

Controles en la composición de arenas fluviales en la zona proximal de una Cuenca de Antepais Tropical (Colombia)

Controls on the composition of fluvial sands in the proximal area of a Tropical Foreland Basin (Colombia)

Ricardo Amorcho P., Germán Bayona & Andrés Reyes-Harker

Universidad Industrial de Santander, Calle 9 - carrera 27, amorcho.ricardo@gmail.com

Corporación Geológica ARES, calle 44A N 53-96, gbayona@cgares.org

ECOPETROL S.A., kilómetro 7 vía Piedecuesta, andres.reyes@ecopetrol.com.co

Ricardo Amorcho P., Germán Bayona & Andrés Reyes-Harker (2011): Controles en la composición de Arenas Fluviales en la zona proximal de una Cuenca de Antepais Tropical (Colombia). GEOLOGÍA COLOMBIANA, Edición Especial, 36 No. 1, pp 163-178

Manuscrito recibido: 10 de julio 2011; aceptado: 16 de agosto 2011

Resumen

Las arenas fluviales del sector proximal de la cuenca de antepais de los Llanos proceden del flanco oriental de la Cordillera Oriental; al sur de la Cordillera están expuestas rocas metamórficas del Macizo de Quetame, mientras en la parte central y norte de la Cordillera afloran únicamente rocas de cobertura cretácica-paleógena. Un total de 30 muestras de arena media en barras laterales fueron tomadas en dos afluentes con rocas metamórficas en la fuente y en dos afluentes con rocas sedimentarias. Los resultados de composición indican: a) en los afluentes con área fuente metamórfica, la composición litoarenita ($Q_t = 76,4$ y $49,7\%$) se mantiene por más de 40-60 Km de transporte desde el área fuente; (b) en las arenas procedentes de fuente sedimentaria, la composición es litoarenitas ($Q_t = 73$ y 82%) los primeros 25-45 Km de transporte, y se mantiene como sublitoarenitas ($Q_t = 75$ y 86%) por más de 100 - 250 Km de transporte adicional. La mayor durabilidad de los fragmentos líticos inestables en los afluentes en el sur se explica por un transporte rápido en ríos rectos y en zonas de alta precipitación (2.000-3.000 mm/año), por lo tanto la erosión es limitada por la meteorización. En contraste, los sedimentos procedentes de rocas sedimentarias al norte son transportados por ríos meandriformes y en zonas de más baja precipitación (1.000-3.000 mm/año); por consiguiente, las barras de arenas permanecen por periodos prolongados de tiempo en acumulaciones temporales, generando un importante aumento en el contenido de granos más estables. En los afluentes del norte la erosión es limitada por el transporte. Tanto al norte como en el sur, el contenido inicial de fragmentos de roca inestables es dependiente de la composición y del área expuesta de cada formación. El análisis granulométrico indica que las arenas procedentes de áreas fuente con rocas metamórficas tienen un exceso en contenido de granos de arena gruesa en comparación con las arenas procedentes de sectores fuente con rocas sedimentarias.

Palabras Clave: Cordillera Oriental, Composición de arenas, río Meta.

Abstract

The fluvial sands in the proximal Llanos foreland basin are supplied from the eastern flank of the Eastern Cordillera, where to the south are exposed dominantly metamorphic rocks of the Massif Quetame, while

in the central and northern segments of the eastern flank Cretaceous-Paleogene sedimentary rocks are exposed. A total of 30 medium-grained lateral bar sands were taken in two tributaries with metamorphic rocks and two tributaries with sedimentary rocks. The results of sand composition indicate that: a) in the tributaries sourced from metamorphic rocks in the south, the litharenite composition ($Q_t = 76,4$ and $49,7\%$) dominates for more than 40-60 km of transport; (b) in the rivers sourced from sedimentary rocks in the north, the litharenite composition ($Q_t = 73$ y 82%) dominates in the first 25-45 km of transport, whereas sublitharenite composition keeps for more than 100-250 Km. Survival of unstable rock fragments in southward straight rivers is due to rapid transport and high rainfall rates (2.000-3.000 mm/yr), so the erosion is limited by weathering. In contrast, northern meandering rivers are in areas with lower rainfall (1.000-3.000 mm/year) rates than southern rivers, therefore long periods of exposure of sand bars result in a significant increase in content of stable grains. In northern rivers, the erosion is limited by transport. In both areas, the initial content of unstable rocks fragments depends on the composition and the dimension of each formation. The sieve analysis shows that the sands from metamorphic source areas have an excess content of coarse sand grains compared with the sands from source areas with sedimentary rocks.

Key Words: Cordillera Oriental, Sand composition, Meta River.

INTRODUCCIÓN

La composición de la roca fuente, el clima, el relieve, la pendiente, la vegetación y la dinámica de los ambientes fluviales son factores que tienen un importante papel en el control de la composición de las arenas fluviales modernas (Basu 1985; Suttner and Dutta 1986; Grantham and Velbel 1988). En el norte de Sudamérica se han realizado varios trabajos sobre procedencia de arenas en los sistemas fluviales actuales, y la mayoría se han concentrado en los sistemas fluviales de los Ríos Amazonas y Orinoco (Johnsson and Stallard 1989; Johnsson and Meade 1990; Johnsson et al. 1991; Meade 2007). Estos trabajos a nivel regional muestran de forma general como los depósitos de arenas bajo ciertas características climáticas y geológicas bien conocidas ganan madurez composicional. Sin embargo, no se han estimado las variables en zonas proximales a las áreas fuente del orógeno como son: variación de composición de áreas fuente, morfología de ríos, variaciones climáticas y tamaño del área de drenaje, entre otros.

El piedemonte oriental de la Cordillera Oriental de Colombia presenta cambios a lo largo de su rumbo en la composición de la roca aflorante, en el ángulo de las pendientes, el clima y en las dimensiones de las áreas de drenajes de los afluentes (Figura 1). Estas condiciones son favorables para evaluar como cada uno de estos parámetros afecta en la composición de las arenas fluviales de granulometría media. Cuatro drenajes

han sido seleccionados para establecer: (1) evaluar la correlación entre la composición de las arenas fluviales y la composición de una área fuente conocida, y (2) evaluar las posibles causas del cambio composicional en los depósitos de arena en el sector proximal de la cuenca de antepaís de los Llanos Orientales.

Los resultados de este trabajo pueden compararse con otros resultados de trabajos en cuencas de antepaís desarrolladas en condiciones climáticas tropicales. En esta región muy pocos trabajos se han realizado a pequeña escala, lo que dificulta la identificación de los posibles cambios que pueden suceder en los afluentes y que posteriormente afectarán la composición de grandes sistemas fluviales como el del río Orinoco (Johnsson et al. 1991).

ÁREA DE ESTUDIO Y MARCO GEOLÓGICO

La elección de los cuatro afluentes se hizo con base en la identificación de las siguientes cuatro variables: a) composición del área fuente; b) dimensión del área de drenaje; c) geomorfología del cauce de los ríos relacionado con los cambios de pendiente en el relieve; d) variaciones en parámetros climáticos (precipitación) en el sector proximal de la cuenca de los Llanos. Estos parámetros serán considerados para determinar la variación composicional de las arenas fluviales con respecto a su distancia de transporte. El orden en que

se nombran estas variables no refleja la intensidad ni duración en los depósitos fluviales, pero si permite reconocer variables constantes en un contexto geológico (Suttner and Dutta 1986).

