

RETENCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA GRUESA EN UNA QUEBRADA DE MONTAÑA TROPICAL. BOGOTÁ, COLOMBIA

Retention of Coarse Particulate Organic Matter in a Stream Tropical Mountain. Bogotá, Colombia

JAVIER RODRÍGUEZ-BARRIOS¹, Biólogo M.Sc.; RODULFO OSPINA², Dr. rer. nat.

¹ Universidad del Magdalena, Santa Marta, Magdalena, Colombia. A.A. 10004, jarodriguezba@unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá, ciudad universitaria, Carrera 30 No. 45-03. AA. 14490. Bogotá, Colombia. rospinat@unal.edu.co

Presentado 24 de julio de 2006, aceptado 27 de febrero 2007, correcciones 21 de marzo de 2007.

RESUMEN

Se determinó el porcentaje de retención de tres fracciones de materia orgánica particulada gruesa (MOPG) y el efecto de la magnitud del caudal sobre la retención de la materia orgánica particulada (MOP), durante un período de cinco meses en tres sectores de una quebrada tropical de montaña ubicada en los Cerros Orientales de Bogotá - Colombia. La condición tropical del sistema, mostró un patrón de caudal constante aunque pudo diferenciarse un período de alta y baja descarga. Los resultados mostraron que el valor promedio del porcentaje de retención fue relativamente alto, presentándose una asociación negativa entre la magnitud del caudal y el porcentaje de retención de las fracciones MOPG, siendo más evidente en partículas pequeñas ($r_s = -0,74$; $p < 0,01$). En este sentido se demuestra que quebradas tropicales de montaña con buen estado de conservación presentan una heterogeneidad del lecho que posibilita la retención de grandes cantidades de MOPG como sucede en la quebrada La Vieja.

Palabras clave: retención, transporte, MOPG, quebradas tropicales de montaña.

ABSTRACT

Retention percentage of three fractions of coarse particulate organic matter (MOPG) and discharge effect over retention of particulate organic matter (MOP) were studied during five months in three sectors of a tropical mountain stream, at Eastern hills of Bogotá - Colombia. The tropical condition of the system, showed a pattern of constant discharge although could be a different period from low and high discharge. Results showed as average value of retention percentage was high, with a negative association between flow magnitude and percentage of retention for each MOPG

fraction, being more evident in small particles ($r_s = -0.74$, $p < 0.01$). It demonstrates how well preserved tropical mountain streams can display a high bed heterogeneity which helps to retention of great amounts of MOPG same to La Vieja creek.

Key words: Retention, transport, MOPG, tropical mountain stream.

INTRODUCCIÓN

Cuando la materia orgánica particulada (MOP) entra a las quebradas, puede experimentar tres acontecimientos diferentes: almacenarse en el lecho por algún período de tiempo, transportarse a los ecosistemas aguas abajo o ser respirada en forma de CO_2 debido a procesos biológicos (Allan, 1995; Webster *et al.*, 1999). La relativa importancia de estos eventos depende del orden del río, geomorfología del canal y vegetación riparia (Webster y Benfield, 1986; Vannote *et al.*, 1980). Las características físicas de quebradas que presentan una alta heterogeneidad geomorfológica, con la presencia de sustratos emergentes, tapetes de macrófitas, parches de palizadas y condiciones de régimen hidrológico correspondientes a períodos de lluvia y sequía, detienen de manera significativa el transporte de materiales, especialmente de MOPG, debido a que esta fracción presenta una mayor área expuesta a la retención comparado con las fracciones fina y disuelta de MOP (Horvat, 2003; Allan, 1995). Esta MOPG almacenada en paquetes de hojarasca cumple a su vez un papel importante en la retención de partículas finas, además de ser fuente generadora de MOPF (Adams, 1998). El incremento en la retención de las quebradas favorece la disponibilidad de MOP, que puede ser asimilada por las comunidades acuáticas, además, se reduce la exportación de materiales aguas abajo (Allan, 1995). La retención de la MOPG varía entre tramos, estaciones y tipo de quebrada, lo cual es reflejado por la relación entre su tasa de procesamiento y la exportación hacia sectores de la cuenca de orden superior (Allan, 1995).

Estudios experimentales de transporte y retención de MOPG (Hojas) en canales de 10x35 cm han demostrado que, en condiciones de flujo normal, el porcentaje de retención varía de acuerdo al tamaño de las fracciones, especies de hojas, el incremento de sustratos emergentes (obstáculos) y la velocidad del flujo (Webster *et al.*, 1987). La retención de las quebradas es un aspecto que se ve reflejado en procesos de restauración, como lo demuestra Muotka y Laasonen (2002), quienes encontraron que en un período de varios años el porcentaje de retención, demuestra el grado de restauración en quebradas de Finlandia, que inicialmente habían sido canalizadas. De acuerdo a Naiman (1982), cuencas conservadas presentan una alta retención de MOPG. De tal forma que esta MOPG sufre procesos de fragmentación y degradación a partículas más finas que posteriormente son transportadas en mayor proporción que las cantidades de MOPG (Webster *et al.*, 1987). La tasa de retención de MOPG se ve afectada negativamente durante eventos de crecientes y la estacionalidad de esta descarga, demostrando la importancia del caudal en procesos de almacenamiento y transporte. La cantidad de MOPG exportada y retenida durante un período anual, se correlaciona con el área de la cuenca a escala de mosaicos de paisaje (Mulholland y Watts, 1982). La mayor parte de la MOPG retenida es procesada por las comuni-

dades de organismos heterótrofos y autótrofos. Así, la retención de MOPG cumple el rol de mayor importancia en la estructura y función de los ecosistemas acuáticos (Meyer, 1989). Se conoce que los organismos autótrofos, como las macrófitas acuáticas, desarrollan un papel importante en el almacenamiento de partículas finas y gruesas de MOP, principalmente en ríos de orden mayor debido a la dominancia de sus comunidades (revisado por Koetsier y McArthur, 2000; Horvat, 2003); además de ser empleadas como organismos indicadores de restauración por esta cualidad retentiva en quebradas intervenidas (Muotka y Laasonen, 2002). Koetsier y McArthur (2000) en quebradas de Carolina del Sur, EE.UU., demostraron la importancia de los tapetes de *Sparganium* sp. en la retención de cantidades significativas de MOPG durante la época de otoño, debido a la mayor oferta de MOPG por el aporte de hojarasca producida por la vegetación riparia.

