

BALANCE GEOQUÍMICO PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO MEDELLÍN, CORDILLERA CENTRAL (ANTIOQUIA, COLOMBIA)

por

Juan Carlos Osorio¹, Jorge E. López-Rendón² & Michel Hermelin¹

Resumen

Osorio JC., JE. López-Rendón & M. Hermelin: Balance geoquímico para la cuenca alta del río Medellín, Cordillera Central (Antioquia, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **27**(102): 71-84. 2003. ISSN 0370-3908.

El balance geoquímico para la cuenca alta del río Medellín – Porce (Antioquia) se obtuvo a partir de ensayos químicos y físicos en muestras de agua lluvia y de escorrentía recolectadas aproximadamente cada 15 días entre el 04/07/00 y el 16/02/01. Se encontró un equilibrio en las concentraciones de los iones en el río Medellín tanto en la temporada seca como en la húmeda. Se estimó que la escorrentía aporta el 88% de los principales sólidos disueltos que salen de la cuenca (H_2CO_3 , SiO_2 , Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} , K^+), que el orden de movilidad relativa es: $Ca > Mg > SiO_2 > Na > K$ y que el porcentaje de Mg disuelto duplica los promedios mundiales para aguas que drenan rocas plutónicas y metamórficas. La tasa de meteorización de la sílice fue de ~138 kg/ha/año, y de ~48 kg/ha/año para la suma de los principales cationes mayores disueltos.

Palabras clave: Balance geoquímico, precipitación, escorrentía, sólidos disueltos, movilidad relativa, meteorización, alta montaña.

Abstract

The solute budget in the upper Medellín – Porce river catchment (Colombia) was obtained through chemical and physical water analyses (rainfall and runoff). Samples were taken every two weeks between 04/07/00 and 16/02/01. Balance was carried out for the dissolved ion concentrations in surface waters averaging rainy and dry seasons values. We estimated that runoff contributes with 88% of the principal dissolved solids that flow out of the catchment (H_2CO_3 , SiO_2 , Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} ,

¹ Grupo de Geología Ambiental, Departamento de Geología, Universidad EAFIT, Apartado Aéreo 3300, Medellín, Colombia. jcosorio@neptuno.eafit.edu.co & hermelin@eafit.edu.co

² Suministros de Colombia S.A., Investigación y Desarrollo, Apartado Aéreo 4899, Medellín, Colombia. jlopez@sumicol.com

K⁺); Relative mobility is Ca > Mg > SiO₂ > Na > K. The percentage of dissolved Mg in the Medellín River duplicated the world average for rivers draining plutonic and metamorphic rocks. A chemical weathering rate estimate of ~138 kg/ha/yr was derived for the SiO₂ budget and of ~48 kg/ha/yr for the sum of major dissolved cations.

Key words: Solute budget, rainfall, runoff, dissolved solids, relative mobility, weathering, high mountain.

Introducción

Los elementos químicos se presentan en todas las etapas del ciclo hidrológico como gases atmosféricos, partículas de polvo o aerosoles alrededor de los cuales se condensan las gotas de lluvia y/o como elementos en suspensión o disueltos dentro del agua de escorrentía. Estos elementos son introducidos en las cuencas hidrográficas por medio de la precipitación o liberados de las rocas por los procesos de meteorización de las mismas.

El balance geoquímico es el resultado de comparar la composición química de las aguas naturales que salen de una cuenca con la de las aguas lluvias. Al determinar un balance geoquímico se pueden establecer, entre otros, la procedencia de los elementos y compuestos, el material que los suministra, las tasas a las que varían sus concentraciones, sus relaciones mutuas y lo que controla su presencia en una determinada cuenca.

En Colombia se han hecho pocos intentos por estudiar e interpretar los procesos de meteorización química mediante la elaboración de balances geoquímicos. De éstos, sólo se han publicado los resultados de **Geale & Hermelin** (1988) quienes determinaron tasas de meteorización para cuatro cuencas localizadas al oriente del departamento de Antioquia.

Con estos datos cuantitativos obtenidos en la zona de la Reserva Ecológica del Alto de San Miguel, para tasas de meteorización en la zona ecuatorial húmeda a más de 2.000 m de altura sobre el nivel del mar, se espera contribuir al conocimiento de la evolución y del funcionamiento de los geoecosistemas del trópico húmedo de montaña.

Área de estudio

La zona de estudio está localizada en la Cordillera Central de Colombia, a unos 30 km al sur de Medellín (Antioquia), en la parte más alta de la cuenca del río Medellín – Porce; tiene un área de 1.055 ha e incluye las cuencas de las quebradas La Vieja, La Moladora, El Tesoro y Santa Isabel (Figura 1). La altitud varía entre 2.000 y 3.050 msnm, la temperatura media es de 16°C y la precipitación es superior a los 2.500 mm/año. Estas condiciones la ubican en la zona de vida de bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) (**Espinal**, 1977). El río Medellín en esta zona se clasifica como de orden 5 (**Strahler**, 1957).

La cobertura vegetal del área está conformada por un mosaico de vegetación en diferentes estados sucesionales: El bosque secundario ocupa cerca del 70% del área, seguido por rastrojo bajo y alto (~22%), pastos (~5%) y plantaciones forestales (~3%) (**Montoya**, 2001).

Más del 80% del área está constituida por esquistos paleozoicos, que incluyen esquistos cuarzo-sericíticos, cuarzo-biotíticos, cuarzo-moscovíticos y cuarcitas. Los esquistos cuarzo-sericíticos son los más abundantes, por lo que se asigna este nombre a toda esta unidad litológica (**Restrepo et al.**, 1981; **Noreña & Patiño**, 1984).

Por otra parte, los suelos en la zona de estudio pertenecen a la Asociación Tequendamita y se clasifican como Placandept y la mayoría Dystrandept (**Aguilar & Loaiza**, 2001). El material parental de estos suelos corresponde a depósitos de cenizas volcánicas sobre rocas metamórficas, esquistos y neis (**IGAC**, 1979).

Metodología

El balance geoquímico se elaboró a partir de ensayos químicos y físicos en muestras de agua lluvia tomadas según la metodología de **Hornung et al.** (1986) en la Estación Aula Ambiental de la reserva ecológica del Alto de San Miguel, y en muestras de escorrentía superficial tomadas en la denominada Estación Río Medellín 2 (Figura 1). Los muestreos se realizaron aproximadamente cada 15 días a lo largo del período comprendido entre el 4 de julio de 2000 y el 16 de febrero de 2001. Se efectuaron 14 sesiones de muestreo en estas dos estaciones y se evaluaron 14 parámetros: pH, temperatura, potencial Redox, conductividad, alcalinidad, nitrato, sílice, dureza total, dureza cálcica, sodio, potasio, magnesio, aluminio, hierro total y sólidos totales. Nueve de estos parámetros se utilizaron para calcular el balance geoquímico.