Los ríos seleccionados son de sur a norte, Humadea, Guayuriba, Cusiana y Ariporo. Estos ríos se pueden agrupar en dos regiones de acuerdo con las rocas que afloran en las áreas de drenaje (Figura 1b). La región A, hacia el suroccidente del piedemonte, es fuente de sedimentos para los ríos Humadea y Guayuriba, y se caracteriza por tener afloramientos de rocas paleozoicas metamórficas de bajo grado como esquistos muscovíticos, filitas y cuarcitas pertenecientes al Grupo Quetame, y rocas metasedimentarias y sedimentarias como metareniscas, metalimolitas y limolitas de la Formación Farallones (Pulido y Gómez 2001; López 2004) (Figura 2). En este sector también afloran rocas sedimentarias del Cretácico, las cuales dominan en la región B. El área de drenaje en el sector fuente para el río Humadea es de 40 Km² y en el río Guayuriba es de 2.543 Km² aproximadamente. En los dos afluentes el régimen de lluvias es >2.000 mm/año, la zona fuente de sedimentos tiene un régimen de precipitación similar para los cuatro afluentes (>3.000 mm/año) y la morfología de los canales es recta (Figura 1a).

La región B, hacia el nororiente del piedemonte, es fuente de sedimentos para los ríos Cusiana y Ariporo y afloran únicamente rocas sedimentarias de edad cretácica y terciaria (López 2004; Prada y Quintero 2004). Las unidades cretácicas están constituidas por conglomerados, areniscas, calizas y shales, mientras las unidades cenozoicas consisten de conglomerados, areniscas y lodolitas (López 2004) (Figura 2). El área de drenaje en el Río Cusiana es de 1947 km² y en el río Ariporo es de 800 km² aproximadamente. El régimen de lluvias en la zona de transferencia es entre 2.000 y 1.000 mm/año disminuyendo hacia el nororiente, en la zona fuente de sedimentos tiene un régimen de precipitación similar para los cuatro afluentes (>3.000 mm/año) y la morfología de los canales es principalmente meandriforme (Figura 1a).

El flanco oriental de la Cordillera Oriental de Colombia se caracteriza por tener un sistema cabalgante con vergencia al oriente, y es el límite occidental de la cuenca de antepaís de los Llanos Orientales (Jiménez 2010). Esta cuenca comienza a formarse desde el Cretáceo tardío -

Paleoceno producto de eventos compresivos que tienen su pico máximo en el Plioceno (Parra 2008). A partir de la depositación de la Unidad G6 de la Formación Guayabo (Plioceno) comienza a observarse la influencia de las rocas del flanco oriental de la Cordillera Oriental en la composición de los depósitos de la cuenca, marcando el inicio de un transporte fluvial en dirección oeste- este (Bayona et al. 2008).

METODOLOGÍA

Para cada drenaje se delimitó el sector fuente y se calculó planimétricamente su área (Figura 2). Con la información geológica de cada una de las áreas fuente se identificó los posibles detritos generados durante los procesos de meteorización y erosión que se podrían esperar en la zona de transferencia, que es la zona donde los procesos de transporte tienen mayor influencia sobre la composición de los depósitos (Schumm, 1977; Niño 2004) (Figura 2). Se realizó un muestreo consecutivo a lo largo de cada río, para comparar la variación de la composición a medida que se aumenta la distancia desde al área fuente y disminuye la pendiente. Sin embargo, la ubicación de los sitios de muestreo dependió de la facilidad de acceso a las barras arenosas de los ríos. Se colectaron 30 muestras de arena en los cuatro afluentes, en los sectores donde las barras están mejor expuestas y presentan una granulometría preferencialmente de arena media (Basu 1985) (Figuras 1, a y b). Las 30 muestras de arena recogidas fueron secadas a 80°C y tamizadas con percutor mecánico para separar principalmente las fracciones de arena fina, media y gruesa (intervalos de 1φ). Se calculó para la fracción arena media (1-2φ) los valores de media, varianza, skewness y kurtosis (Tabla 1). Se escogió la fracción arena media (intervalo 1-2φ) de 21 muestras para análisis petrográfico, tomando en cuenta que facilita la comparación con otros trabajos y se normaliza la composición de las arenas fluviales por el tamaño de grano (Basu 1985; Johnsson et al. 1991). Las secciones delgadas fueron teñidas con sodio cobaltinitro para identificación de feldespato potásico y se realizó un conteo de 300 puntos por sección. La abundancia modal se halló utilizando el método de conteo tradicional y la clasificación de los granos se realizó tomando como base la nomenclatura utilizada en el trabajo de Johnsson et al. (1991). Para evitar contar puntos vacíos se tomó como referencia siempre el grano más cercano al retículo ubicado en el cuarto cuadrante.

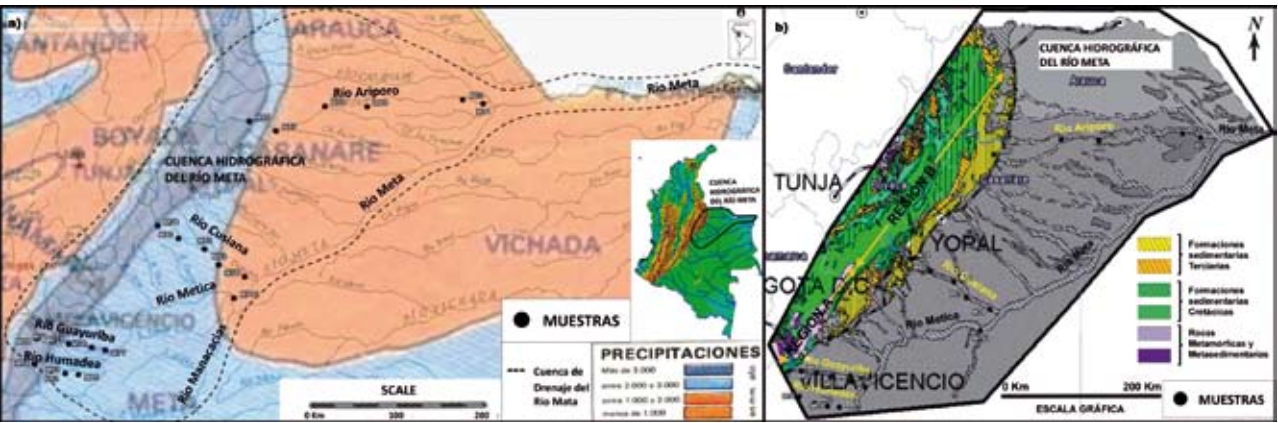


Figura 1. Ubicación muestreo (a), diferentes zonas de pluviosidad (a) y geología (b) de la CHRM. Modificado de IDEAM (2001) y López (2004).

Figure 1. Sampler location (a), different rainfall zones (a) and geology (b) of the CHRM. Modify of IDEAM (2001) and López (2004).

| EDAD | NOMBRE | LITOLOGÍA | FORMACIONES EXPUUESTAS Y QUE APORTAN SEDIMENTOS EN CADA CUENCA (%) | | | |
|--------------------------------|-------------------|-----------|--|---------------|-------------|-------------|
| | | | RIO HUMADEA | RIO GUAYURIBA | RIO CUSIANA | RIO ARIPORE |
| NEÓGENO | Fm. Necesidad | | | | | |
| | Fm. Guayaibo | | | | 25,13 | 33,14 |
| | Fm. León | | | 0,50 | 3,94 | 35,52 |
| | Fm. Carbonera | | 32,08 | 0,37 | 5,02 | 3,06 |
| | Fm. Mirador | | | | 0,58 | |
| | Fm. Cuervos | | | | | 2,56 |
| | Fm. Barco | | | | | |
| CUATRIACENO | G. Guadalupe | | | 6,42 | 1,23 | |
| | Fm. Chilpaque | | | 10,57 | 7,08 | 5,06 |
| | Fm. Une | | | 21,07 | 18,57 | 5,14 |
| | Fm. Pomeque | | | 8,74 | 18,27 | 13,35 |
| | Fm. A. Juntas | | | 5,51 | 5,75 | 2,05 |
| | Fm. L. Macanall | | | 12,54 | 13,33 | |
| | Fm. C. Guavio | | | | | |
| | Fm. B. Buenavista | | | 1,79 | | |
| | Fm. Bata | | | | | |
| | Fm. Parallones | | 11,51 | 18,50 | | |
| PLEISTOCENO | G. Quetame | | 15,31 | 13,79 | | |
| Área Total (Kms ²) | | | 40,13 | 2541,35 | 1947,38 | 800,15 |

Tabla 1. Valores porcentuales de cada una de las formaciones rocosas expuestas en las cuatro áreas fuente. Los valores están normalizados al 100%.