La abundancia en las comunidades de macroinvertebrados bentónicos está determinada por la disponibilidad de MOPG que es retenida en el lecho, principalmente para el grupo de trozadores (Allan, 1995; Negishi y Richardson, 2003). Smock *et al.* (1989) encontraron en quebradas de las costas de Virginia que la biomasa de macroinvertebrados se incrementó cinco veces en paquetes de hojas y palizadas en comparación con los sedimentos. Hildrew *et al.* (1987) cuantificaron la diferencia en la retención de diferentes quebradas al sur de Inglaterra y encontraron una relación directa entre la retención con la cosecha de hojarasca, además de la abundancia de invertebrados trozadores y copépodos. De esta manera, encontraron que al generar una retención artificial de hojarasca también se producía un incremento en la abundancia de trozadores.

La condición tropical que identifica a la quebrada La Vieja, promueve eventos que se diferencian de los de las zonas templadas debido a la estabilidad de procesos como la intensidad de la radiación solar, la temperatura anual, el caudal, las entradas, el transporte y la retención de MOPG, como resultado de la ausencia de una estacionalidad climática que promueva cambios drásticos en la oferta de materiales por el bosque ripario a escala temporal y espacial (Vargas, 2003). El presente estudio intenta evaluar el porcentaje de retención de tres fracciones de MOPG a escala de tramo en una quebrada tropical de montaña, durante eventos de alto y bajo caudal. De igual forma se busca generar información que permita confrontar los resultados obtenidos con estudios desarrollados en otros lugares del mundo en cuanto a la retención de la MOPG. De esta forma, se pretende probar la hipótesis según la cual a nivel de escala de tramo, las variaciones del caudal y las condiciones de flujo dominantes para cada período hidroclimático se convierten en un factor regulador para el porcentaje de retención de las diferentes fracciones de MOPG.

METODOLOGÍA

SITIO DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la microcuenca de la quebrada La Vieja, la cual está ubicada en la zona nororiental de la ciudad de Bogotá (74°08' W, 4°36' N) y es un afluente de la macrocuenca del río Bogotá. En dicha quebrada las condiciones físicas corres-

ponden a las de un río de montaña (cotas máx. 3.200 y 3.300 msnm, cota mín. 2.690 msnm). El régimen climático se encuentra dominado por la localización de la quebrada sobre los Cerros Orientales de la Sabana de Bogotá y su forma encañonada, mostrando una alta humedad (humedad relativa promedio de 85%) con una distribución bimodal de las lluvias (precipitación media anual de 1.100 mm). Las oscilaciones climáticas, a lo largo del día, se deben al desplazamiento de las nubes y ascenso de neblina, ocasionando variaciones repentinas y pronunciadas de la humedad relativa (Gutiérrez, 2006). Esta quebrada muestra un buen estado de conservación, complementada con condiciones tropicales de una temperatura del agua relativamente constante a lo largo del año (promedio de 14 °C) y un caudal poco variable (el caudal medio es de 15,6 l.s⁻¹), producto de una cuenca pequeña y encañonada (Vargas, 2003). La quebrada La Vieja se encuentra enmarcada dentro del desarrollo geológico de la cordillera Oriental colombiana, mostrando un registro cronológico de sedimentación epicontinental y marina que va desde el Cretáceo hasta el Terciario, cuyas rocas están cubiertas parcialmente por depósitos recientes, como fluviotorrenciales, de colusión y glaciales, con una sedimentación posterior netamente continental (IGAC, 1968, Garzón, 2003). De igual forma se han generado geoformas de origen glacial, conformadas por bloques de arenisca, angulares en matriz arcillo-limosa (Garzón, 2003). Además, se presentan rocas del Cretácico superior (formación Chipaque y formaciones de arenisca del Grupo Guadalupe), rocas del Terciario inferior (parte superior de la formación Guaduas) y depósitos recientes de coluviones y aluviones (IGAC, 1968). Las unidades geomorfológicas en esta microcuenca son de tipo escarpado, presentando pendientes fuertes y roca dura de composición sedimentaria. En la parte más alta de la cuenca, aparecen los suelos de la serie Páramo (Dystrandeps húmicos), con pequeños sectores de suelos orgánicos (Histosoles) muy poco evolucionados (Troporthents; Cortés 1976). Todos los suelos de la quebrada son ácidos, pobres en nutrientes, con altos contenidos de aluminio e hidrógeno, y de baja fertilidad, pero con un buen desarrollo de su vegetación (Vargas, 2003). En su parte alta, la quebrada presenta suelos de la serie Páramo que corresponden a Dystrudeps Húmicos, en las laderas se encuentran suelos de la asociación Monserrate de composición Troporthents líticos de baja profundidad con afloramientos rocosos. En las zonas de menor pendiente sobre arcillolita se encuentra el suelo Cabrera, correspondiente a un Dystrudept (Cortés, 1976).