Metodología

Los resultados de precipitación se obtuvieron en un pluviómetro instalado en el Aula Ambiental del Instituto

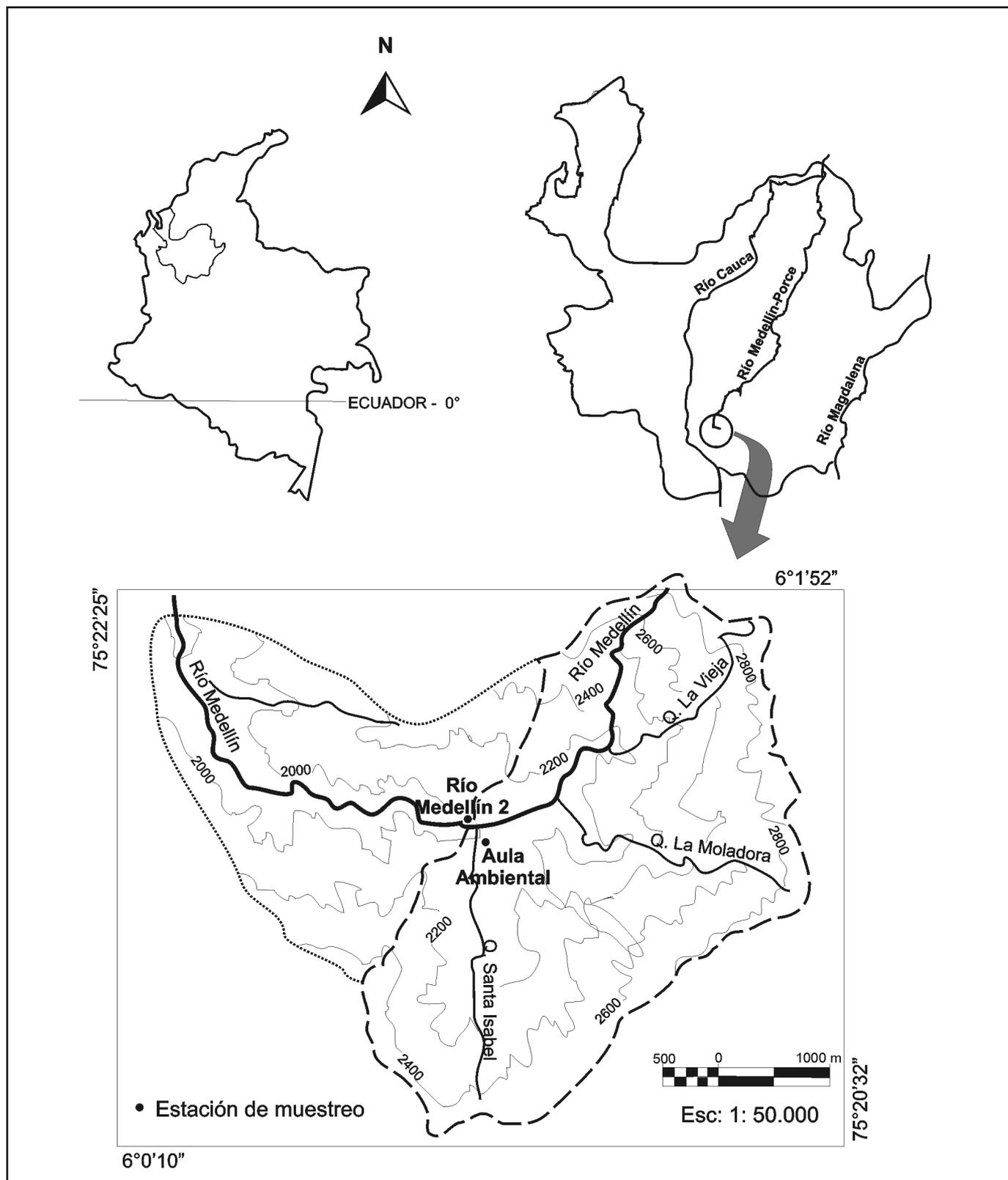


Figura 1. Localización del área de estudio

Mi Río. El caudal del río Medellín se determinó para cada evento de muestreo mediante el método del flotador y la velocidad se corrigió con un factor de 0,7.

En cada sitio de muestreo de agua de escorrentía se midieron con un equipo portátil el pH, el potencial Redox y la temperatura del agua. El mismo día del muestreo de campo, en los laboratorios de la Universidad EAFIT se midió la conductividad y la alcalinidad (titulación con ácido clorhídrico) de todas las muestras recolectadas y el pH de las muestras de agua lluvia.

Las muestras analizadas en la Universidad EAFIT no fueron filtradas y permanecieron refrigeradas hasta que todos los ensayos químicos se hubiesen realizado. Los cationes y aniones principales se determinaron según métodos estándar (APHA, AWWA & WPCF, 1985), excepto la sílice y el nitrato que se determinaron mediante la utilización de dos kits reducción Molibdato – Sulfito y Reducción – Diazotación respectivamente. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los métodos analíticos utilizados y los límites de detección.

En el laboratorio de aguas de Cornare (Corporación Autónoma Regional Rionegro - Nare) localizado en Santuario (Antioquia) se realizaron los ensayos de aluminio, sodio y potasio. Para estos ensayos, las muestras se filtraron en la Universidad EAFIT el mismo día del muestreo y se llevaron a Cornare debidamente refrigeradas generalmente al siguiente día.

Además de los parámetros estadísticos básicos para las diferentes variables determinadas, se efectuaron análisis de correlación y de regresión multivariada. En estos análisis se incluyeron, además de los componentes químicos, las variables pH, conductividad, temperatura, caudal y precipitación.

La información obtenida en las estaciones de muestreo Aula Ambiental y Río Medellín 2, se analizó inicialmente

en forma cualitativa; así, se identificaron los valores máximos y mínimos por cada variable, los valores anómalos, la presencia de tendencias en el comportamiento de los parámetros y las posibles relaciones existentes entre las distintas variables evaluadas en una misma estación.

Posteriormente se elaboró el balance geoquímico para la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel con base en la metodología propuesta por Williams (1983); se identificaron los mayores sólidos disueltos según el balance geoquímico para el área de estudio y se compararon con los promedios mundiales.

Finalmente se establecieron las tendencias en el comportamiento de los iones durante los períodos secos y lluviosos. También se determinó la tasa de meteorización para algunos de los mayores sólidos disueltos y su movilidad relativa, para luego comparar estos resultados con los obtenidos en otras investigaciones.

Resultados y discusión

Ecuación para balance geoquímico

Para la elaboración del balance geoquímico en la zona de la Reserva Ecológica del Alto de San Miguel se utilizó la Ecuación de Continuidad (1), en la cual la salida de solutos de la cuenca (generalmente en forma de escorrentía superficial) es igual a la entrada a partir de la atmósfera más el cambio que se produce en el almacenaje. La diferencia entre las entradas y salidas representa la generación o remoción del elemento dentro de la cuenca (Williams, 1983; Drever, 1997).

Salida de solutos = Solutos a partir de la atmósfera + solutos a partir de la meteorización +/- solutos a partir de la biomasa +/- intercambio iónico (Drever & Clow, 1995). (Ecuación 1)

Tabla 1. Límites de detección para equipos y protocolos utilizados.

| PARÁMETRO | METODOLOGÍA | LÍMITE DE DETECCIÓN |
|----------------|-------------------------------------|--|
| pH | pH metro | 0,01 |
| Temperatura | Termómetro | 0,1° C |
| Conductividad | Conductímetro | 0,01 µS/cm |
| Alcalinidad | Titulación ácido clorhídrico (0,1N) | 3,05 - 0,31 mg H ₂ CO ₃ /l |
| Hierro Total | Fenantrolina | 0,02 mg/l |
| Dureza Cálrica | Titulación Edta | 0,4 mg Ca /l |
| Dureza Total | Titulación Edta | 1 mg de CaCO ₃ |
| Nitrato | Reducción – Diazotación (Kit) | 0,01 mg/l |
| Sílice | Reducción Molibdato – Sulfito (Kit) | 0,5 mg/l |
| Aluminio | Colorimétrico Eriocromocianina | 0,003 mg/l |
| Sodio | Absorción atómica | 0,06 mg/l |
| Potasio | Absorción atómica | 0,48 mg/l |

Para calcular el balance geoquímico según la metodología propuesta por **Williams** (1983) en la cuenca Narrator (Dartmoor, Inglaterra), se hacen las siguientes dos suposiciones:

- La precipitación total ("bulk precipitation") es la única entrada significativa al sistema y el drenaje es la única salida. Esta suposición generalmente subestima la adición de elementos vía depositación seca a la cuenca (**Eriksson**, 1955; **Miller & Miller**, 1980; **Dollard et al.**, 1983 en **Hornung et al.**, 1986), lo que puede causar que en el balance geoquímico se sobrevalore el aporte de sólidos disueltos originados por la meteorización de la roca parental y posteriormente, a partir de los resultados de dicho balance, se estimarían tasas de meteorización química más altas que las reales para la zona de estudio.
- El cambio en la composición química del agua debido a la biomasa y al intercambio iónico en el almacenamiento: Se puede despreciar esta suposición, ya que los resultados de estudios edafológicos (**Aguiar & Loaiza**, 2001) y de cobertura vegetal (**Montoya**, 2001), muestran que en la cuenca alta del río Medellín la biomasa está en crecimiento y los suelos están prácticamente agotados; en consecuencia, los suelos aparentemente no tienen la capacidad de suministrar los nutrientes que necesita la biomasa para su desarrollo, por lo que la mayor parte de esta necesidad deberá ser sustentada por los nutrientes generados a partir de la descomposición de la hojarasca. Este es un proceso de reciclaje de nutrientes similar al que ocurre en los suelos de la cuenca inferior del Amazonas (**Went & Stark**, 1968; **Herrera et al.**, 1978 en **Stallard & Edmond**, 1983).