Table 1. Percentage values of each one the exposed rock formations in the four source areas. The values are normalized to 100%.

RESULTADOS

Se identificaron 21 categorías de granos (Tabla 2), los cuales se agrupan en granos monominerálicos y fragmentos de roca (granos poliminerálicos). En la categoría de granos monominerálicos se incluye granos donde más del 95% del grano está constituido por una sola especie mineral. La categoría de fragmento de roca (R) hace referencia a granos poliminerálicos donde cada especie mineral dentro del grano representa menos del 95%. Los resultados modales obtenidos en la petrografía son recalculados siguiendo la metodología propuesta por Folk (1974), y graficados en diagramas ternarios (QtFR, QmQpR y RsRmsRp) donde en cada una de las esquinas se ubica cada categoría a evaluar (Dickinson 1970; Folk, 1974) (Qp incluye chert). Inicialmente se presentan los resultados de las muestras tomadas en afluentes con área fuente de composición metamórfica y seguido los resultados obtenidos en las muestras colectadas en los afluentes con área fuente de composición sedimentaria.

Composición de las muestras de arena con Área Fuente Metamórfica-Sedimentaria

En las muestras de arena de los ríos Humadea y Guayuriba los granos de R reconocidos durante la petrografía son fragmentos de esquistos muscovíticos, filitas, metalimolitas, limolitas con matriz ferruginosa y granos de cuarzo de primer ciclo (Figura 3). Los resultados composicionales obtenidos durante la petrografía muestran dos poblaciones en el campo de las litoarenitas. El contenido de granos de feldespatos es muy escaso, el valor de la media para el río Humadea es del 0,59% y para el río Guayuriba es del 0,92%. Para el río Humadea se realizó petrografía en 4 muestras de arena tomadas en barras laterales. Estas muestras de arena son composicionalmente inmaduras, con una composición media entre litoarenitas a sublitoarenitas (Qt76,37F0,59R23,04; Figura 4a). La población de granos metamórficos es más abundante que la cantidad de granos sedimentarios en los dos afluentes (Rs35,7Rms64,3Rp0,0; Figura 4b). Note también que los fragmentos de roca metamórfica y metasedimentaria no presentan una tendencia a disminuir o aumentar a medida que aumenta la distancia al área fuente (Figura 4b). Se realizó una estimación de la posible producción de fragmentos de roca en relación con la exposición de las formaciones rocosas en el sector fuente (Tabla 3). Para el río Humadea se obtiene una relación aproximada de exposición y producción entre rocas metamórficas y sedimentarias de 2:1, al igual

que la producción de granos de cuarzo monocristalino comparado con el cuarzo policristalino. El porcentaje de rocas metamórficas expuestas en el área fuente para el río Humadea es de 67,9% aproximadamente (Figura 2), y en la muestra M62 el contenido de granos de Rms es de 65,8% aproximadamente. Se calculó una disminución de fragmentos de roca del 3% aproximadamente, para los 50 km que tiene el río Humadea de recorrido desde el piedemonte hasta la confluencia con el río Guayabero (medidos en línea recta). El contenido de fragmentos plutónicos es nulo en los dos ríos.

Del río Guayuriba se eligieron 5 muestras de arena para petrografía, las cuales son litoarenitas (\bar{X} = Qt49,64F0,92R49,45; Figura 4a). En las cuatro muestras más cercanas al área fuente, la composición predominante de los granos de R es metamórfica (Rms) (\bar{X} = Rs47,73Rms52,27Rp0,0; Figura 4b), pero en la muestra más lejana, el contenido de fragmentos sedimentarios (Rs) iguala el contenido de fragmentos metamórficos. Para el Río Guayuriba se calculó una producción inferida de fragmentos metamórficos con respecto a los sedimentarios de 1:2, pero la relación de producción de granos de cuarzo monocristalino y policristalino se mantiene (2:1). En el río Guayuriba el porcentaje de rocas metamórficas expuestas en el área fuente es de 32,4% aproximadamente (Figura 2), y en la muestra M68 el contenido de Rms es de 50,7% aproximadamente. Los granos de R disminuyen en un 5% aproximadamente en los 70 km de longitud que tiene el río Guayuriba, medidos desde el piedemonte hasta su confluencia con el río Metica (en línea recta).

Composición de las muestras de arena con Área Fuente Sedimentaria

La Figura 5 muestra algunos granos de R que se observan en las muestras de arena, como fragmentos de limolitas arcillosas con matriz ferruginosa, limolitas y limolitas ligeramente arenosas con glauconita, también chert y granos de cuarzo de varios ciclos de sedimentación (Figura 2 y Tabla 2). El contenido de feldespatos no representa más del 0,5% de la composición total de las muestras. Del río Cusiana se eligieron 5 muestras de arena para petrografía, las cuales son principalmente litoarenitas (\bar{X} =Qt73F0,41R26,59; Figura 6a). Las muestras presentan una tendencia al aumento en el contenido de granos de Qm a medida que aumenta la distancia al área fuente. Los granos de R son principalmente sedimentarios (Rs) (\bar{X} = Rs95,04Rms4,66Rp0,3; Figura 6b). La porosidad presente

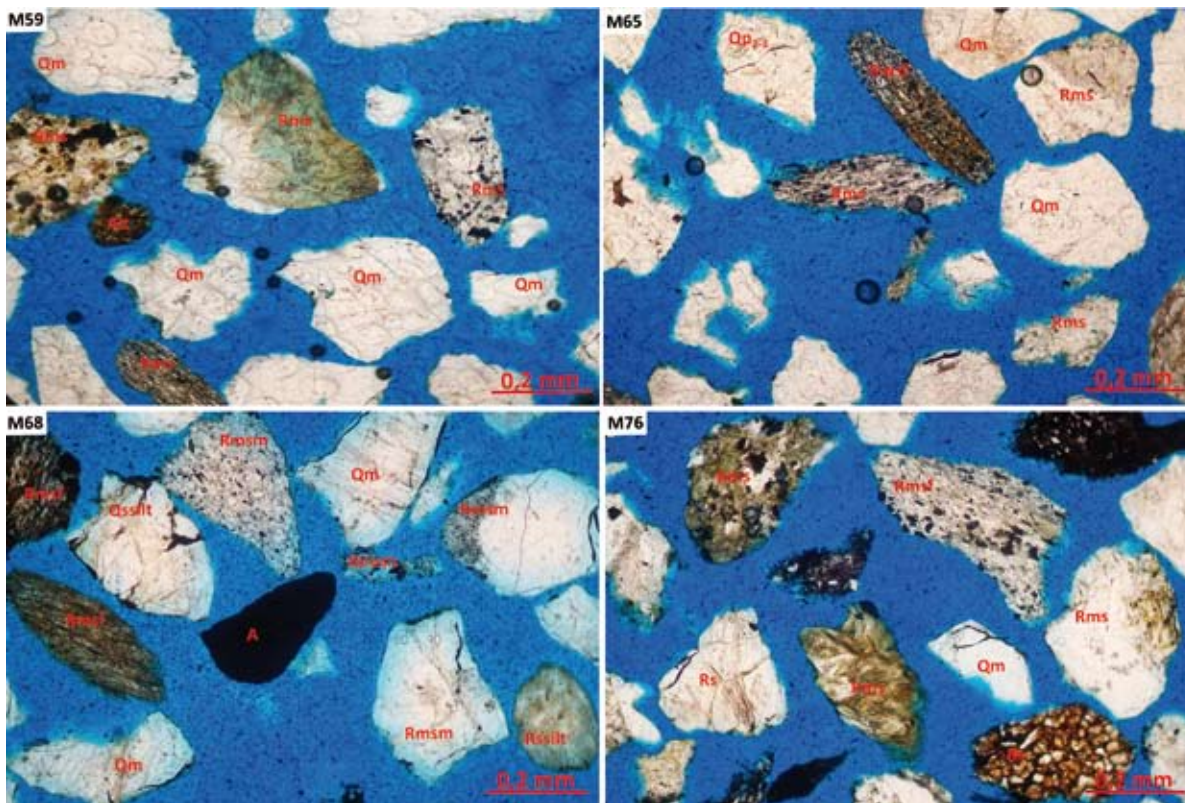


Figura 2. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos en algunas muestras de arena de los ríos Humadea (muestras M59 y M65) y Guayuriba (muestras M68 y M76). Fotografías en nicoles paralelos. Las muestras M59 y M68 son las más cercanas al área fuente y las muestras M65 y M76 las más distales. Convenciones utilizadas en la tabla 4.