ESCALA ESPACIO-TEMPORAL

En la quebrada se seleccionaron tres sitios cada uno de 13 m (distancia escogida debido a la heterogeneidad de los segmentos a esta distancia, con la presencia de tres rápidos y tres remansos), los cuales presentaron diferencias de acuerdo a la presencia de zonas de rápidos y remansos, tratando de resumir la heterogeneidad geomorfológica que le brinda identidad física al lugar de estudio (sensu Frissell *et al.*, 1986). Se realizaron cuatro experimentos entre abril y agosto de 2005, los cuales consistieron en simulaciones desarrolladas en campo para evaluar el porcentaje de retención de tres fracciones de MOPG. El primer muestreo se realizó el 9 de abril (M1), el segundo el 27 de abril (M2), el tercero el 28 de julio (M3) y el cuarto el 8 de agosto (Fig. 1), abarcando un período de aguas altas y otro de aguas bajas.

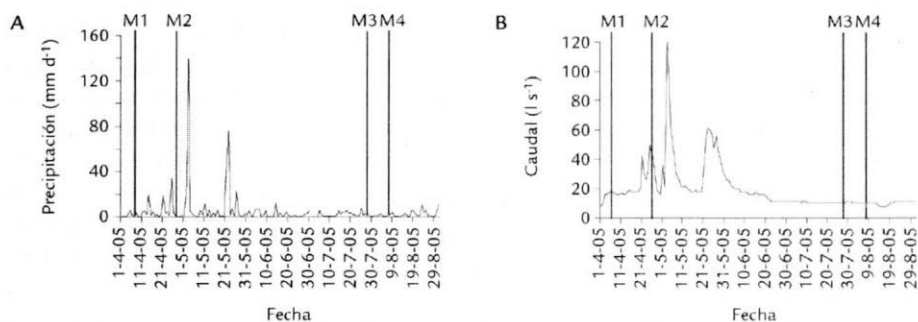


Figura 1A. Precipitación diaria y fechas de muestreo (M1=muestreo 1, M2=muestreo 2, etc.). B. Caudal diario y fechas de muestreo en la quebrada La Vieja. Fuente: acueducto de Bogotá, 2006.

PRECIPITACIÓN Y CAUDALES

Aunque los datos de precipitación y caudal se registraron con una resolución diaria, se hará referencia a los valores de la intensidad de la precipitación y del caudal promedio para los 10 días anteriores a las fechas de muestreo, debido a que en cuencas pequeñas como la quebrada La Vieja se presentan pocos eventos de máxima precipitación, los incrementos del caudal obedecen más a la saturación del suelo de la cuenca por efecto de precipitaciones acumuladas en días anteriores, que a un solo evento de precipitación (La Rotta comunicación personal). Los datos arrojados por el limnógrafo ubicado en la quebrada La Vieja, mostraron que los valores de precipitación previos al muestreo 1 (M1) correspondieron a un período de baja precipitación, manifestándose un caudal promedio bajo (C1) de $12,5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. M-2 representó un período de aguas altas, con una precipitación promedio baja, sin embargo un día antes de este muestreo se registró una precipitación de $34,1 \text{ mm}$ que correspondió a un valor alto del caudal (C2), el cual presentó promedio para los diez días previos de $27 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. M3 y M4 correspondieron al período de aguas bajas (C1). Los valores de precipitación durante M3 y M4 no superaron los $9,85 \text{ mm d}^{-1}$ con un caudal promedio de $10,12 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fig. 1A y B).

FRACCIONES DE MOPG

En el presente estudio se consideró como MOPG aquella fracción de MOP con diámetro mayor a $1.000 \mu\text{m}$ de acuerdo a los procedimientos planteados por Vannote *et al.* (1980) y Minshall *et al.* (1982). Para el desarrollo de las simulaciones de retención, se determinaron los tamaños representativos de MOPG que son movilizados durante un ciclo de 24 h (correspondientes a la hojarasca), para lo cual se realizó la captura de esta fracción durante un período de una semana siguiendo los procedimientos descritos por Hauer y Lamberti (1996). En el laboratorio se realizó el tratamiento de la hojarasca colectada, pasando la muestra a través de diferentes tamices de porosidades entre 1 mm y 10 cm. Cada fracción fue almacenada determinando su composición como tipo de hoja dominante, fragmentos de hojas y trozos de palos. Posteriormente se cuantificó el peso seco a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ para determinar la representatividad de las fracciones en términos de porcentajes. Finalmente, se pudo escoger tres fracciones representativas en el transporte de la MOPG. La fracción más fina de la MOPG fue de un tamaño entre 1 y 3 mm (MF), la segunda fracción estuvo entre 5-10 mm (MG) y

la tercera fracción fue representada por las hojas de árboles de eucalipto (*Eucalyptus globulus*; H), debido a que fue la especie dominante en la deriva. La simulación de las fracciones MF y MG se desarrolló utilizando porciones de virutas o desechos de carpintería previamente seleccionadas por tamaño y teñidas con colorante, para poder diferenciarlas del resto de la MOPG que era recolectada por la red de captura en el momento de realizar las simulaciones de retención en la quebrada. Un día antes del ensayo, se colocaban las fracciones en remojo para evitar que estas flotaran, de acuerdo a lo planteado por Hauer y Lamberte (1996).

SIMULACIONES DE RETENCIÓN

El ensayo consistió en liberar las fracciones de MOPG (con un peso conocido de 50 g y tres réplicas por simulación), a una distancia conocida (3 y 10 m) en tres tramos de la quebrada. Al final de cada tramo fue ubicada una red para la captura del material que no era retenido (Fig. 2). El tiempo de exposición de la trampa fue estimado de manera cualitativa (3m=10 minutos, 10m=20 minutos) de acuerdo a observaciones previas, en las que se logró estimar el tiempo necesario para que una cantidad representativa de MOPG fuera retenida en el lecho.

