

Obtención del Contenido Isotópico de las Aguas y Construcción de una Línea Meteorica Local en un Ambiente de Alta Montaña.

R.D. Londoño* & G. Monsalve

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

C. Ortiz, M.V. Vélez

Servicios Hidrogeológicos Integrales SHI, Medellín, Colombia.

* *Email de correspondencia: rdlondona@unal.edu.co*

RESUMEN: En este trabajo se presenta el análisis de una red de muestreo isotópico con 7 puntos de aguas lluvias, 10 puntos de aguas superficiales y 5 de aguas subterráneas, en una zona de alta montaña ubicada en el flanco oriental de la cordillera central Colombiana, donde el sistema hidrogeológico es conformado por rocas cristalinas fracturadas. Se presenta además el análisis que se practicó a los resultados de contenido isotópico de las muestras recolectadas durante una campaña de muestreo, la línea meteorica local obtenida para la zona de estudio con base en un ajuste lineal de los resultados de las muestras de aguas lluvias y, finalmente, el análisis del origen de las aguas subterráneas y superficiales con base en la línea construida.

PALABRAS CLAVE: Hidrología isotópica, Isótopos ambientales, Línea Meteorica Local.

ABSTRACT: This paper we present an analysis of isotopic sampling grid with 7 rainwater points, 10 surface water points and 5 groundwater points in an area of high mountain located on the eastern flank of the Central Cordillera of Colombia, where the hydrogeological system is composed of fractured crystalline rocks. It also presents the analysis performed on the results of isotopic content of the samples collected during a sampling campaign, the local meteoric line obtained for the study area based on a linear fit of the results from samples of rainwater and finally, the analysis of the origin of groundwater and surface water based on the line built.

KEYWORDS: Isotope Hydrology, Environmental Isotopes, Local Meteoric Line.

1 INTRODUCCIÓN

Las primeras aplicaciones sistemáticas de los isótopos estables en las aguas naturales fueron estimuladas por Craig (1961) quien mostró diferencias sistemáticas a escala global en la composición isotópica de la precipitación, y construyó una línea meteorica mundial, posteriormente en base al monitoreo hecho por el Organismo Internacional de Energía Atómica (Clark & Fritz, 1997), se construyó una nueva línea meteorica mundial.

En años recientes las técnicas basadas en los isótopos ambientales han sido ampliamente utilizadas para todo desarrollo y manejo de recursos hidráulicos, ya que son de gran utilidad en investigaciones acerca del origen del agua subterránea, zonas de recarga, direcciones de flujo, patrones de mezcla y vulnerabilidad a la contaminación (Vélez & Rhennals, 2008).

Determinar el área de recarga del sistema es posible siempre que se conozcan las variaciones isotópicas de las precipitaciones y de las aguas superficiales dado que los procesos naturales más importantes que hacen variar la composición isotópica estable de las aguas naturales son la evaporación y la condensación.

En este trabajo se presenta la aplicación de técnicas isotópicas a un sistema hidrogeológico de alta montaña en el departamento de Tolima, Colombia; que comprende el diseño de una red de muestreo, conformada por puntos de aguas lluvias, superficiales y subterráneas, y la puesta en marcha de un plan de muestreo que permita establecer la variación de las variables isotópicas en el tiempo. Se presentan además los resultados obtenidos para una campaña de muestreo realizada en octubre de 2011, incluyendo una línea meteorica local para la zona de estudio y su análisis con miras a establecer relaciones entre las aguas buscando entender la dinámica del sistema hi-

drogeológico. Finalmente se concluye que es necesario continuar con el plan de muestreo establecido (muestreos mensuales por 12 meses) y plantear un rediseño de la red presentada para conseguir capturar la dinámica del sistema.

2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio de esta investigación se localiza al occidente del departamento del Tolima (Colombia), sobre el flanco oriental de la cordillera central y está definida como la cuenca hidrográfica del río Bermellón aguas abajo de la desembocadura de la quebrada La Guala con un área aproximada de 60 km²; esta cuenca forma parte del sistema hidrológico del río Coello, afluente del río Magdalena y presenta una precipitación media anual de 1798 [mm/año] y una temperatura media de 11.4 [°C], variando entre 7 y 16 [°C] de las zonas más altas a las más bajas. Una característica importante de la zona son sus fuertes gradientes orográficos con alturas que varían entre los 2130 y 3640 [msnm], con pendientes cercanas a los 75°.