Figure 2. Pictures under transmitted light microscope, showing the different categories of grains in some samples of sand from Humadea (M59 and M65 samples), and Guayuriba (M68 and M76 samples) rivers. Photographies parallel nicols. The M59 and M68 samples are closest to the source area and the M65 and M76 samples are the most distal. Conventions used in Table 4.

en los granos de Rs, puede ser producto de la remoción de los granos de glauconita y/o de granos de feldespato. Se realizó una estimación inferida de la producción de granos de R en el área fuente. Como resultado se obtuvo para el río Cusiana una producción inferida de granos de R del 37%, la cual disminuye aproximadamente en un 15% durante el recorrido desde el piedemonte hasta la confluencia con el río Meta (aproximadamente 100 km de transporte medidos en línea recta).

Del río Ariporo se eligieron 6 muestras de arena para petrografía, las cuales se clasifican como sublitoarenitas

(Qt82,14F0,46R17,4; Figura 6a). El valor de Qm en la muestra más cercana al área fuente es de 60,9% y en la muestra más distal aumenta al 77,26%. Los granos de R son principalmente sedimentarios, y el contenido de fragmentos metamórficos es el más bajo ($\bar{X} = Rs97,4Rms2,6Rp0,0$; Figura 6b). No se observa una tendencia marcada en el contenido de granos de R a medida que aumenta la distancia de transporte. La producción inferida de granos de R es del 25,6%, y disminuye en un 12,6% durante el transporte desde el piedemonte hasta la confluencia con el río Casanare (aproximadamente 220 km medidos en línea recta).

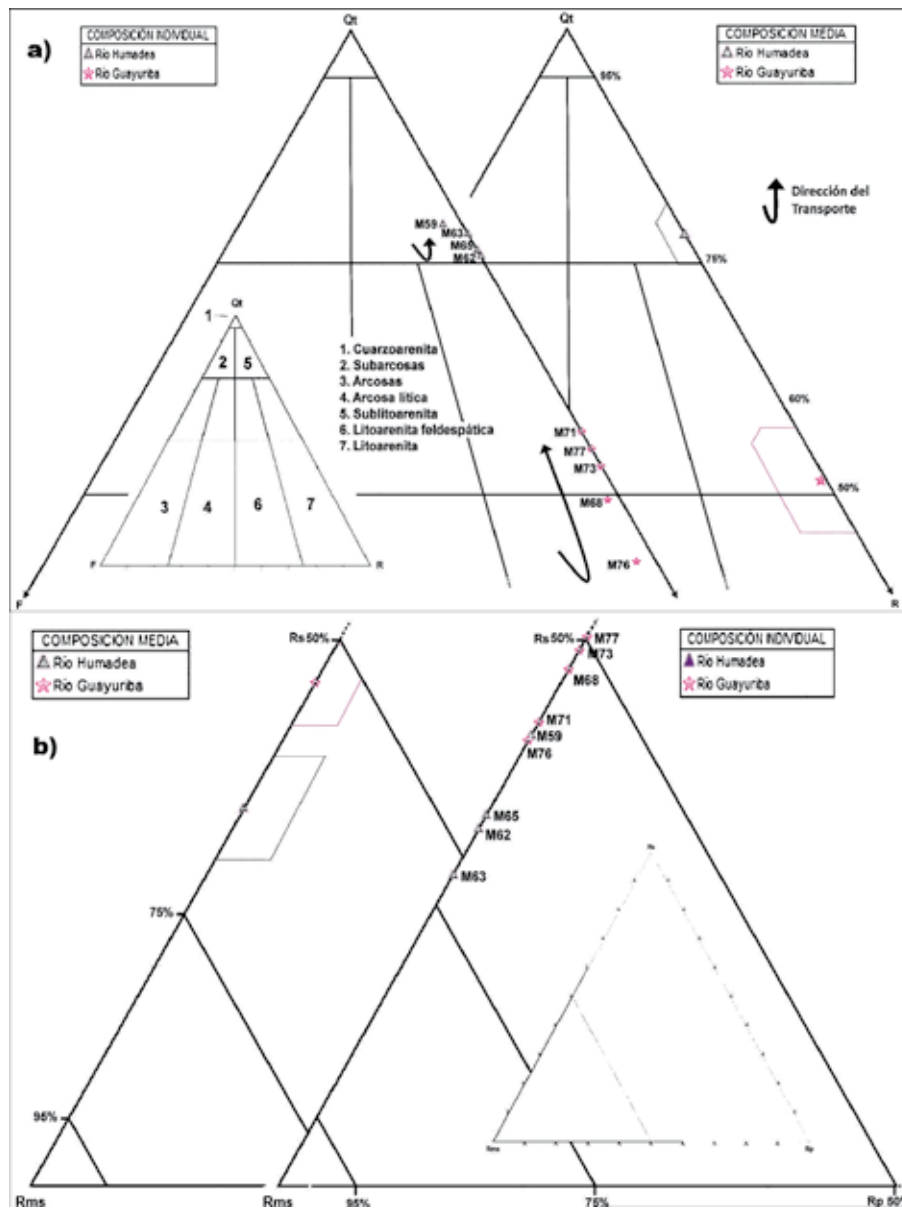


Figura 3. a) Composición de las muestras de arena tomadas en los ríos Humadea y Guayuriba. El chert es sumado al Qt. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores individuales y a la derecha los valores medios. Las muestras M59 y M68 son las más cercanas al área fuente, las muestras M65 y M77 las más distales. b) Composición de los granos poliminerálicos en las muestras de arena tomadas en los ríos Humadea y Guayuriba. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores medios y a la derecha los valores individuales. Las muestras M59 y M68 son las más cercanas al área fuente, las muestras M65 y M77 las más distales.

Figure 3. Composition of sand samples collected in rivers Humadea and Guayuriba. The chert is added to Qt. The upper region has been exaggerated, at left the individual values and at right the mean values. The M59 and M68 samples are closest to the source area, the M65 and M77 samples are the most distal. b) Composition of polyminerallitic grains of sand in the samples collected in Humadea and Guayuriba rivers. The upper region has been exaggerated, at left the mean values and at right the individual values. The M59 and M68 samples are closest to the source area, the M65 and M77 samples are the most distal.