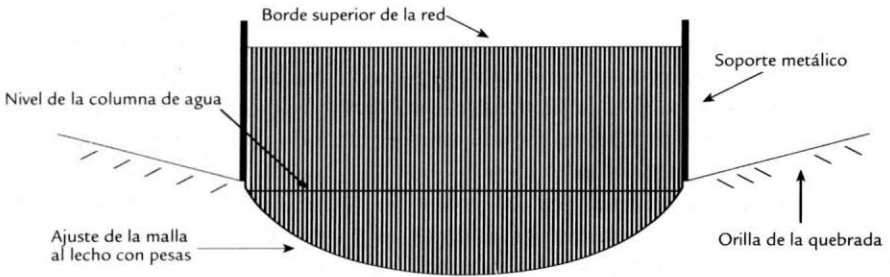


Figura 2. Montaje de la red para captura de las fracciones de MOPG con ojo de malla de 1.000 μm aproximadamente. Vista en una sección transversal de la quebrada.

La fracción transportada y que fue capturada por la trampa fue almacenada, separada de acuerdo a su color (marca en el caso de las hojas), luego fue secada y pesada en el laboratorio. Los valores de caudal se obtuvieron de la estación hidrométrica del acueducto de Bogotá ubicada en la quebrada La Vieja. Finalmente la retención fue estimada en términos de porcentaje, por la diferencia entre el peso seco inicial liberado y el peso seco de la fracción que no fue retenida en el tramo.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Previo al desarrollo de las pruebas estadísticas, se probaron los supuestos de aleatoriedad de residuos (prueba de corridas arriba y debajo de la mediana), homogeneidad de varianza (prueba de Bartlett) y normalidad (bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov=K-S), mostrando un comportamiento aleatorio de las variables, pero, los supuestos de normalidad y homogeneidad resultaron no ser cumplidos en la gran mayoría de los casos, por lo que todo el análisis estadístico fue hecho con base en pruebas no paramétricas. La prueba Kruskal-Wallis (K-W), fue utilizada para buscar diferencias entre la variable porcentaje de retención de MOPG y los factores: fracción de

MOPG (MF, MG y H) y el valor promedio de caudal dominante para cada muestreo. Finalmente, se empleó la prueba de rangos de Spearman (r_s) para evaluar el grado de asociación entre la variable retención de MOPG y los factores mencionados anteriormente. El paquete estadístico utilizado fue el Statgraphics versión 4.0.

RESULTADOS

PATRONES TEMPORALES

En términos generales se presentó un régimen de caudal constante, con bajos valores de intensidad y solo la presencia de eventos puntuales de máxima precipitación se traducen en incrementos significativos de la descarga en la quebrada La Vieja (Fig. 1). El período de alto caudal se presentó durante M2 con un valor promedio de $27 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ y un período mucho más largo correspondiente al bajo caudal (M1, M3 y M4) con un valor promedio de $12 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ estadísticamente diferente a la fase de alto caudal ($K-S=1,95$, $p < 0,001$).

DISTANCIA ESCOGIDA PARA EL ANÁLISIS

El estudio se realizó tratando de evaluar el porcentaje de retención de MOPG a dos distancias que correspondieron a 3 y 10 m. Se decidió escoger el promedio entre las dos distancias debido a que ambas presentan un comportamiento similar (alta variabilidad) con una tendencia hacia altos valores del porcentaje de retención (Fig. 3). De esta forma se resumió la información (36 datos durante los cuatro muestreos) en cuanto al factor distancia (6,5 m), reduciendo con ello la redundancia de los datos de dos factores o distancias a un solo factor, sin perder información y confiabilidad de los resultados.

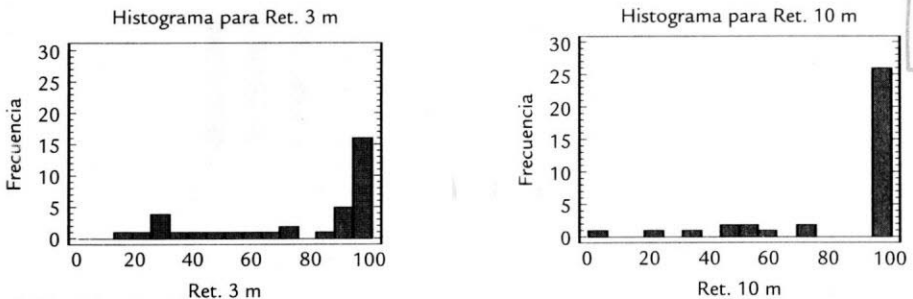


Figura 3. Porcentaje de retención de MOPG para 3 y 10 m para un total de 36 simulaciones. Se muestra un patrón similar en la distribución de los datos para las dos distancias, con alta variabilidad en los datos y una tasa de retención cercana al 100%.

RETENCIÓN DE LAS FRACCIONES DE MOG

El porcentaje de retención de MOPG para los tramos de estudio, mostró una relación negativa con la intensidad del caudal ($r_s=-0,75$, $p < 0,001$, $n=36$). En tal sentido se observa que durante M2 fue transportada la mayor cantidad de MOPG, a diferencia del resto de muestreos en donde casi la totalidad de la materia fue retenida en el lecho y el transporte de fracciones gruesas fue muy bajo (Tabla 1).

	Muestreo			
	M1	M2	M3	M4
% Ret. Prom.	95,27	42,82	84,82	95,59
Caudal Prom. l.s ¹	16,6	37	10	19
Categoría del Caudal	C1	C2	C1	C1

Tabla 1. Porcentaje de retención y valores de caudal promedio para cada muestreo (M1=muestreo 1, M2=muestreo 2, etc.; C1=caudal bajo, C2=caudal medio, C3=caudal alto).