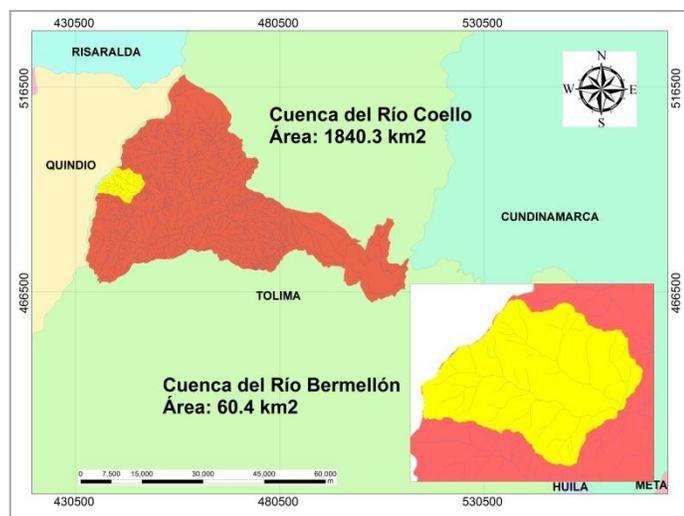


Figura 1. Ubicación zona de estudio

La mayor parte del área está conformada por esquistos, plegados y fallados; también existen cuerpos hipoabisales intrusivos y depósitos piroclásticos superficiales que cubren toda el área de estudio con un espesor variable a excepción de los cauces de las corrientes superficiales. Las geformas en la zona son resultado de la evolución tectónica compleja que ha tenido lugar allí, dejando como resultado afloramientos rocosos, taludes de grandes pendientes y la presencia de paquetes de cenizas volcánicas. Las corrientes superficiales presentan cauces incisivos, generalmente rectos y de alta pendiente. Es de esta

manera que se tiene un sistema hidrogeológico conformado por rocas cristalinas fracturadas bajo una capa de depósitos piroclásticos de espesor variable. En la figura 1 se presenta la ubicación general de la zona de estudio.

3 METODOLOGÍA

Como parte de la formulación de un modelo hidrogeológico conceptual de la zona se utilizan técnicas isotópicas con el fin de establecer la red de flujo de agua subterránea, determinar zonas potenciales de recarga y diferenciar posibles flujos locales, regionales e intermedios. Como primer paso se hace la construcción de una red de muestreo de aguas lluvias en la zona de estudio para la construcción de la línea meteórica local, para tal efecto se hace la instalación de 7 totalizadores, que se encargan de recolectar y proteger una muestra representativa de agua de precipitación, de manera distribuida sobre toda la cuenca cuidando conservar una diferencia de cota cercana a los 500 m y evaluar adecuadamente el efecto altitudinal en el contenido isotópico de la lluvia. En la figura 2 se presenta la ubicación de estos dispositivos en planta y en perfil.

Dado que el objetivo principal es conocer la dinámica del sistema hidrogeológico y su interacción con el sistema superficial y atmosférico, los puntos de aguas lluvias se complementan con 10 puntos de aguas superficiales y 5 de aguas subterráneas distribuidos como se muestra en la figura 2, escogidos en función a la facilidad de acceso y la representatividad dentro de la zona de estudio.

Adicional a la red de muestreo, se diseña un plan de muestreos mensuales por un periodo de un año, con el fin de detectar variaciones temporales de la dinámica hidrogeológica, es por esto que la red presentada es susceptible a cambios. Las muestras tomadas en campo fueron enviadas al laboratorio de calidad ambiental “Morrosquillo” de CARSUCRE (Colombia). Además de la toma de muestras se hace la medición en campo de los parámetros pH, conductividad eléctrica y temperatura y se mide la cantidad de agua almacenada por cada totalizador, a pesar que éstos no se encuentran normalizados para determinar lámina de precipitación. En este trabajo se presenta el análisis realizado a las muestras tomadas durante una sola campaña de campo (octubre de 2011), dado que aún se encuentra en ejecución el plan de muestreo propuesto, este análisis sirve para validar el diseño de la red o realizar ajustes necesarios a fin que la isotopía pueda arrojar información acerca del sistema hidrogeológico.

