. Victoria, J. E. Richey y J. Mortatti (1988): Chemical composition of the Madeira river: Seasonal trends and total transport. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 66: 63-75.
- Fisher, S. C. y Likens, G. E. (1973): Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: An integrative approach to stream ecosystem metabolism. *Ecol. Monogr.* 43: 421-439.
- Furch, K. y W. J. Junk (1985): Dissolved carbon in a flood plain lake of the Amazon and in the river channel. En: "Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers" (eds. E. T. Degens, S. Kempe y R. Herrera). *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 58: 285-298.
- Hedges, J. I., W. A. Clark, P. D. Quay, J. E. Richey, A. H. Devol y U. de M. Santos (1986): Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon river. *Limnol. Oceanogr.* 31: 717-738.
- Ittekkot, V., S. Safiullah y R. Arain (1986): Nature of organic matter in rivers with deep sea connection: the Ganges-Brahmaputra and Indus. *Science Tot. Environm.* 58: 93-107.
- Ittekkot, V. (1988): Global trends in the nature of organic matter in river suspensions. *Nature* 332: 436-438.
- Junk, W. J. (1985): Ahe Amazon floodplain, a sink or source for organic carbon. En: "Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers" Part III (eds. E. T. Degens, S. Kempe y R. Herrera). *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 58: 267-283.
- Kempe, S. (1979): Carbon in the freshwater cycle. En: The Global Carbon Cycle (eds. B. Bolin, E. T. Degens, S. Kempe and P. Ketner) John Wiley, New York, pp. 317-342.
- Klinge, H. (1967): Podzol soils: a source of black water rivers in Amazonia. En: Atas do Simposio Biota Amazonica (Lent, H., editor) Belén, 1966, 3 (Limnologia): 117: 126.
- Larson, R. A. (1978): Dissolved organic matter of a low coloured stream. *Freshwater Biol.* 8: 91-104.
- Leenheer, J. A. (1980): Origin and nature of humic substances in the waters of the Amazon river basin. *Acta Amazónica* 10: 513-526.
- Lewis, W. M. Jr y M. S. Grant (1978): Changes in the output of ions from a watershed as a result of the acidification of precipitation. *Ecology* 60: 1093-1097.
- Lewis, W. M. Jr. y J. E. Saunders III (1989): Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River. *Biogeochemistry* 7: 203-240.
- Lewis, W. M. Jr., J. F. Saunders III, S. N. Levine y F. H. Weibezahn (1986): Organic carbon in the Caura River, Venezuela. *Limnol. Oceanogr.* 31: 653-656.
- Mañosa, W. y P. Depetris (1990): Preliminary results on carbon fluxes in the Uruguay river. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* (en prensa).
- Meade, R. H., C. F. Nordin, D. Pérez-Hernández, A. Mejía y J. M. Pérez-Godoy (1983): Sediment and water discharge in the Río Orinoco, Venezuela and Colombia. En: Proc. Second Intern. Symp. on River Sedimentation, 11-16 October 1983, Nanjing, China. Water Resources and Electric Power Press, Beijing, China, pp. 1134-1144.
- Meybeck, M. (1981): River transport of organic carbon to the ocean, en: "Flux of organic carbon by rivers to the oceans". Report of a Workshop held at the NAS Study Center, Woods Hole, Massachusetts, September 21-25, 1980. Conf-8009140, Washington, D.C., U.S. Dept. Energy Research, pp. 219-269.
- Meybeck, M. (1982): Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *Am. J. Sci.* 282: 401-450.
- Meybeck, M. (1988): How to establish and use world budgets of riverine materials. En: "Physical and chemical weathering in geochemical cycles" (Eds. A. Lerman and M. Meybeck) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 247-272.
- Milliman, J. D. y R. H. Meade (1983): World wide delivery of river sediments to the oceans. *J. Geol.* 91: 1-21.
- Milliman, J. D., Xie Qin-Chun y Yan-Zuo-Shung (1984): Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze River to the ocean. *Am. J. Sci.* 284: 824-834.
- Németh, A., J. Paolini y R. Herrera (1982): Carbon transport in the Orinoco River: Preliminary results. En: "Transport of carbon and minerals in Major World Rivers", Part I (ed. E. T. Degens) *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 52: 357-364.