Se presentó una tendencia al incremento en la retención de MOPG con relación a bajos caudales (K-W=7,23, $p=0,007$, $n=12$), la dispersión en los datos fue muy baja, lo cual indica que las réplicas tomadas presentaron un comportamiento similar sin valores extremos o atípicos (Fig. 4). Se demuestra una tendencia leve en M2 al incremento en el porcentaje de retención en relación con el tamaño de las fracciones. El porcentaje promedio de retención para las fracciones MF, MG y H en los tres tramos de estudios fue de 77,9 ($\pm 22,3$), 79,4 ($\pm 22,9$) y 81,6 ($\pm 20,5$) respectivamente. De acuerdo con lo anterior, las pérdidas por transporte de MOPG fueron muy bajas. El porcentaje promedio de retención de MF durante el período de bajo caudal fue de 93,8 ($\pm 7,2$) y 30,2 ($\pm 13,5$) para el período de alto caudal. El porcentaje promedio de retención para la fracción MG en el período de bajo caudal fue de 90,1 ($\pm 10,3$) y 47,4 ($\pm 6,8$) para caudales altos. De igual manera, el porcentaje promedio de retención de H durante el período de bajo caudal fue de 91,8 ($\pm 1,1$) y 50,9 ($\pm 6,4$) para caudales altos. Independiente del tamaño de la fracción, se observó que durante la época seca representada por bajos caudales, la MOPG fue retenida en el lecho, casi en su totalidad, en cambio para la época lluviosa, la fracción fina (F) fue poco retenida en comparación con el resto de fracciones (Tabla2).

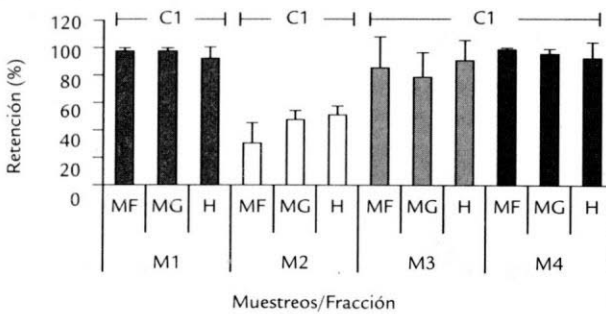


Figura 4. Porcentaje de retención de las diferentes fracciones de MOPG con relación a las intensidades del caudal. F=fracción fina, G=Fracción gruesa, H=Hojas. Las barras representan la magnitud promedio del % de retención y las líneas acotadas 1 desviación estándar. (M1=muestreo 1, M2=muestreo 2, etc.), (C1=caudal bajo, C2=caudal medio, C3=caudal alto).

El mayor valor en el porcentaje de retención para la fracción MF fue de 98,9% ($\pm 1,0$) simultáneo a un período con varios meses de sequía (Tabla 2). Para los cuatro muestreos se presentó una variación en la retención de MF y la magnitud del caudal (K-W=6,23, $p=0,01$, $n=12$). La asociación entre esta variable y la descarga fue negativa o inversa demostrando el efecto que presentó el caudal en el transporte masivo de esta fracción ($r_s=-0,74$, $p=0,01$, $n=12$).

La fracción correspondiente a la MG presentó un valor máximo de retención correspondiente a 96,8% ($\pm 2,5$) correspondiente al período inicial de aguas bajas (Tabla 2). Se presentaron diferencias entre el porcentaje de retención de MG y el régimen de caudal dominante para las cuatro campañas desarrolladas ($K-W=7,51$, $p=0,027$, $n=12$). La variable MG mostró una asociación negativa con el caudal correspondiente a los cuatro muestreos aunque de menor magnitud a lo ocurrido con la MF ($r_s=-0,6$, $p<0,02$, $n=12$). Las hojas (H) presentan el mayor valor en su porcentaje de retención, durante M4 el cual fue 92,6 ($\pm 10,1$) ilustrado por un período de bajo caudal (Tabla 2). Además, se demuestra una variación entre esta variable y los caudales correspondientes a cada muestreo ($K-W=6,25$, $p=0,017$, $n=12$). Se presenta también una asociación negativa con el caudal correspondiente a los cuatro muestreos similar a lo que sucede con MG ($r_s=-0,57$, $p<0,02$, $n=12$). De esta manera se demuestra que el porcentaje de retención de MOPG representado en tres fracciones de tamaño, fue afectado por la magnitud del caudal pero de manera negativa.

Muestreo	M1			M2			M3			M4		
Fracción de MOPG	MF	MG	H	MF	MG	H	MF	MG	H	MF	MG	H
Retención %	96,8	96,8	92,2	30,2	47,4	50,9	85,6	78,3	90,6	98,9	95,3	92,6
Caudal	C1			C2			C1			C1		

Tabla 2. Porcentaje de retención para las diferentes fracciones de MOPG en relación a los caudales altos y bajos.