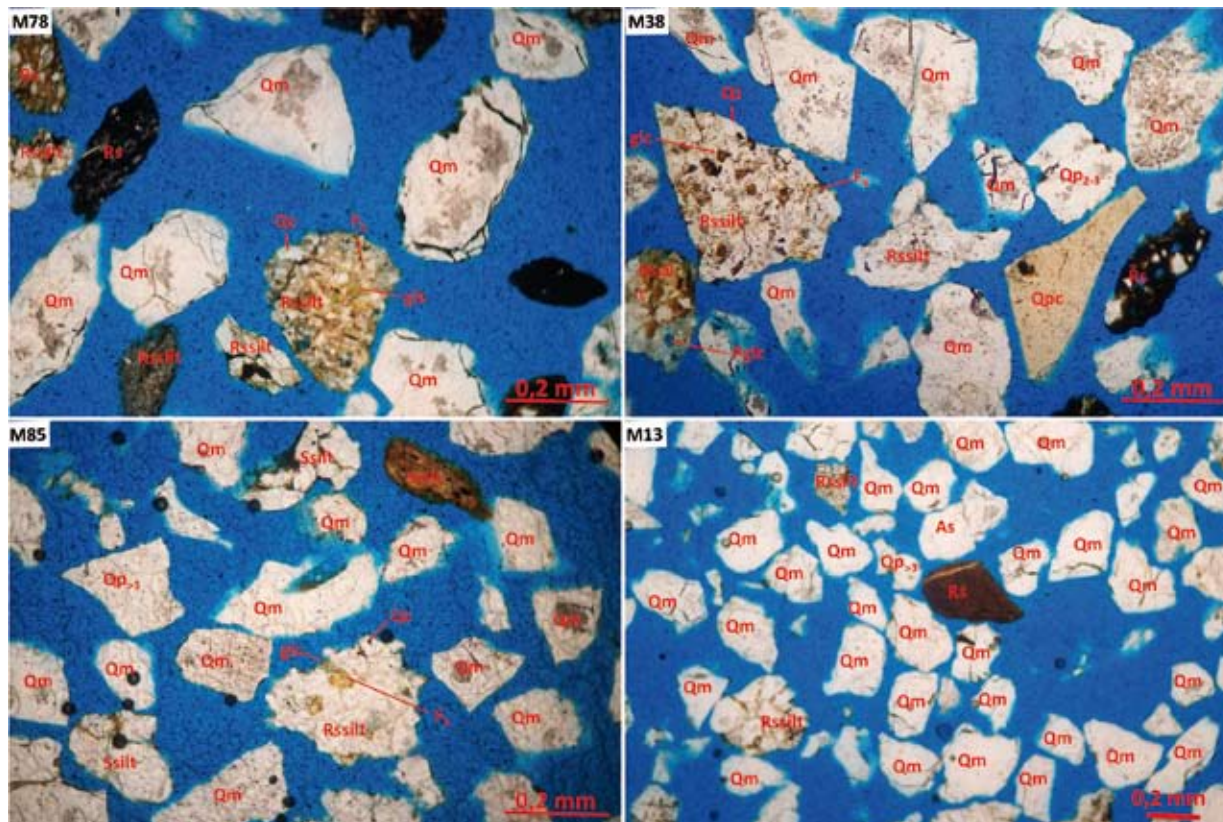


Figura 4. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria en algunas muestras de los ríos Cusiana y Ariporo. Imágenes en nicols paralelos.

La muestras M78 y M85 son las más cercanas al área fuente y las muestras M38 y M13 son las más distales. Convenciones utilizadas en la tabla 4. Convenciones especiales: Qz: cuarzo; glc: glauconita; Pglc: poro por disolución de glauconita; Fk: feldespato potásico.

Figure 4. Pictures under transmitted light microscope, showing the different categories of grains of quartz and sedimentary rock fragments in some samples from Cusiana and Ariporo rivers. Photographies in parallel nicols. The M78 and M85 Samples are closest to the source area and the M38 and M13 samples are more distal. Conventions used in Table 4. Special conventions: Qz: quartz; glc: glauconite; Pglc: pore by dissolution of glauconite; Fk: K-feldspar.

DISCUSIÓN

Influencia del Área Fuente

Los resultados composicionales de las muestras M62: Qt74,5F0R25,5; M68: Qt47,8F1,3R50,9; M78: Qt61F0R39; y M85: Qt73,4F0,3R26,3, indican que en los sectores más cercanos al piedemonte, la composición es controlada principalmente por: a) la composición de las rocas en las formaciones aflorantes; b) el área que ocupa cada formación aflorante en el sector fuente de cada río analizado; y c) la pendiente. Así mismo, en zonas donde afloran rocas metamórficas y sedimentarias es evidente

que las rocas metamórficas aportan la mayor cantidad de fragmentos de rocas a los depósitos de arenas (Figura 4b). Estas relaciones entre los resultados composicionales esperados y los obtenidos en los granos de R, muestran que para el análisis de procedencia la información sobre el área total de un sector fuente es menos relevante que el valor del área de exposición de las diferentes formaciones rocosas que afloran en el sector fuente y su composición, considerando que el área total del sector fuente del río Humadea es de 40,13 km² y el área total del sector fuente del río Guayuriba es de 2.543,35 km² (Figura 7 y Figura 2). Otro factor importante en las muestras