Con lo anterior se considera que al seguir la metodología propuesta por **Williams** (1983) no se está incurriendo en errores significativos al aceptar que las variables biomasa e intercambio iónico de la Ecuación 1 que involucran cambios en el almacenamiento se puedan despreciar. **Williams** (1983) tiene en cuenta las entradas a la cuenca a través de la precipitación y calcula el balance geoquímico con base en la ponderación de las concentraciones para cada elemento con respecto a la cantidad de precipitación y el caudal.

Finalmente, la ecuación utilizada para calcular el balance geoquímico es la siguiente:

$$\text{Balance Geoquímico} = \text{Entradas (Precipitación total)} - \text{Salida (Escorrentía superficial)}. \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Entradas de Solutos (Precipitación)

La precipitación puede ser en forma de lluvia, condensación de neblina o bruma y por depositación seca que es tomada directamente por la vegetación o la humedad del follaje (**Drever & Clow**, 1995).

Para calcular las entradas para el balance geoquímico se utilizó un promedio obtenido para cada evento de muestreo, a partir de la sumatoria del producto de la concentración encontrada para un elemento determinado y la precipitación acumulada durante 15 días de muestreo (Estación Aula Ambiental), dividido por la precipitación total para el periodo de estudio (Ecuación 3).

$$\text{Entrada} = \frac{\sum C_i * V_i}{\sum V_i} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

donde:

C_i : Es la concentración obtenida para un determinado elemento en cada evento de muestreo de agua lluvia.

V_i : Es la precipitación acumulada durante 15 días de muestreo.

Con base en los registros obtenidos para la Estación Aula Ambiental y utilizando la Ecuación 3, se calcularon las entradas a la cuenca, con las que posteriormente se obtuvo el balance geoquímico (Tabla 4).

Datos de precipitación obtenidos entre septiembre de 1984 y marzo de 2001, en la estación del IDEAM La Salada (municipio de Caldas, departamento de Antioquia) localizada aproximadamente 4 km al norte de la zona de estudio, indican la presencia anual de dos periodos lluviosos, de abril a junio y de septiembre a noviembre y dos periodos menos lluviosos, de diciembre a febrero y de julio a agosto (**IDEAM**, 2001). Por su parte, los datos pluviométricos tomados en el Aula Ambiental de la reserva ecológica del Alto de San Miguel, muestran un total mínimo de lluvia acumulada para los 8 meses muestreados de 1.813 mm.

Los valores de pH encontrados variaron entre 3,76 y 6,53, con un valor promedio del orden de 4,6 (Tabla 2). En la mayor parte del planeta, es de esperarse que bajo las condiciones actuales de contaminación el agua lluvia presente generalmente un pH ligeramente menor de 5,7 (**Klusman**, 1996 en **Langmuir**, 1997). En el presente estudio se registraron dos valores relativamente bajos de pH (3,76 y 4,04), posiblemente originados por eventos extremos de contaminación atmosférica. Esta hipótesis ya había sido propuesta por **Cadavid et al.** (2000) quienes suponen que sobre el Alto de San Miguel circulan, a

intervalos de tiempo variables, masas de aire contaminadas procedentes del Valle de Aburrá.

En la Tabla 2 también se presentan los promedios de las concentraciones de soluto en la precipitación total. Se observó que los solutos dominantes son el bicarbonato y el calcio. Por su parte, los sólidos totales disueltos obtenidos a partir de la suma de bicarbonato, sílice, calcio, sodio, magnesio y potasio en el agua lluvia tienen un valor promedio de 3,4 mg/l, con un intervalo de variación entre 0,97 y 4,8 mg/l.

Salida de Solutos (Escorrentía)

Para calcular las salidas en el balance se utilizó un promedio similar al utilizado para las entradas (Ecuación 3). Este promedio se obtuvo, para cada evento de muestreo, a partir de la sumatoria del producto de la concentración encontrada para un elemento determinado y el caudal medido en el momento de la toma de muestra (Estación Río Medellín 2), dividido por la descarga total para el periodo de estudio (Ecuación 4).

$$\text{Salida} = \frac{\sum C_i * V_i}{\sum V_i} \quad (\text{Ecuación 4})$$

donde:

C_i : Es la concentración obtenida para un elemento determinado en cada evento de muestreo.

V_i : Es el caudal medido en la Estación Río Medellín 2.

Con base en los registros obtenidos para la Estación Río Medellín 2 y utilizando la Ecuación 4, se calcularon las salidas de la cuenca, con las que posteriormente se obtuvo el balance geoquímico (Tabla 4).

El agua tomada como muestra en la Estación Río Medellín 2 presentó una temperatura promedio de 15,9°C, una conductividad de 2 mS/cm y un pH de 7,2 (Tabla 2). Este último valor se encuentra en el intervalo normal para aguas superficiales no contaminadas, 6,5 a 8,5 (Hem, 1985).

La sílice es el sólido disuelto más abundante, los cationes están dominados por el calcio y los aniones por el bicarbonato. Estos resultados son similares a los encontrados para la mayoría de aguas dulces del mundo, cuyos iones dominantes son calcio y bicarbonato (Langmuir, 1997).

Los sólidos totales disueltos (H_2CO_3 , SiO_2 , Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} y K^+) en el agua de la Estación Río Medellín tienen un valor promedio de aproximadamente 31,2 mg/l y un intervalo de variación entre 25,7 y 34,2 mg/l.

Los resultados de los análisis estadísticos de correlación lineal y regresión multivariada no indicaron correlación significativa entre las variables químicas y físicas evaluadas en este estudio.

Influencia del caudal sobre la concentración iónica

El agua de los ríos proviene tanto de la precipitación directa como del flujo base generado por agua subterránea que se infiltra directamente en el canal y del agua de escorrentía que llega al drenaje durante o después de la precipitación. Dicha escorrentía tiene generalmente un corto tiempo de residencia en la zona insaturada del suelo, al igual que un breve contacto con la vegetación (Hem, 1985).