VARIACIÓN DE LA RETENCIÓN ENTRE SITIOS

Debido a la alta heterogeneidad que presenta la quebrada La Vieja, los sitios muestreados fueron muy similares en cuanto a su geomorfología y pendiente, pues todos presentaron zonas de rápidos, remansos y caídas o pequeñas cascadas. Cabe resaltar que durante el período de alto caudal fue difícil diferenciar estas zonas debido a que al incrementar la columna de agua, el régimen de flujo se volvía uniforme y la zona de remansos desaparecía en los tramos muestreados. Esta igualdad en las condiciones geomorfológicas se ve reflejada en los valores del porcentaje de retención, ya que no se presentan diferencias significativas al comparar los tres sitios de muestreo ($K-W=3,13$, $p=0,2$, $n=72$), igual a lo que sucedió con la baja asociación de los valores de retención en los tres sitios ($r_s=-0,21$, $p<0,2$, $n=72$). A pesar de que no se presentaron grandes diferencias en los eventos hidrológicos durante las cuatro campañas de muestreo (Fig. 1), se demuestra que el caudal y su intensidad de flujo presentaron una asociación estadística negativa con el porcentaje de retención de MOPG (de pequeñas cantidades de MOPG que fueron liberadas al cauce de la quebrada en un lapso de tiempo muy corto), con un efecto no selectivo en el tamaño de las fracciones de esta MOPG y de la variación espacial en los diferentes tramos muestreados.

DISCUSIÓN

PATRÓN HIDROCLIMÁTICO

En términos generales, la quebrada La Vieja presentó durante el primer semestre del 2005 un régimen de caudal con valores bajos y estables con solo dos eventos puntua-

les de incremento significativo en la descarga durante el mes de mayo y un incremento de magnitud intermedia a finales de abril correspondiente a M2, brindando identidad a la condición tropical de este sistema (Fig. 1B). Estos sucesos de máximo valor en el caudal que fueron producto de los incrementos en la intensidad de la precipitación (Fig. 1A) y mostraron magnitudes que presentan períodos de retorno superiores a 10 años. Negishi y Richardson (2003) reportan para una quebrada canadiense de segundo orden, en donde la capacidad de retención de estos sistemas se ve afectada cuando existe una fuerza del caudal capaz de modificar la geomorfología de las quebradas debido a la reducción en la heterogeneidad de estos sistemas acuáticos. Cabe resaltar que la quebrada La Vieja presenta un buen estado de conservación con suelos de textura arenosa (IGAC, 2000), recubiertos por un mantillo que almacena materiales y sedimentos (Vargas, 2003), además de una buena cobertura del bosque ripario el cual se encuentra en un proceso de conservación de por lo menos 40 años con una alta heterogeneidad del lecho de la quebrada. De esta manera se observa que los procesos de transporte y retención muestran relación con otras quebradas templadas de condiciones similares (Adams, 1998; Allan, 1995; Muotka y Laasonen, 2002).

RETENCIÓN DE MOG

Los procesos dinámicos que se desarrollan al interior de la quebrada La Vieja como la retención y transporte de MOPG, reflejan las características de una quebrada de montaña bien conservada. En tal sentido se presenta una heterogeneidad a escala de tramo debido a la presencia de zonas de rápidos, remansos y caídas, así como parches de palizadas y rocas emergentes, los cuales se convierten en obstáculos importantes para el transporte de MOPG. Muchos estudios han demostrado que la heterogeneidad de las quebradas y su patrón hidroclimático son los principales factores que intervienen en el transporte y retención de la MOP (Webster *et al.*, 1987; Allan, 1995; Adams, 1998, Horvat, 2003). La fuerza del caudal generó energía suficiente para la movilización de la MOPG. Períodos de sequía como los que se presentaron en este estudio y que dominaron sobre períodos de lluvia, mostraron que la fuerza del caudal movilizó menos del 10% de la MOP que fue liberada. Durante períodos de lluvia pudo mobilizarse un poco más del 50% de la MOPG en sus tres categorías de tamaño, lo cual sigue siendo una baja cantidad en comparación a la fracción retenida en el lecho de esta quebrada. Shannon *et al.*, (1996) encontraron que cerca del 50% de la deriva orgánica, representada por macrófitas e insectos acuáticos, era retenida en el lecho de las quebradas, demostrando una relación positiva entre la masa de estos organismos y el ancho de canal. De igual forma encontraron una relación positiva entre la cantidad de detritos transportada en deriva y la descarga del canal. Power (1990) reporta para ríos de California, que altas densidades de detritos orgánicos en deriva son controladas por la presencia de rápidos y remansos; además menciona que el transporte y retención de MOPG aportan un enlace importante en la ecología trófica de ríos pequeños, pero en ríos grandes con alta turbulencia, promueven a la reducción de este transporte. Un aspecto relevante que pudo observarse es la pérdida de energía de movilización que sufre la MOPG luego de que ésta pasa por una caída o cascada, ya que mucha de la materia queda almacenada en los estanques que se forman por la caída de agua en estas cascadas pequeñas. Negishi y Richardson (2003) resaltan la impor-

tancia de estas zonas, como elementos de la heterogeneidad de las quebradas, las cuales cumplen un papel importante para la diversidad y productividad de las redes alimenticias por asociación positiva con la energía de retención y almacenamiento de MOP. La quebrada La Vieja se caracteriza por presentar un lecho rocoso en mayor proporción a otros sustratos como arenas y sedimentos finos. Esta condición, en asocio con una pendiente inclinada, promueve un incremento en el flujo en la columna de agua con una dominancia de zonas de rápidos en comparación con los remansos. Con base en lo anterior se demuestra la relevancia de los sustratos emergentes compuestos por rocas y parches de palizadas en la formación de obstáculos y generación de remansos, ya que sin ellos la retención de MOPG sería muy baja. El incremento de remansos por la introducción de cantos de rocas y palizadas es relevante debido a que con ellos se reduce la velocidad del agua, se contribuye al incremento en la heterogeneidad de estos sistemas y el aumento en la tasa de retención de MOP (Crispin *et al.*, 1993; Wallace *et al.*, 1995; Hilderbrand *et al.*, 1997). Hilderbrand *et al.* (1997) hallaron que el incremento de trozos de madera y palizadas en el lecho de las quebradas, incrementa el área representada por remansos, modificando de esta forma la estructura del hábitat en quebradas caracterizadas por sustratos rocosos emergentes. La retención de MOPG muestra una importancia vital en estos lugares en los que la productividad primaria se encuentra limitada por la penetración de luz. Vannote *et al.* (1980) y Cummins *et al.* (1989) mencionan que en las quebradas de cabecera, la entrada de MOPG procedente de la vegetación riparia se convierte en la mayor fuente de energía para las comunidades riparias. La entrada de detritos alóctonos se convierte en un factor limitante para la productividad de las comunidades de macroinvertebrados (Richardson, 1991; Wallace *et al.*, 1999). En este sentido, la eficiencia en la retención y almacenamiento de MOPG es importante para el mantenimiento de la diversidad y productividad de las comunidades autótrofas y heterótrofas así como en la estabilidad de otros procesos físicos y dinámicos que reflejan el estado de conservación de estas quebradas.