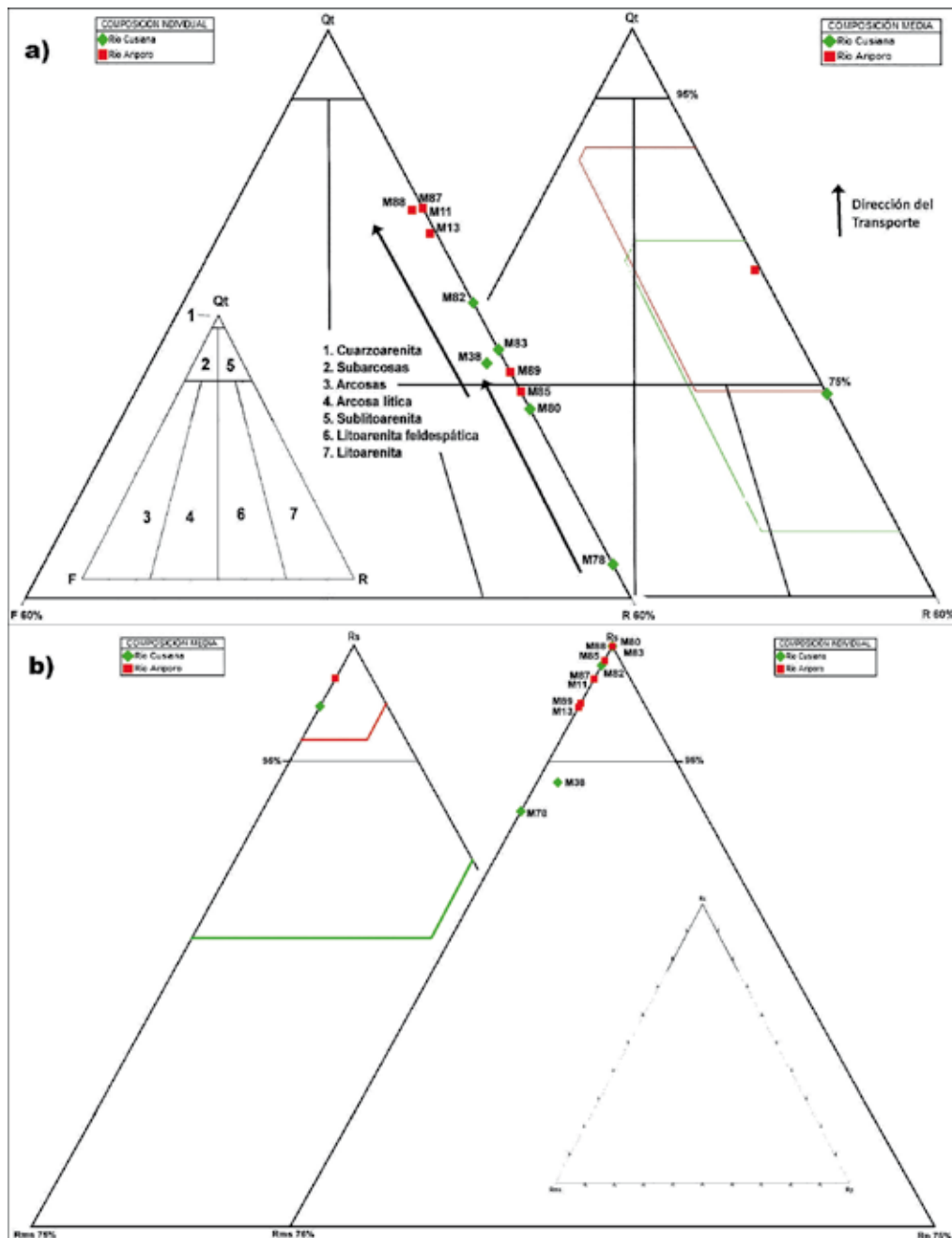


Tabla 5. Valores porcentuales de las rocas expuestas en el área fuente y de los granos contados en las muestras de arena. %FRms: Valores porcentuales de formaciones metamórficas aflorantes en el área fuente. %FRs: Valores porcentuales de formaciones sedimentarias aflorantes en el área fuente. %Rms: Valores modales de fragmentos de rocas metamórficas y metasedimentarias en la muestras más cercana al área fuente. %Rs: Valores modales de fragmentos de rocas sedimentarias en la muestras más cercana al área fuente.

Table 5. Percentage values of the outcropped rocks in the source area and the grains counted in the sand samples. %FRms: Percentage values of metamorphic formations outcropped in the source area. %FRs: Percentage values of sedimentary formations outcropped in the source area. %Rms: Percentage values of metamorphic and metasedimentary fragments in the samples closest to the source area. %Rs: Percentage values of sedimentary rock fragments in the samples closest to the source area.

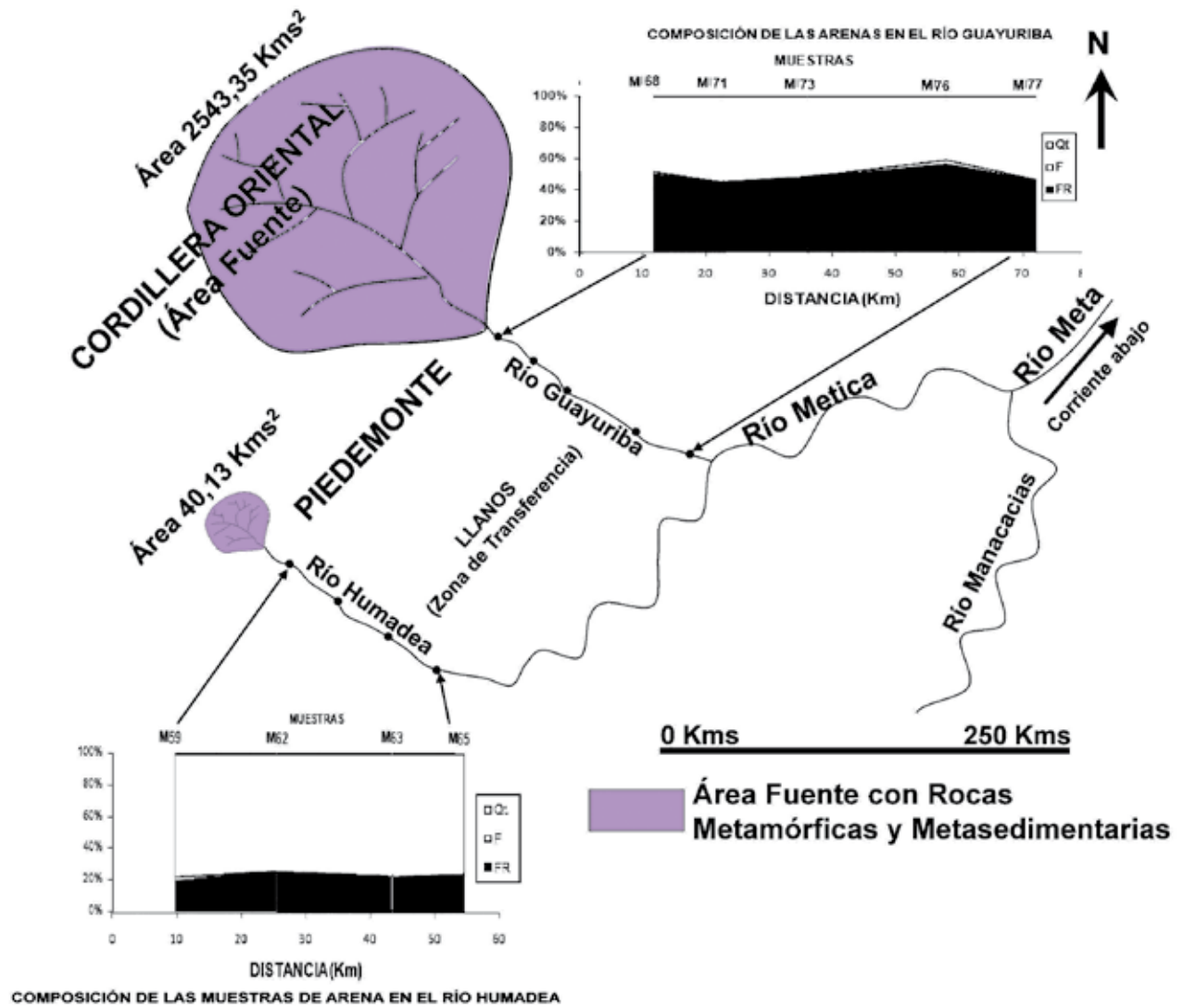


Figura 6. Esquema del área fuente con rocas metamórficas y metasedimentarias, mostrando la variación composicional en los ríos Humadea y Guayuriba.

Figure 6. Scheme of the source area with metamorphic and metasedimentary rocks, showing the compositional variation in the Humadea and Guayuriba rivers.