Por lo tanto, se espera que la composición química del agua en la Estación Río Medellín 2 durante las épocas secas esté totalmente controlada por la composición del

Tabla 2. Concentraciones promedio de soluto en la precipitación total ("bulk precipitation") y en el agua de escorrentía.

| Parámetro | Unidades | Precipitación Total (Estación Aula Ambiental) | | Agua de Escorrentía (Estación Río Medellín 2) | |
|-----------------|----------|--|--------------|--|-------------|
| | | Promedio | Intervalo | Promedio | Intervalo |
| Conductividad | µS/cm | 0,6 | 0,02-1,01 | 2,0 | 1,27-2,32 |
| pH | | 5,0 | 3,76-6,53 | 7,3 | 6,72-7,61 |
| Bicarbonato | | 2,3 | 0,0-3,05 | 15,9 | 11,59-19,52 |
| Nitrato | | 0,34 | 0,04-0,79 | 0,64 | 0,40-1,19 |
| Sílice | | 0,14 | 0,02-0,30 | 10,9 | 9,69-11,60 |
| Calcio | | 0,65 | 0,0-1,2 | 2,6 | 2,00-3,21 |
| Magnesio | | 0,0 | 0,0 | 0,43 | 0,0-0,73 |
| Sodio | | 0,293 | <0,06- 0,861 | 1,03 | 0,467-1,953 |
| Potasio | | 0,164 | <0,06-0,769 | 0,36 | 0,141-0,514 |
| Aluminio | | 0,022 | 0,003-0,050 | 0,065 | 0,013-0,291 |
| Hierro | | 0,044 | 0,00-0,190 | 0,125 | 0,00-0,170 |
| Sólidos totales | | 16 | 0,0-40 | 33 | 0-66 |

flujo base, mientras que en la temporada de lluvias las concentraciones estarán controladas por la composición química de la precipitación directa y del flujo base, además del aporte del agua de escorrentía.

Durante el período estudiado, el caudal observado en la Estación Río Medellín 2 presentó tres tendencias (Figura 2a). De julio a finales de agosto se presenta una variación entre 452 y 608 l/s; entre finales de agosto y principios de noviembre se registran los valores más altos de caudal, 717 a 848 l/s; y desde principios de noviembre y hasta febrero, cuando terminó el muestreo, se observa una disminución de los caudales desde 416 hasta 214 l/s. Por otra parte no se observó una correlación significativa entre precipitación y caudal para los datos disponibles (Figura 2b).

De manera similar, no se encontró una correlación significativa entre caudal y concentraciones iónicas, a lo largo del período muestreado. En la Figura 3a se observa que la sumatoria de cationes (TZ^+) no varía mucho (en promedio 218 $\mu\text{eq/l}$) y sólo tiene un ligero incremento en concentración hacia el final del muestreo, lo cual coincide con la época de menor caudal; la correlación entre estas dos variables es muy baja (Figura 3b).

Tabla 3. Relaciones entre los componentes principales en solución y en la roca parental (Esquistos sericiticos).

| Relación $K^+ / K^+ + Na^+$ | | Relación $Mg^{2+} / Mg^{2+} + Ca^{2+}$ | |
|-----------------------------|---------|--|---------|
| En Roca | En Agua | En Roca | En Agua |
| 0,75 | 0,31 | 0,91 | 0,18 |

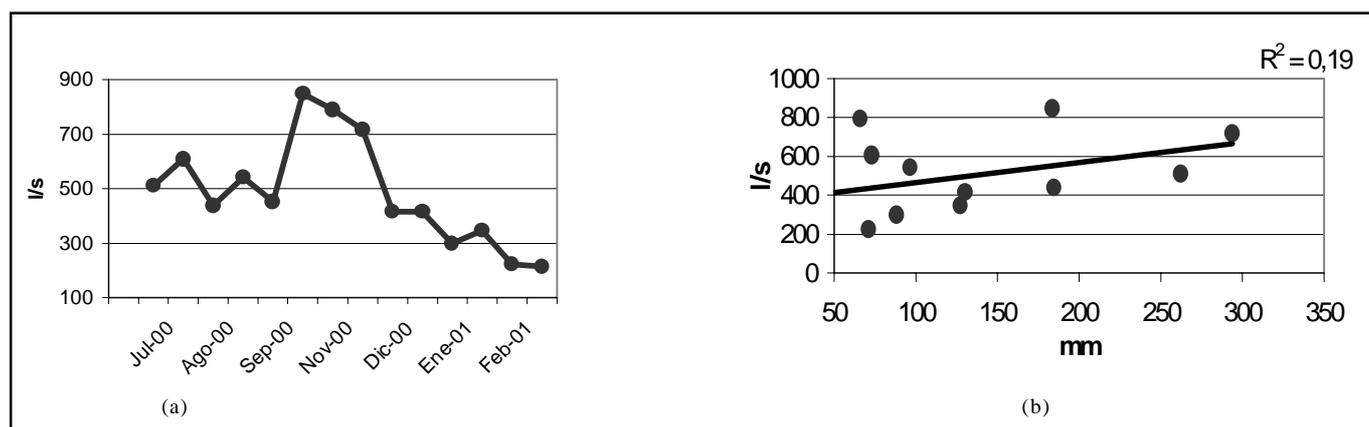


Figura 2. (a) Caudal en la Estación Río Medellín 2. (b) Correlación entre el caudal en la Estación Río Medellín 2 y los datos de precipitación según el pluviómetro localizado en la Estación Aula Ambiental.

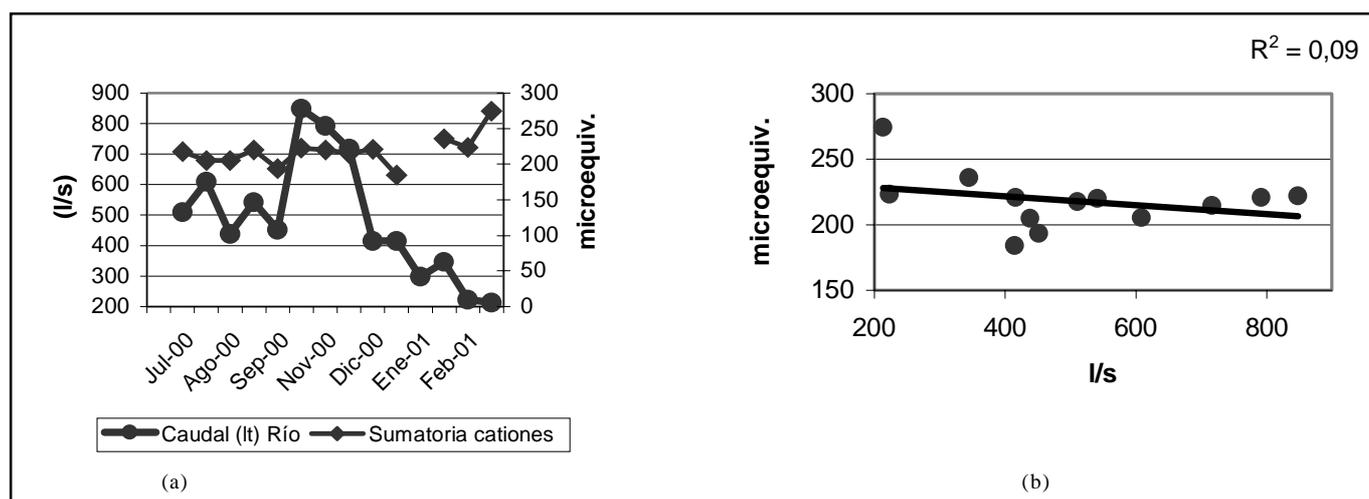


Figura 3. (a) Comportamiento del caudal en la Estación Río Medellín 2 vs la sumatoria de cationes (TZ^+) y (b) correlación entre ambos parámetros.

Tabla 4. Balance Geoquímico calculado en la Estación Río Medellín 2.

| Parámetro | Conductividad μS/cm | Bicarbonato | Nitrato | Sílice | Ca (mg/l) | Mg | Na | K | Al | Fe |
|--------------|------------------------|-------------|---------|--------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Entrada Neta | 0,80 | 2,47 | 0,29 | 0,14 | 0,62 | 0,00 | 0,28 | 0,12 | 0,02 | 0,06 |
| Salida Neta | 1,82 | 13,26 | 1,14 | 9,59 | 2,33 | 0,52 | 0,99 | 0,45 | 0,16 | 0,24 |
| Balance | -1,02 | -10,79 | -0,85 | -9,45 | -1,71 | -0,52 | -0,71 | -0,33 | -0,13 | -0,19 |

La concentración de la sílice, aunque presenta dos valores pico bajos, muestra una tendencia general a permanecer relativamente uniforme (Figura 4a) y así como en el caso de la sumatoria de cationes exhibe una muy baja correlación con el caudal (Figura 4b).