- Nordin, C. F. Jr. y R. H. Meade (1981): The flux of organic carbon to the oceans: some hydrological considerations. En: "Flux of organic carbon by rivers to the oceans". Report of a workshop held at the NAS Study Center, Wood Hole, Massachusetts, September 21-25, 1986. Conf-8009140, Washington, D.C., U.S. Dept. Energy, Office Energy Research, pp. 173-218.
- Paolini, J. (1978): Charakterisierung und Dynamik von Huminstoffsystemen in der amazonischen Caatinga bei San Carlos de Río Negro, Venezuela. Tesis Doctoral, Universidad de Göttingen, República Federal de Alemania. 134 pp.
- Paolini, J. (1979): Huminstoffsystem in der Caatinga amazonica bei San Carlos de Río Negro, Venezuela. *Amazoniana* 6: 569-582.
- Paolini, J. (1986): Transporte de Carbono y Minerales en el río Caroní. *Interciencia* 11: 295-297.
- Paolini, J., R. Herrera y A. Németh (1983): Hydrochemistry of the Orinoco and Caroní rivers. En: "Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers", Part II (eds. E. T. Degens, S. Kempe y H. Solimán) *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 55: 223-236.
- Paolini, J., R. Hevia y R. Herrera (1987): Transport of Carbon and Minerals in the Orinoco and Caroní rivers during the years 1983-1984. En: "Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers". Part IV (eds. E. T. Degens, S. Kempe, Gan Wei Bin) *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg* 64: 325-338.
- Rai, H. (1978): Distribution of Carbon, chlorophyll "a" and phaeopigments in the black water lake ecosystem of Central Amazon region. *Arch. Hydrobiol.* 82: 74-87.
- Richey, J. E., J. T. Brock, R. J. Naiman, R. C. Wissmar y R. F. Stallard (1980): Organic carbon: oxidation and transport in the Amazon river. *Science* 207: 1348-1351.
- Richey, J. E., R. L. Victoria, E. Salati y B. Forsberg (1990): The biogeochemistry of a major river system: The Amazon case study. En: Biogeochemistry of Major World Rivers (eds. E. T. Degens, S. Kempe y J. E. Richey). John Wiley and Sons, Chichester (en prensa).
- Saunders, J. F. III y W. M. Lewis Jr. (1988): Transport of phosphorus, nitrogen, and carbon by the Apure River, Venezuela. *Biogeochemistry* 5: 323-342.
- Sioli, H. (1965): Bemerkungen zur typologie amazonischer Flüsse. *Amazoniana* 1: 74-83.
- Sioli, H. (1975a): Tropical river. The Amazon. En: "River Ecology" (B. A. Whitton, ed.) Blackwell, London, pp. 461-491.
- Sioli, H. (1975b): Tropical river as expressions of their terrestrial environment. En: "Tropical ecological systems: Trends in terrestrial and aquatic research". (F. B. Golley y E. Medina, eds.) Springer Verlag, New York, pp. 275-288.
- Schmidt, G. W. (1972): Amounts of suspended solids and dissolved substances in the middle reaches of the Amazon over the course of one year (August, 1969-July, 1970) *Amazoniana* 3: 208-223.
- Schlesinger, W. H. y J. M. Melack (1981): Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus* 33: 172-187.
- Thurman, E. M. (1985): Organic geochemistry of natural waters. Kluwer-Academic.
- Vegas-Vilarrubia, T., J. Paolini y R. Herrera (1988a): A physicochemical survey of blackwater rivers from the Orinoco and the Amazon basins in Venezuela. *Arch. Hydrobiol.* 111(4): 491-506.
- Vegas-Vilarrubia, T., J. Paolini y J. García Miragaya (1988b): Differentiation of some Venezuelan blackwater rivers based upon physico-chemical properties of their humic substances. *Biogeochemistry* 6: 59-77.
- Williams, P. M. (1968): Organic and inorganic constituents of the Amazon River. *Nature* 218: 937-938.
- Wissmar, R. C., J. E. Richey, R. F. Stallard y J. M. Edmond (1981): Plankton metabolism and carbon process in the Amazon river, its tributaries, and floodplain waters. Peru-Brazil, May-June 1977. *Ecology* 62: 1622-1633.