FRACCIONES DE MOPG

La retención de MOPG representada en sus fracciones fina, gruesa y hojas, fue afectada negativamente por el caudal de la quebrada, lo cual demuestra que se presenta un efecto no selectivo de la descarga para movilizar diferentes partículas de MOPG. A pesar de lo anterior, las partículas más finas correspondientes a la MF fueron movilizadas en mayor proporción, seguidas por MG y finalmente la H. Larned (2000) registra para quebradas de zonas templadas que la fragmentación de la MOPG a partículas más finas permite su movilización principalmente durante períodos de lluvia, ya que estas partículas presentan una menor densidad y área, lo cual facilita su movilización aguas abajo. Este autor comenta que la densidad de macroinvertebrados trozadores residentes y esporádicos es un indicador del porcentaje de fragmentación y la disponibilidad de recursos en forma de MOPG. En campo se pudo observar que las fracciones de mayor tamaño como la MG y en especial la fracción H, eran más vulnerables a ser retenidas en comparación a la MF, debido a que las primeras presentan una mayor superficie expuesta a ser obstaculizada por la heterogeneidad física de la quebrada. Allan (1995) y Wallace *et al.* (1996) demostraron que la MOPG representada por paquetes

de hojarasca, es movilizada episódicamente por el efecto de tormentas, alternando etapas de almacenamiento y erosión. De esta forma, solo un lapso muy corto del ciclo anual en donde se presenta una alta descarga, puede generar el transporte masivo de esta categoría de MOPG. Las partículas más finas podrán mobilizarse río abajo con mayor frecuencia en conjunto con las moléculas de agua y su almacenamiento puede ocurrir en el sedimento del lecho o en la zona hiporreica. De acuerdo a lo anterior se observa que en una quebrada tropical como La Vieja, las partículas finas de MOPG dominan la deriva aguas abajo y las fracciones gruesas de MOPG dominan en su aporte alóctono a la cosecha de la quebrada por su retención y almacenamiento en el lecho. Esto puede ser comparado cualitativamente con las predicciones de la teoría del continuo de un río desarrollada por Vannote *et al.*, (1980), quienes resaltan la relevancia de la MOPG que entra y es almacenada en el lecho de las quebradas, debido a su aporte energético para los grupos funcionales de macroinvertebrados acuáticos y las comunidades de microorganismos autótrofos y heterótrofos. Este tipo de información es importante para el desarrollo de aproximaciones en cuanto al flujo y dinámica de MOP interior de quebradas de montaña (Allan, 1995).

VARIACIONES ENTRE SITIOS

En la quebrada La Vieja no fue posible encontrar muchas diferencias entre los tramos o sitios muestreados, debido a que todo el sector presenta un nivel de heterogeneidad constante o a que la variación espacial no genera una respuesta diferencial con el régimen de caudal dominante para cada período estudiado. Esto fue reflejado en los valores obtenidos del porcentaje de retención de MOPG, ya que no hubo diferencias marcadas entre sitios (Tabla 3). Otros estudios han demostrado que a escala de cuenca se presenta una variación en el porcentaje de retención para diferentes formas de la MOP y el régimen del caudal (Shannon *et al.*, 1996).

Muestreo	M1			M2			M3			M4		
Sitio	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
% Ret.	91,6	95,4	98,9	38,9	46,7	44,2	77,2	99,9	86,0	90,2	99,1	97,5
± ES	7,3	0,7	1,4	8,2	8,1	8,4	18,8	14,1	20,4	9,5	1,0	2,7

Tabla 3. Porcentaje de retención de MOP para los tres sitios de muestreo durante el período de estudio. S1=sitio 1, S2=sitio 2, S3=sitio 3.

Sería importante desarrollar trabajos de este estilo explorando otras escalas espacio temporales para saber hasta qué punto la heterogeneidad de estos sistemas juegan un papel relevante en la retención y almacenamiento de MOPG, analizando de esta manera, la respuesta de las comunidades de organismos acuáticos ante estos procesos y su adaptación a cambios cíclicos en la oferta de este recurso energético y eventos hidroclimáticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Invertebrados Acuáticos de la Universidad Nacional de Colombia y a todos sus miembros, por su apoyo en el desarrollo exitoso

del presente trabajo tanto en la fase de campo como en la de laboratorio y el procesamiento de datos. Agradecimientos a la Empresa de Acueducto de Bogotá por facilitarnos el acceso a la quebrada La Vieja y los datos de precipitación y caudales diarios.

BIBLIOGRAFÍA

ADAMS JC. The Role of Leaf Litter and Small Wood in the Retention of Fine Particles During Storms in an Appalachian Headwater Stream [tesis de maestría]. Polytechnic Institute and State University. Virginia-USA; 1998.

ALLAN JD. Stream Ecology, Estructure and Funtion of Running Waters. Editorial Chatman y Hall; 1995.