La concentración del ión bicarbonato es aparentemente poco variable, presentándose un incremento hacia el final del período de muestreo (Figura 5a). Esta tendencia en comportamiento no se correlaciona con las variaciones encontradas en el caudal (Figuras 5a y 5b).

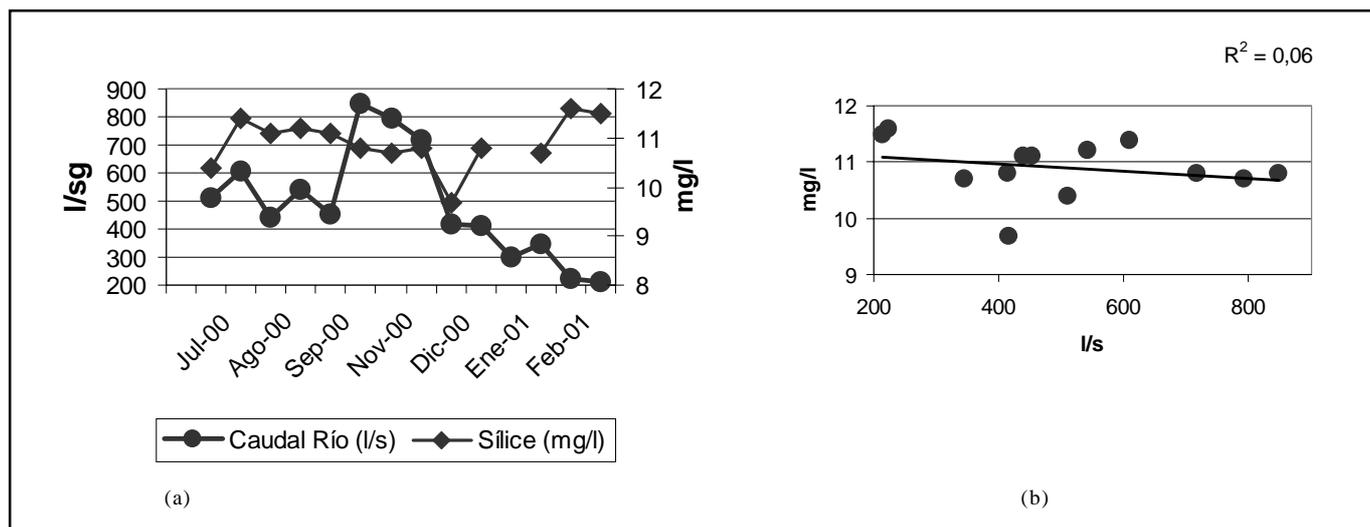


Figura 4. (a) Comportamiento del caudal en la Estación Río Medellín 2 vs sílice y (b) Correlación entre ambos parámetros.

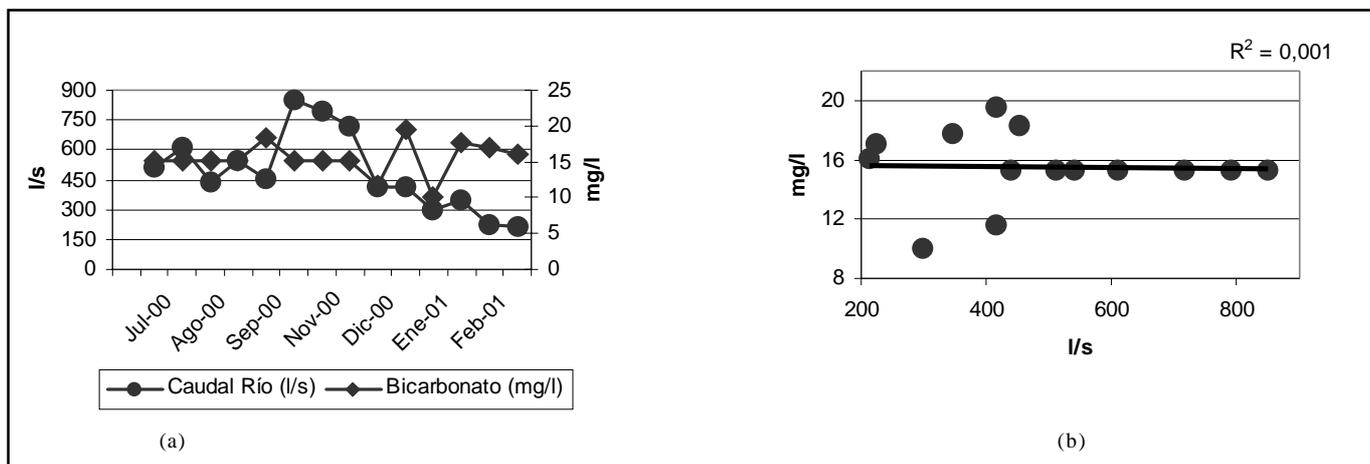


Figura 5. (a) Comportamiento del caudal en la Estación Río Medellín 2 vs bicarbonato y (b) Correlación entre ambos parámetros.

Así como para la sílice, la concentración de bicarbonato tiende a presentar una variabilidad relativamente pequeña durante la mayor parte del muestreo. Hacia el final del muestreo exhibe una variación algo significativa; sin embargo esta variación no se correlaciona con un cambio significativo en el caudal (Figura 5).

De esta manera, las concentraciones de los principales sólidos disueltos estudiados en la cuenca alta del río Medellín permanecieron prácticamente uniformes durante el período de muestreo, independientemente de temporadas con alta o baja precipitación. Este comportamiento parece indicar que esta cuenca está autoequilibrada, es decir, que las concentraciones no presentan disminución ni aumento significativos con las variaciones en el caudal.

Condiciones de equilibrio de la cuenca

Para que se haya presentado un aparente autoequilibrio en la cuenca alta del río Medellín, las concentraciones de los principales sólidos disueltos aportados por agua de escorrentía y por flujo base al caudal total debieron haber sido similares a lo largo del período muestreado, independientemente de temporadas con alta o baja precipitación y de las variaciones del caudal.

Para explicar la forma como la escorrentía adquiere la carga iónica necesaria para mantener las concentraciones constantes en el río Medellín, a pesar de que exista un exceso de descarga, se propone la hipótesis de **Cleaves et al.** (1970), donde sólo la precipitación que cae directamente sobre el agua de la quebrada ejerce una acción de dilución, y la precipitación que cae en el resto de la cuenca moviliza sales solubles tomadas a partir de los árboles, hojarasca y el horizonte A del suelo. De esta manera se elevan rápidamente las concentraciones dentro de las quebradas durante los eventos de inundación o de exceso de escorrentía.

Las fuentes para el magnesio y potasio pueden ser biológicas, ya que cuando la hojarasca es lavada por la lluvia se pueden liberar estos elementos y ser llevados a las quebradas, mientras que cuando se dan las condiciones de flujo base estos iones son almacenados como sales solubles en la parte superior del perfil del suelo y no contribuyen a la composición del agua de las quebradas (**Cleaves et al.**, 1970).

Por otra parte, también debe considerarse la removilización de iones introducidos por la precipitación seca. Esta removilización es subvalorada la mayoría de las veces, ya que los dispositivos utilizados para muestrear no tienen la capacidad de retener cantidades representativas del material particulado y de aerosoles que sí pueden ser rete-

nidos por la vegetación en una zona boscosa como la de San Miguel. En efecto, las variaciones de pH entre el promedio con el cual llega el agua lluvia en el Alto San Miguel (5,0) y el valor promedio del pH para el agua del río (7,3), aparentemente indican que hay una ganancia de elementos que neutralizan el agua lluvia al entrar en contacto con la vegetación, el suelo y/o la roca parental.