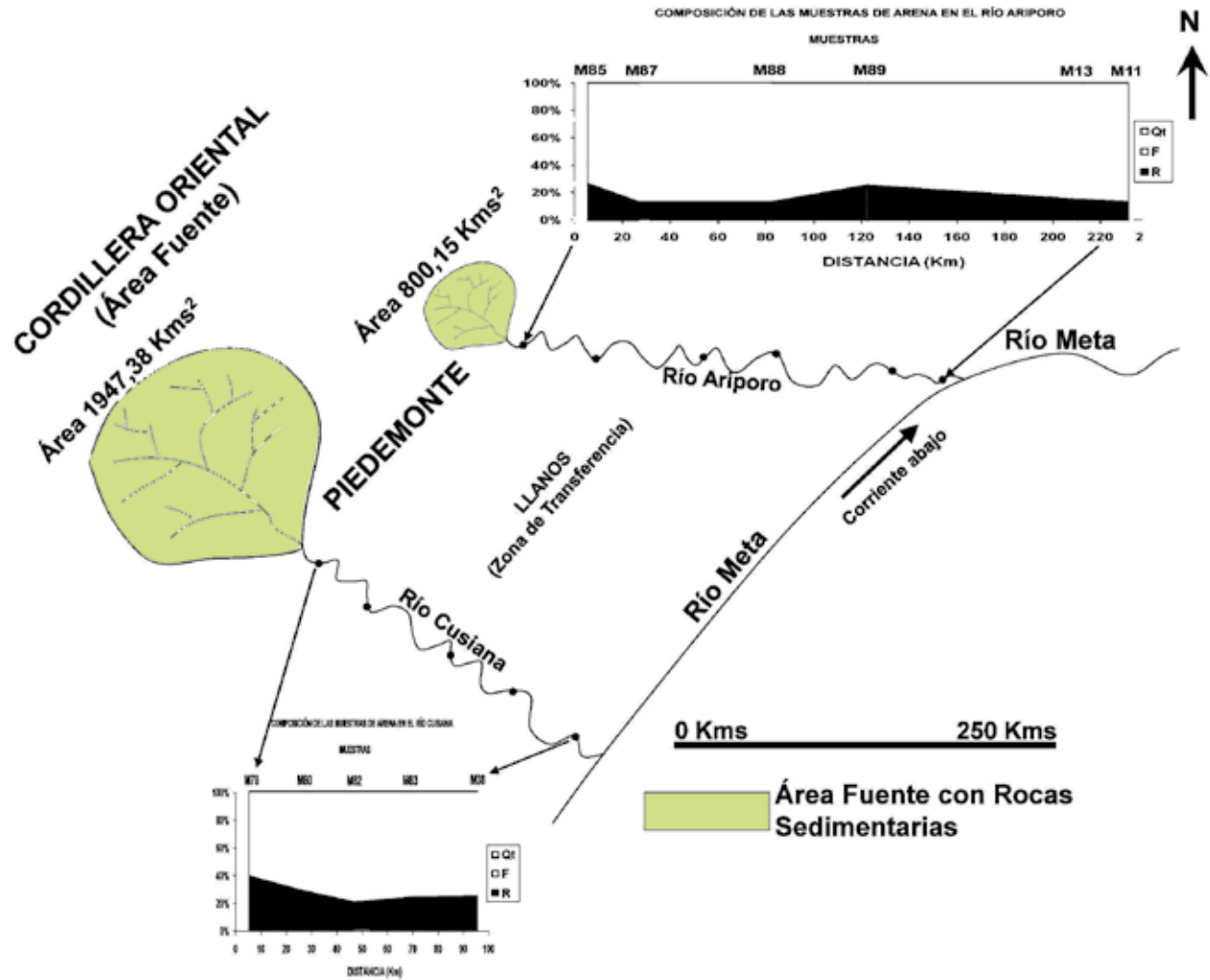


Figura 7. Esquema del área fuente con rocas sedimentarias, mostrando la variación composicional en los ríos Cusiana y Ariporo.

Figure 7. Scheme of the source area with sedimentary rocks, showing the compositional variation in the Cusiana and Ariporo rivers.

Tabla 2. Formaciones que aportan detritos en los cuatro afluentes seleccionados

Table 2. Formations that provide detritus in the four selected rivers

| PARAMETROS DE DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO MEDIO (% 1-2Φ) | | | | | |
|---|---|-------|------------|----------|----------|
| MUESTRAS | n | MEDIA | DESV. EST. | SKEWNESS | KURTOSIS |
| RÍO HUMADEA | 6 | 43,16 | 10,29 | -0,08 | -2,75 |
| RÍO GUAYURIBA | 9 | 24,29 | 15,37 | -0,14 | -1,52 |
| RÍO CUSIANA | 8 | 48,70 | 14,07 | -1,25 | 1,38 |
| RÍO ARIPORO | 7 | 48,81 | 27,56 | -0,04 | -0,64 |
| n número de muestras | | | | | |

procedentes de área fuente con rocas metamórficas es el contenido predominante de arena gruesa y media (Tabla 1). Esta distribución granulométrica permite hacer un reconocimiento preliminar de la textura de las rocas expuestas en el área fuente e inferencias sobre la composición (Folk 1974; Boggs 1987).

Influencia del Transporte

El transporte tiene mayor influencia en la zona de transferencia y es controlado por las pendientes, además, depende del caudal que tiene el río y de la cantidad de sedimento producido en el área fuente (Schumm 1977; Boggs 1987; Miall 1996; Niño 2004), tomando en cuenta que no se contó con esta información para el análisis de resultados. La composición de las muestras tomadas en el sector más cercano al área fuente de los ríos Humadea y Guayuriba sugiere un rápido transporte, posiblemente debido a que el ángulo de la pendiente sobrepasa el ángulo de reposo del sedimento en el sector fuente, por consiguiente la meteorización es básicamente física, lo cual implica una rápida remoción y transporte de sedimento (Basu 1985), y la composición refleja con mayor exactitud la composición del área fuente. Pero en la zona de transferencia las muestras de arena en el río Humadea varían composicionalmente después de los 45 km de transporte y en el río Guayuriba la composición varía después de los 25 km (medidos perpendicularmente en línea recta desde el piedemonte hacia la desembocadura en el río Meta) debido posiblemente a un cambio en la pendiente y en el régimen del caudal (Figs. 4 y 7).

Las muestras de arena se enriquecen más en granos de cuarzo a medida que aumenta la distancia de transporte (Figs. 5, 6 y 8). En el río Cusiana hay una disminución sustancial de los granos de R después de superados los 45 km iniciales de transporte (entre las muestras M78 y M80), debido posiblemente al cambio en la pendiente y en el régimen del caudal, dando inicio a procesos de transporte más lentos. En el río Ariporo esta variación en la composición inicia a los 25 km entre las muestras M85 y M87 (Figs. 6 y 8).

Influencia del Clima

Es importante resaltar que en el área fuente la tasa de precipitación es la misma para los cuatro afluentes, pero en la zona de transferencia si hay un cambio en los niveles de precipitación y en las pendientes (Figura 1). Los ríos del sector sur se caracteriza por tener clima húmedo - tropical y vegetación densa, las muestras de arena en este sector tienen gran cantidad de fragmentos de roca (e. g. Ríos Humadea y Guayuriba). Al norte los ríos tienen un clima variable, en el área fuente es húmedo – tropical y en el sector de mayor transporte es más árido y con menor vegetación, las muestras de arena en este sector tienen menor cantidad de fragmentos de roca y mayor contenido de cuarzo. Los sectores que están a 100 km del piedemonte (medidos perpendicularmente y en línea recta) tienen un clima seco y la vegetación es escasa, las muestras de arena se caracterizan por tener una importante disminución en los granos de R y una aumento en los granos de Qm (e. g. ríos Cusiana y Ariporo) (Schumm

Tabla 3. Resultados de los primeros cuatro momentos estadísticos sobre la media para la fracción arena media en las muestras colectadas en la CHRM

Table 3. Results of the first four statistical moments about the mean for the medium sandfraction in samples collected in CHRM

| | |
|---------|--|
| M = | Granos Monominerálicos (Granos con más del 95% de sólo una especie mineral): |
| Qt = | Cuarzo total (La cantidad de granos compuestos sólo por cristales de cuarzo en una muestra): |
| Qm = | Cuarzo monocristalino (granos los cuales están compuestos en más del 95% por un cristal de cuarzo): |
| Qms = | Cuarzo monocristalino con extinción recta ($<5^\circ$) |
| Qmu = | Cuarzo monocristalino con extinción ondulosa ($>5^\circ$) |
| Qp = | Cuarzo policristalino (granos que están compuestos en más del 95% por dos o más cristales de cuarzo): |
| Qp2-3 = | Cuarzo policristalino con dos o tres cristales por grano |
| Qp>3 = | Cuarzo policristalino con más de tres cristales por grano: |
| Qp>3f = | Cuarzo policristalino con más de tres cristales por grano, foliado (es decir, los cristales presentan orientación) |
| Qp>3m = | Cuarzo policristalino con más de tres cristales por grano, masivo (es decir, los cristales no presentan ningún tipo de orientación) |
| Qpc = | Chert |
| F = | Feldespatos (Granos monocristalinos y policristalinos) |
| Fk = | Feldespato potásico |
| Fp = | Feldespato plagioclasa |
| A = | Minerales accesorios (minerales presentes en pequeñas cantidades en las muestras como óxidos o minerales opacos y fosfatos) |
| R = | Fragmentos de Roca (especies minerales que no constituyen más del 95% del grano): |
| Rs = | Fragmentos de Rocas Sedimentarias: |
| Rsslt = | Fragmentos de limolitas y areniscas (Subgranos detriticos definibles) |
| Rms = | Fragmentos de Rocas Metamórficas y metasedimentarias: |
| Rmsf = | Fragmentos de roca metamórfica foliada (los subgranos presentan orientación) |
| Rmsm = | Fragmentos de roca metamórfica masiva (los subgranos no presentan una orientación preferencial pero hay indicios de procesos de deformación o neoformación de minerales) |
| Rp = | Fragmentos de Roca Plutónica |
| Alt = | Alteritas (se refiere a granos lo suficientemente alterados que no permiten identificar su origen) |
| Fer = | Femicritas (son fragmentos de lateritas) |
| Bio = | Detritos biogénicos como materia orgánica o restos esquelatales |

1977; Stallard and Edmond 1983; Boggs, 1987; Niño 2004; Restrepo 2005).