CORTÉS LA. Los suelos de la Sabana de Bogotá y sus alrededores, Subdirección Agrológica Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá; 1976.

CRISPIN V, HOUSE R, ROBERTS D. Changes in Instream Habitat, Large Woody Debris, and Salmon Habitat After the Restructuring of a Coastal Oregon Stream. *N Am J Fish Manag.* 1993;13:96-102.

CUMMINS KW, WILZBACH MA, GATES DM, PERRY JB, TALIAFERRO WB. Shredders and Riparian Vegetation. *Bio-Science.* 1989;39:24-30.

FRISSELL CA, LISS WJ, WARREN CE, HURLEY MD. A Hierarchical Framework for Stream Classification: Viewing Streams in a Watershed Context. *Env Manage.* 1986;10:199-214.

GUTIÉRREZ JD. Caracterización del metabolismo y de la oferta de recursos de materia orgánica para la fauna de macroinvertebrados bentónicos en una quebrada de montaña de orden menor [tesis de Doctorado]. Bogotá: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia; 2006.

HAUER FR, LAMBERTI GA. *Methods in Stream Ecology.* Academy Press.; 1996.

HILDERBRAND RH, LEMLY AD, DOLLOFF CA, HARPSTER KL. Effects of Large Woody Debris Placement on Stream Channels and Benthic Macroinvertebrates. *Can J Fish Aquat Sci.* 1997;54:931-939.

HILDREW AG, DOBSON MK, GROOM YA. Flow and Retention in the Ecology of Stream Invertebrates. *Verh Internat Verein Limnol.* 1987;24:1742-1747.

HORVAT TG. Retention of Particulate Matter by Macrophytes in a First-Order Stream. *Aquat Bot.* 2003;78:27-36

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Estudio general de clasificación de los suelos de la cuenca alta del río Bogotá para fines agrícolas. Vol IV No. 1. Departamento Agrológico. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá; 2000.

KOETSIER P, MCARTHUR JV. Organic Matter Retention by Macrophyte Beds in 2 Southern USA, Low-Gradient, Headwater Streams. *J North Am Benthol Soc.* 2000;19:633-647.

MEYER JL. Can P/R Ratios be Used to Assess the Food Base of Stream Ecosystems? A Coment on Rosefeld and Mackay (1987). *Oikos.* 1989;59:119-121.

MINSHALL GW, BROCK JT, LAPOINT TW. Characterization and Dynamics of Benthic Organic Matter and Invertebrate Functional Feeding Group Relationships in the Upper Salmon River, Idaho (USA). *Int Rev Ges Hydrobiol.* 1982;67:793-820.

MUOTKA T, LAASONEN P. Ecosystem Recovery in Restored Headwater Streams: The Role of Enhanced Leaf Retention. *J Appl Ecol.* 2002;39:145-156.

MULHOLLAND PJ, WATTS JA. Transport of Organic Carbon to the Oceans by the Rivers of North America: A Synthesis of Existing Data. *Tellus*. 1982;34:176-186.

NAIMAN RJ. Characteristics of Sediment and Organic Carbon Export from Pristine Boreal Forest Watersheds. *Can J Fish Aquat Sci*. 1982;39:1699-1718.

NEGISHI JN, RICHARDSON JS. Responses of Organic Matter and Macroinvertebrates to Placements of Boulder Clusters in a Small Stream of Southwestern British Columbia, Canada. *Can J Fish Aquat Sci*. 2003;60:247-258.

POWER ME. Benthic Turfs vs. Floating Mats of Algae in River Food Webs. *Oikos*. 1990;58:67-79.

RICHARDSON JS. Seasonal Food Limitation of Detritivores in a Montane Stream: An Experimental Test. *Ecology*. 1991;72:873-887.

SHANNON JP, BLINN DW, BENENATI PL, WILSON KP. Organic Drift in a Regulated Desert River. *Can J Fish Aquat Sci*. 1996;53:1360-1369.

SMOCK LA, MELTZER GM, GLADDEN JE. Role of Debris Dams in the Structure and Functioning of Low-Gradient Headwater Streams. *Ecology*. 1989;70:764-775.

VANNOTE RL, MINSHALL GW, CUMMINS KW, SEDELL JR, CUSHING CE. The River Continuum Concept. *Can J Fish Aquat Sci*. 1980;37:130-137.

VARGAS JP. Análisis de un bosque Altoandino con énfasis en la precipitación del mantillo: quebrada La Vieja, Bogotá Colombia [trabajo de grado]. Bogotá: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia; 2003.

WALLACE JB, WEBSTER JR, MEYER JL. Influence of Log Additions on Physical and Biotic Characteristics of a Mountain Stream. *Can J Fish Aquat Sci*. 1995;52:2120-2137.

WALLACE JB, GRUBAUGH JW, WHILES MR. Biotic Indices and Stream Ecosystem Processes: Results from an Experimental Study. *Ecol Appl*. 1996;6:140-151.

WEBSTER JR, BENFIELD EF. Vascular Plant Breakdown in Freshwater Ecosystems. *Ann Rev Ecol Syst*. 1986;17:567-594.

WEBSTER JR, BENFIELD EF, GOLLADAY SW, HILL BH, HORNICK LE, KAZMIERCZAK RF, PERRY WE. Experimental Studies of Physical Factors Affecting Seston Transport in Streams. *Limnol Ocean*. 1987;32:848±863.

WEBSTER JR, BENFIELD EF, EHRMAN TP, SCHAEFFER MA, TANK JL, HUTCHENS JJ, D'ANGELO DJ. What Happens to Allochthonous Material that Falls Into Streams? A Synthesis of New and Published Information from Coweeta. *Fresh Biol*. 1999;41:687-705.