Relaciones entre la composición química del agua y la litología de la cuenca

Los valores obtenidos para las relaciones $K^+/(K^++Na^+)$ y $Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Ca^+)$ en el agua del río Medellín son mucho menores que para los esquistos cuarzo-sericíticos que componen la cuenca (Tabla 3). Esto indica que la carga catiónica del agua del río Medellín, comparada con la composición de las rocas de la cuenca, está enriquecida en Na^+ con respecto a K^+ y en Ca^+ con respecto a Mg^{2+} . Estos resultados son similares a los encontrados por **Stallard & Edmond** (1983) en la cuenca del Amazonas para ríos que drenan rocas silíceas en terrenos donde el factor limitante para la erosión es la tasa de meteorización.

Si los procesos de erosión que remueven el material meteorizado son más rápidos que los procesos que lo generan, entonces la erosión está limitada por la tasa de meteorización y en este caso hay menor tiempo para que los productos físicos de la meteorización reaccionen con el agua subterránea y con el suelo, ya que apenas estén parcialmente meteorizados serán removidos (**Stallard y Edmond**, 1983).

Teniendo en cuenta estas observaciones, se encuentra que aparentemente la tasa de erosión de los productos solubles de la meteorización química en el Alto de San Miguel está limitada por la velocidad de generación de dichos productos.

El enriquecimiento en Na y Ca puede deberse a que el Mg y el K son utilizados como nutrientes por el bosque secundario, a que se encuentran en la estructura interna o son absorbidos por arcillas y/o a que en las rocas félsicas e intermedias se da un mayor remoción sobre los minerales constituidos por Ca y Na (**Stallard & Edmond**, 1983).

Balance geoquímico para el río Medellín en la Estación 2

En la cuenca del Alto San Miguel, al igual que en muchas otras estudiadas mediante balances geoquímicos (**Cleaves, et al.**, 1970; **Stallard & Edmond**, 1983; **Reynolds et al.**, 1987; **Geale & Hermelin**, 1991), se encuentra que predomina la salida de los cationes principales, del bicarbonato y de la sílice.

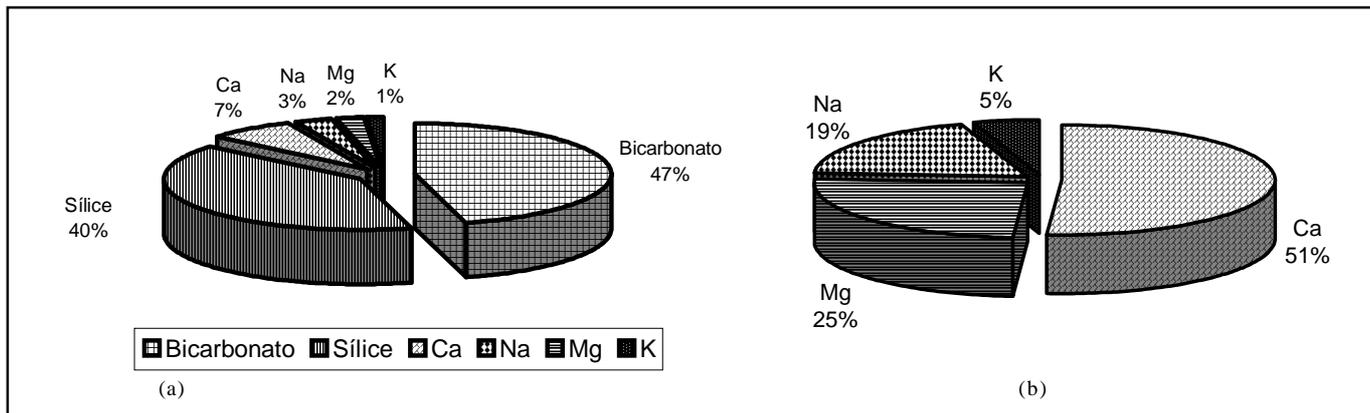


Figura 6. (a) Principales sólidos disueltos según balance geoquímico (a partir de datos en mg/l) y (b) Abundancia de los principales cationes según el balance geoquímico (a partir de los datos en mequivalentes/l)

En la Tabla 4 se observa que es mayor la cantidad de solutos que salen del área de estudio por medio de la escorrentía, que la cantidad de solutos que entraron originalmente en la lluvia. Así, al calcular el porcentaje de solutos que son aportados por el agua de escorrentía al balance geoquímico, se encuentra que éste corresponde a un 88% del total de sólidos disueltos (H_2CO_3 , SiO_2 , Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} , K^+) que salen de la cuenca. Esto parece indicar que la meteorización de la roca parental origina la mayor parte de los iones disueltos; sin embargo, es posible que algo de ese porcentaje sea aportado por la precipitación seca; aunque la magnitud de dicho aporte no se pudo cuantificar con la metodología utilizada en esta investigación.

Los datos del balance geoquímico también muestran que los sólidos disueltos están dominados por sílice, los cationes por calcio, y los aniones por bicarbonato (Figura 6a), la abundancia de los cationes principales en mequivalentes/l es $Ca > Mg > Na > K$ (Figura 6b).

Comparación de los resultados del balance geoquímico con otros promedios en el mundo: Con base en la distribución porcentual de los cationes mayores según el balance geoquímico (Figura 6b) y al utilizar la clasificación de Meybeck (1986) para aguas que drenan rocas plutónicas y metamórficas en Francia, se encuentra que las aguas en la Estación Río Medellín 2 son cálcicas, siendo $Ca > Mg > Na > K$.

El calcio, sodio, magnesio y potasio en el área de estudio constituyen el 51, 19, 25 y 5 % respectivamente del total de los cationes principales después de la corrección por el aporte atmosférico (Figura 6b). Al comparar estos valores con los porcentajes promedios obtenidos a escala mundial para estos elementos (57, 27, 11 y 5% respecti-

vamente) en rocas plutónicas y metamórficas (Meybeck, 1987), se observa que el porcentaje de K en la zona de la Reserva Ecológica del Alto de San Miguel es similar, los porcentajes de Ca y Na se reducen y el porcentaje de Mg se duplica (Figura 7).

Para Meybeck (1987), el orden en el que las rocas liberan cationes por meteorización es: Evaporitas > R. Carbonatadas > R. Volcánicas > R. Detríticas no calcáreas > R. Plutónicas > R. Metamórficas. Según este orden propuesto, las rocas plutónicas y metamórficas, que conforman la litología en la cuenca alta del río Medellín, son las que menos facilidad tienen para liberar cationes. A escala mundial se tiene un promedio de 270 mequivalentes/l para la sumatoria de los cationes mayores a partir de rocas metamórficas (Meybeck, 1987), mientras que en la cuenca estudiada el promedio es aún más bajo (167 mequivalentes/l).

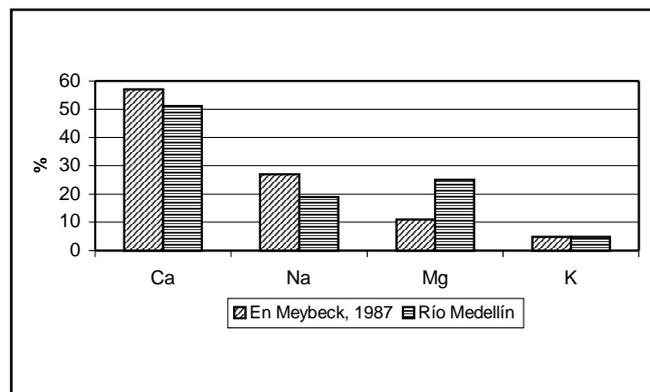


Figura 7. Comparación de los promedios mundiales para la sumatoria de los principales cationes (TZ+) (Meybeck, 1986) con respecto a los resultados del balance geoquímico en el río Medellín.