CONCLUSIONES

1. La relación entre las rocas metamórficas/sedimentarias aflorantes en el área fuente no determina la relación composicional entre los granos de fragmentos de roca en las arenas fluviales. En el área de estudio las rocas con metamorfismo de bajo grado pueden producir más granos de fragmentos de roca que las rocas sedimentarias en el área fuente en una proporción de 2:1 respectivamente. También, las muestras de arenas fluviales procedentes del área fuente con rocas metamórficas se caracterizan por tener una mayor población de granos tamaño arena gruesa en comparación con las muestras procedentes de los sectores fuente con rocas sedimentarias.

2. El contenido de feldespato no supera el 1% de la composición total en las muestras de arena de los cuatro ríos estudiados. La composición de las muestras de arenas en los ríos con morfología recta no muestra una tendencia a la disminución de los fragmentos de roca. La composición de las muestras de arena cambia de litoarenitas a sublitoarenitas en el río Humadea con 45 km de transporte; en el río Guayuriba con 25 km de transporte se genera una disminución marcada en el contenido de granos de fragmentos de roca pero sin ocasionar cambios en la composición. En los ríos con morfología meandriforme la composición de las arenas cambia de litoarenitas a sublitoarenitas después de 45 km de transporte para el río Cusiana y a los 25 km de transporte para el río Ariporo. La disminución marcada de los granos de fragmentos de roca en los ríos con fuente sedimentaria durante los primeros 25 km de transporte está principalmente asociada

con la disminución del ángulo de pendiente y la tasa de precipitación (Fgs. 6 y 8). Estos rasgos no son fáciles de reconocer en trabajos a escala regional (e. g. Johnsson et al. 1991).

3. Las arenas en los depósitos de los ríos Humadea y Cusiana son removidas rápidamente por efectos del transporte durante los primeros 45 km de transporte y en los ríos Guayuriba y Ariporo durante los primeros 25 km de transporte. En los ríos Cusiana y Ariporo después de estas distancias las arenas permanecen almacenadas en los depósitos por periodos de tiempo prolongado, lo cual se refleja en la presencia de óxidos de hierro (e. g. hematita y limonita) y en el grado de meteorización de la glauconita (tomando en cuenta que los granos de glauconita se encuentran completos pero con tonalidades café).
4. Los efectos del transporte tienen mayor influencia en los ríos con morfología recta porque no permiten que el sedimento permanezca por periodos prolongados de tiempo en los depósitos. Por tanto, en los ríos Humadea y Guayuriba predomina la erosión limitada por la meteorización.
5. La influencia del clima en la composición de los depósitos de arena es marcada en los ríos con morfología meandriforme debido a que las bajas pendientes permiten que el sedimento permanezca por más tiempo en los depósitos, de esta forma la meteorización química controla la composición de los depósitos marcadamente. Por tanto, en los ríos Cusiana y Ariporo predomina la erosión limitada por el transporte.

Agradecimientos

Los autores agradecen a ECOPETROL S.A. – ICP, por la financiación del trabajo, a la Corporación Geológica ARES, por la financiación de las secciones delgadas, a la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander por el préstamo de los laboratorios de petrografía, a la Dra. Georgina Guzmán y la Dra. Maisa Tunik por sus comentarios que permitieron enriquecer el manuscrito, al Dr. Sven N. Nielsen por sus sugerencias y colaboración durante la edición, y a COLCIENCIAS por el apoyo al Dr. Germán Bayona para el desarrollo de la investigación.

REFERENCIA

- Basu, A. (1985): Influence of Climate and Relief on Composition of Sands Released at Source Areas. G. G. Zuffa (ed). Provenance of arenites, pg. 1-18.
- Bayona, G., Valencia, A., Mora, A., Rueda, M., Ortiz, J. Y Montenegro, O. (2008): Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepais de los Llanos de Colombia. *Geología Colombiana* No. 33, pp 23-46.
- Boggs, S. (1987): Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Merrill Publishing Company. Ohio. 784 p.
- Dickinson, W. (1970) Interpreting Detrital Modes of Graywacke and Arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 40, N. 2, pp. 695-707.
- Folk, R. (1974): Petrology of Sedimentary Rocks. Walter Geology Library. Austin. 182 p.
- Grantham, J. and Velbel, M. (1988): The Influence of Climate and Topography on Rock-Fragment Abundance in Modern Fluvial Sands of the Southern Blue Ridge Mountains, North Carolina. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 58, N. 2, pp 219-227.
- Ideam. (2001): Mapa hidrográfico de Colombia. www.ideam.gov.co
- Jiménez, M. (2010): Temporalidad de la deformación en la zona sur de la cuenca Foreland de los llanos orientales, Colombia. Escuela de Geología (UIS). Tesis de Maestría. 105 p.
- Johnsson, M. and Stallard, R. (1989): Physiographic Controls on the Composition of Sediments Derived from Volcanic and Sedimentary Terrains on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 59, N. 5, pp 768 - 781.
- Johnsson, M. and Meade, R. (1990): Chemical Weathering of Fluvial Sediments During Alluvial Storage: The Macupanim Island Point Bar, Solimões River, Brazil. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 60, N. 6, pp 827-842.
- Johnsson, M., Stallard, R., and Lundberg, N. (1991): Controls on the Composition of Fluvial Sands from a Tropical Weathering Environment: Sands of the Orinoco River Drainage Basin, Venezuela and Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 103, pp 1622-1647.
- López, E. (2004): Aspectos más Relevantes de la Geomorfología y Geología y del Piedemonte Llanero de Colombia. INGEMOMINAS, pp 24.
- Meade, R. (2007): Trascontinental Moving and Storage: The Orinoco and Amazon Rivers Transfer the Andes to the Atlantic. *Geomorphology and Management*, pp 45 – 63.
- Miall, A. (1996): The Geology of Fluvial Deposits. Springer. Canada. 582 p.
- Niño, Y. (2004): Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos. Universidad de Chile. 69 p.
- Parra, M. (2008): Cenozoic Foreland-Basin Evolution in the Northern Andes: Insights from Thermochronology and Basin Analysis in the Eastern Cordillera, Colombia. Tesis Ph.D. Universität Potsdam. 146 p.
- Prada, D. y Quintero, I. (2004): Estudio Estructural de Fracturas y Análisis de Inclusiones Fluidas en Materiales de Relleno de Venas, en las Rocas Aflorantes de la Transecta Santa María- San Luis de Gaceno (Departamento de Boyacá, Borde Oriental de la Cordillera Oriental): Implicaciones Paleohidrogeológicas. Tesis de Grado. Escuela de Geología. UIS. 136 p.
- Pulido, O. y Gómez, L. S. (2001): Geología de la plancha 266 Villavicencia Escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Restrepo, J. D. (2005): Los Sedimentos del Río Magdalena: Reflejo de la Crisis Ambiental. Medellín. Fondo Editorial universidad EAFIT. p. 267.
- Schumm, S. (1977): The Fluvial System. John Wiley & Sons. USA. 338 p.
- Stallard, R. F. and Edmond, J. M. (1983): Geochemistry of the Amazon: 2 The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal of Geophysical Research*. V. 88, pp 9671- 9688.
- Suttner, L. and Dutta, P. (1986): Alluvial Sandstone Composition and Paleoclimate, I. Framework Mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 56, N. 3, pp 329-345.