Tasas de meteorización

Las tasas de meteorización para los sólidos mayores disueltos en el río Medellín en kg/ha/año (Tabla 5), se determinaron con la Ecuación 5, al suponer las concentraciones encontradas en el balance geoquímico como las promedio en el río Medellín a lo largo del año:

$$T_m = \frac{C_s * Q * 31.536}{A} \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde:

T_m: Tasa de meteorización para el elemento seleccionado (en kg/ha/año).

C_s: Concentración promedio anual de uno de los sólidos que sale de la cuenca, a partir del balance geoquímico (mg/l).

Q: Caudal promedio anual, con base en los registros realizados en la Estación Río Medellín 2 (0,49 m³/s).

A: Área de la cuenca en estudio (1055 ha)

De acuerdo con lo ilustrado en la Tabla 5, la salida de los cationes mayores es de ~48 kg/ha/año y la de la sílice es de ~138 kg/ha/año.

Debido a la metodología inicialmente utilizada para evaluar la alcalinidad, es posible que la tasa de remoción

de bicarbonato para la zona de estudio esté subvalorada. Sin embargo al comparar con los datos de **Livingston** (1963), en los que la tasa promedio de remoción anual de bicarbonato a escala mundial para el área continental es de cerca de 190 kg/ha y para Norte América es de cerca de 150 kg/ha, se encuentra que la tasa promedio anual encontrada en la zona de estudio (158 kg/ha) está dentro del intervalo normal.

Comparación de tasas de meteorización: Se comparan a continuación las tasas de meteorización química encontradas para las rocas de la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel (esquistos predominantemente) (Tabla 5) con las tasas de meteorización obtenidas por **Geale & Hermelin** (1991) para rocas del Batolito Antioqueño (granodioritas y cuarzdioritas) en cuatro cuencas hidrográficas localizadas en la vertiente oriental de la Cordillera Central al NE de Medellín (Tabla 6), las tasas determinadas por **Williams** (1983) para la cuenca Narrator en Dartmoor (Inglaterra) para granitos, y las tasas de meteorización encontradas por **Reid et al.** (1981), para granitos y neises en la cuenca Glendye (Escocia) (Tabla 7).

Las tasas de meteorización química derivadas con base en sílice, Ca, Mg, Na y K en la zona de Reserva Ecológica del Alto San Miguel corresponden en promedio aproximadamente al 34, 26, 36, 15 y 19%, respectivamente, con relación a las tasas registradas para estos mismos elemen-

Tabla 5. Resultados del balance geoquímico y de las tasas de meteorización para los mayores sólidos disueltos.

| Parámetro | Alcalinidad Bicarbonato(mg/l) | Sílice (mg/l) | Ca (mg/l) | Mg (mg/l) | Na (mg/l) | K (mg/l) |
|--|----------------------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Balance Geoquímico | 10,79 | 9,45 | 1,71 | 0,52 | 0,71 | 0,33 |
| Salida de la cuenca kg/ha/año | 158 | 138,4 | 25 | 7,6 | 10,4 | 4,8 |

Tabla 6. Características generales y tasas de meteorización química para cuatro cuencas hidrográficas localizadas sobre el Batolito Antioqueño, determinadas por **Geale & Hermelin** (1991).

| Cuenca | Precipitación (*) (mm/año) | Altura Promedio (m.s.n.m) | Sílice | Ca | Mg | Na | K |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------|-------|------|-------|------|
| | | | kg/ha/año | | | | |
| Río Tafetanes | 4656 | 2050 | 370,3 | 79,3 | 20,7 | 51,5 | 28,7 |
| Río Calderas | 4656 | 1900 | 279,3 | 62,6 | 14,5 | 48,7 | 24,7 |
| Quebrada Jaguas | 3565,6 | 1150 | 599,8 | 159,7 | 33,5 | 106,6 | 33,5 |
| Quebrada Juanes | 4605,5 | 750 | 354,7 | 85,4 | 18 | 64,65 | 20,2 |

*Datos promedio 1984 – 1987 (Himat)

Tabla 7. Características generales y tasas de meteorización química para la cuenca Glendye en Escocia, localizada sobre granitos y neises (Reid et al, 1981) y para la cuenca Narrator en Inglaterra, localizada sobre granitos (Williams, 1983).

| Cuenca | Precipitación (mm/año) | Altura m.s.n.m | Sílice | Ca | Mg | Na | K |
|----------|---------------------------|-------------------|-----------|------|-----|-----|-----|
| | | | kg/ha/año | | | | |
| Glendye | 1375 | 542 | 82,4* | 17 | 5 | 9 | 2,9 |
| Narrator | 1628 | 234 | 92,5 | 11,4 | 2,3 | 6,7 | 3,1 |

* En Williams (1983)

tos en rocas del Batolito Antioqueño. Para estas rocas, el orden en que decrecen las tasas de meteorización en las cuatro cuencas es: Sílice > Ca > Na > K > Mg; en tanto que el orden para la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel es: Sílice > Ca > Na > Mg > K. Así, estas dos regiones se diferencian en las tasas de meteorización del K y del Mg; en la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel la tasa de meteorización del Mg es superior del K.

El orden en que decrecen las tasas de meteorización de la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel es similar al encontrado por Reid et al. (1981) para la cuenca Glendye (Tabla 7), que está subyugada principalmente por granito (74%) y neis (26%).

Las tasas de meteorización química derivadas con base en sílice, Ca, Mg, Na y K en Glendye corresponden aproximadamente al 28, 68, 66, 87 y 60%, respectivamente, con relación a las tasas registradas para estos mismos elementos en la zona de Reserva Ecológica del Alto San Miguel. Así, se encuentra que la tasa de meteorización química para esquistos determinada en la zona de Reserva está relativamente más cercana a la tasa a la que se meteorizan granitos y neises en Escocia, que a la tasa a la que se meteorizan dioritas y granodioritas en el Oriente Antioqueño.

Movilidad relativa

Con base en la fórmula de Feth et al. (1964) se puede calcular la movilidad relativa de un elemento por medio de la siguiente ecuación:

$$Mr = \frac{Tm}{Pr} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

donde:

Mr: Movilidad relativa de un elemento i.

Tm: Tasa de meteorización para el elemento i (en kg/ha/año).

Pr: Porcentaje del elemento i en la roca fresca.

Al aplicar la Ecuación 6, el orden de movilidad relativa para los principales sólidos disueltos en la zona de

Reserva Ecológica en el Alto San Miguel es: Ca > Mg > Sílice > Na > K, mientras que en Glendye, Narrator y en las cuatro cuencas sobre Batolito Antioqueño, el orden de movilidad es:

| | | | | | | | | | |
|--------------|----|---|----|---|----|---|--------|---|----|
| Glendye | Ca | > | Mg | > | Na | > | Sílice | > | K |
| Narrator | Ca | > | Na | > | Mg | > | Sílice | > | K |
| R. Calderas | Na | > | K | > | Ca | > | Sílice | > | Mg |
| R. Tafetanes | Na | > | K | > | Ca | > | Sílice | > | Mg |
| R. Jaguas | Na | > | Ca | > | K | > | Sílice | > | Mg |
| R. Juanes | Na | > | Ca | > | K | > | Sílice | > | Mg |

De manera similar a lo observado para las tasas de meteorización, el orden de movilidad relativa encontrado para la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel es más semejante al orden para la cuenca Glendye (Escocia) que para las otras cuencas.

Conclusiones

Los suelos en la cuenca alta del río Medellín aparentemente no tienen la capacidad de suministrar los nutrientes que necesita la biomasa para su desarrollo, lo que causa que se presente en la zona de la Reserva Ecológica del Alto de San Miguel un proceso de reciclaje de nutrientes similar al que ocurre en los suelos de la cuenca inferior del Amazonas.

Los registros de pH obtenidos en el presente estudio parecen confirmar la hipótesis según la cual sobre el Alto de San Miguel circulan, a intervalos de tiempo variables, masas de aire contaminadas procedentes del Valle de Aburrá.

Las concentraciones de los principales sólidos disueltos estudiados en la cuenca alta del río Medellín permanecieron prácticamente uniformes durante el período de muestreo, lo que parece indicar que esta cuenca está autoequilibrada, es decir, que las concentraciones no pre-

sentan disminución ni aumento significativos con las variaciones en el caudal.

Las aguas del río Medellín en la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel son alcalinas, la sílice es el sólido disuelto más abundante; los cationes están dominados por el calcio y los aniones por el bicarbonato. Estos resultados son similares a los encontrados para la mayoría de aguas dulces del mundo.

La carga catiónica del agua del río Medellín, comparada con la composición de las rocas de la cuenca, está enriquecida en Na^+ con respecto a K^+ y en Ca^+ con respecto a Mg^{2+} .

Aparentemente la tasa de erosión de los productos solubles de la meteorización química en el Alto de San Miguel está limitada por la velocidad de generación de dichos productos.

En el balance geoquímico se observó que es mayor la cantidad de solutos que salen del área de estudio en la escorrentía que la cantidad de solutos que entraron originalmente en la lluvia. Así, se estimó que la escorrentía aporta el 88% de los principales sólidos disueltos que salen de la cuenca (H_2CO_3 , SiO_2 , Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} , K^+). Esto parece indicar que la meteorización de la roca parental origina la mayor parte de los iones disueltos.

La sumatoria total promedio de cationes en las aguas del río Medellín, zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel, es inferior a los promedios mundiales. Por su parte, al comparar los porcentajes en que se encuentran los cationes principales en las aguas del río Medellín, después de realizada la corrección por el aporte atmosférico, con los porcentajes promedios obtenidos a escala mundial para ríos que drenan rocas plutónicas y metamórficas, se observa que el porcentaje de K en la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel es similar, que los porcentajes de Ca y Na se reducen y que el porcentaje de Mg se duplica.

La tasa de remoción de bicarbonato para la zona de estudio es de ~158 kg/ha/año, la de la sílice es de ~138 kg/ha/año y la de los cationes mayores es de ~48 kg/ha/año. Estas tasas se acercan más a las obtenidas para la meteorización química de granitos y neises en Escocia que a las obtenidas para granodioritas y cuarzdioritas en el Oriente Antioqueño.

El orden de movilidad relativa para los principales sólidos disueltos en la zona de Reserva Ecológica del Alto de San Miguel es: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Sílice} > \text{Na} > \text{K}$, y es similar al orden encontrado en la cuenca Glendye (Escocia).

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias, Instituto Mi Río y Universidad EAFIT por patrocinar esta investigación. Igualmente a CORNARE, y a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a la realización de esta investigación.

Bibliografía

- Aguilar, E. & Loaiza, J.**, 2001. Monitoreo de los Procesos Geomorfológicos y Estudio del Balance Hidrológico y Geoquímico en el Área de la Reserva Ecológica del Alto de San Miguel, Municipio de Caldas, Departamento de Antioquia. Informe interno: Edafología, Universidad EAFIT, Medellín, 27p.
- APHA, AWWA & WPCF**, 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater (16th edition). Port City Press, Baltimore, 1268p.
- Cadavid, N; Arroyave, R; Herrán, J; Medina, J; Ossa, C; Saldarriaga, G & Valencia, G.**, 2000. Caracterización Físicoquímica de la Precipitación en el Centro de Antioquia. Informe Final. CORANTIOQUIA – Universidad EAFIT, Medellín, 41p.
- Cleaves, E; Godfrey, A. & Bricker, O.**, 1970. Geochemical balance of a small watershed and its geomorphic implications. Geological Society of American Bulletin, **81**: 3015-3032.
- Drever, J.**, 1997. The Geochemistry of natural waters. Surface and groundwater environments. Prentice Hall: Upper Saddle River, New Jersey, 436p.
- Drever, J. & Clow, D.**, 1995. Weathering rates in catchment. In A. White and S. Brantley (Eds.), Chemical weathering rates of silicate minerals. Mineralogical Society of America, Washington, p 463-483.
- Espinal, S.**, 1977. Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia. Memoria explicativa sobre el Mapa Ecológico. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección Agrológica. Bogotá D.E. **23** (11): 238p.
- Feth, J; Robertson, C. & Poltzer, W.**, 1964. Sources of mineral constituents in waters from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada: U.S.G.S Water Supply Paper 1535 – I, 70p.
- Geale, B. & Hermelin, M.**, 1988. Influencia de la meteorización química en la composición de las aguas superficiales del Batolito Antioqueño. En J. Valdiri, (Ed.), II Simposio Colombiano de Hidrogeología. Memorias. Bogotá, p 129-150.
- Geale, B. & Hermelin, M.**, 1991. Meteorización química del Batolito Antioqueño en la zona de San Carlos, Departamento de Antioquia. Universidad EAFIT. Departamento de Geología. Medellín, 121p.
- Hem, J.**, 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (3rd Edition). U.S.G.S. Water Supply Paper 2254.
- Hornung, M; Adamson, J; Reynolds, B. & Stevens, P.**, 1986. Influence of mineral weathering and catchment hydrology on drainage

- water chemistry in three upland sites in England and Wales. *Journal of the Geological Society, London*, **143**: 627 - 634.
- IDEAM**. Registros pluviométricos Estación La Salada (Caldas, Antioquia), 1983-2001.
- IGAC**, 1979. Suelos del Departamento de Antioquia. Subdirección agrícola, Bogotá, 1557p.
- Langmuir, D.**, 1997. Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, 600p.
- Livingston, D. A.**, 1963. Chemical composition of rivers and lakes, data of geochemistry (6th edition): U.S. Geol. Survey Professional. Paper – 440 - G, P. G1 – G64.
- Meybeck, M.**, 1986. Composition chimique naturelle des eaux courantes françaises: Strasbourg. *Sci. Géol. Bull.*, **39**: 3-77.
- Meybeck, M.**, 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, **287**: 401-428.
- Montoya, M.**, 2001. Monitoreo de los procesos geomorfológicos y estudio del balance hidrológico y geoquímico en el área de la Reserva Ecológica del Alto de San Miguel, Municipio de Caldas, Departamento de Antioquia. Informe interno: Algunos aspectos sobre la cobertura y la vegetación de la Reserva Alto de San Miguel, Universidad EAFIT, Medellín, 8p.
- Noreña, J. & Patiño, J.**, 1984. Estudio de las rocas metamórficas en la parte sur del municipio de Caldas – Antioquia. Trabajo de grado ingeniería de geología, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 154p.
- Reid, J; Macleod, D. & Cresser, M.**, 1981. The assessment of chemical weathering rates within an upland catchment in North-East Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **6**: 447-457.
- Restrepo, J; Toussaint, J; González, H. & Linares, E.**, 1981. Datación de metasedimentos del grupo Ayurá – Montebello. *Boletín de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional de Colombia, Medellín*, Nos. 5-6, p 33 - 37.
- Reynolds, B; Hornung, M. & Stevens, P.**, 1987. Solute budgets and denudation rate estimates for a Mid – Wales catchment. *CATENA*, **14** (1 y 2): 13 - 23.
- Stallard, R. & Edmond, J.**, 1983. Geochemistry of the Amazon. 2. The influence of the geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal of Geophysical Research*, **88** (C14): 9671-9688.
- Strahler, A.**, 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Trans.* **38** (69): 913-920.
- Williams, A.** 1983. Solutes pathways in the Narrator catchment, Dartmoor. Ph.D. Thesis. Department of Geographical Sciences, Plymouth Polytechnic, England, 374p.