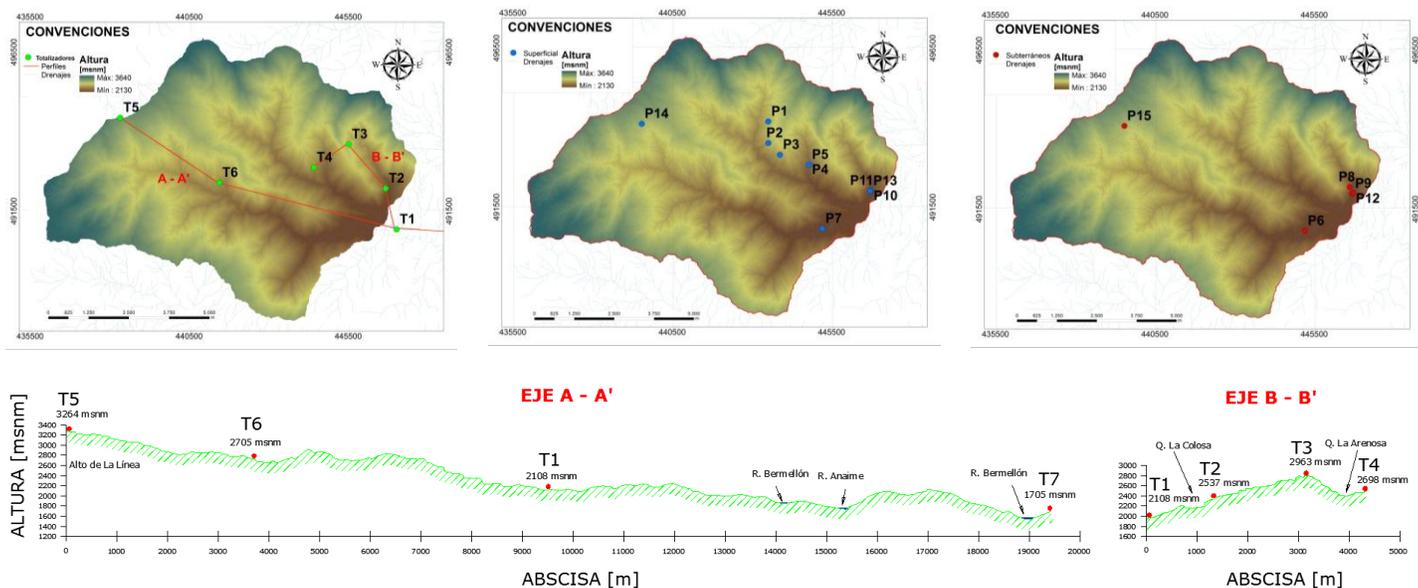


Figura 2. Distribución de los puntos de muestreo de agua lluvia (arriba-izquierda), agua superficial (arriba-centro) y agua subterránea (arriba-derecha), los perfiles A-A' y B-B' donde están los totalizadores se presentan en la parte inferior.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se analizan los resultados obtenidos durante la campaña de muestreo comprendida entre el 15 y 16 de octubre de 2011, las muestras de aguas lluvias son representativas de todo el mes anterior a la fecha del muestreo. Se ofrece un análisis de contenido isotópico encontrado en los distintos puntos y un análisis a los parámetros de campo.

4.1 Contenido Isotópico y Línea Meteorica Local.

Se encontró una variación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para la precipitación entre -15.18% y -9.00% y entre -108.79% y -59.08% , respectivamente, presentándose una variación lineal dada por la ecuación $\delta^2\text{H} [\text{‰}] = 7.974 \cdot \delta^{18}\text{O} [\text{‰}] + 9.930$ ($r^2 = 0.9861$), esta expresión representa la línea meteórica local (LML) y se muestra en la figura 3, no existen grandes variaciones entre la expresión para la LML y la expresión para la línea meteórica mundial (LMM) dada por Craig (1961), o la encontrada con base en el monitoreo hecho por el Organismo Internacional de Energía Atómica (Clark & Fritz, 1997), así mismo el resultado es consistente con la línea meteórica para Colombia construida por Rodríguez (2004).

En cuanto al contenido isotópico para las aguas superficiales y subterráneas, el rango de variación es un poco más estrecho, permaneciendo el $\delta^{18}\text{O}$ entre -12.53% y -10.04% y el $\delta^2\text{H}$ entre -92.85% y -71.58% , ningún punto presenta variaciones representativas de la LML y no es posible realizar un

contraste significativo entre aguas subterráneas y superficiales; sin embargo los resultados de todos los puntos graficados sobre la LML, tal como se muestra en la figura 3, permiten hacer una distinción de tres grupos de agua (denominados A, B, C).

Por un lado el grupo denominado “A” está conformado por aguas muy empobrecidas, en esta caso solamente aguas lluvias, y corresponden específicamente a los totalizadores T5 y T6 ubicados en la parte más alta del eje A - A', cómo se muestra en la figura 2, uno de ellos está en el Alto de La Línea (divisoria de la cordillera central en este tramo) y otro se ubica un poco más abajo. Ningún punto de agua superficial o subterránea muestreado presenta un contenido isotópico similar al de estas aguas lluvias, por lo cual se puede concluir que ninguno de los puntos en cuestión tienen su origen en precipitaciones ocurridas en la parte alta del río Bermellón.

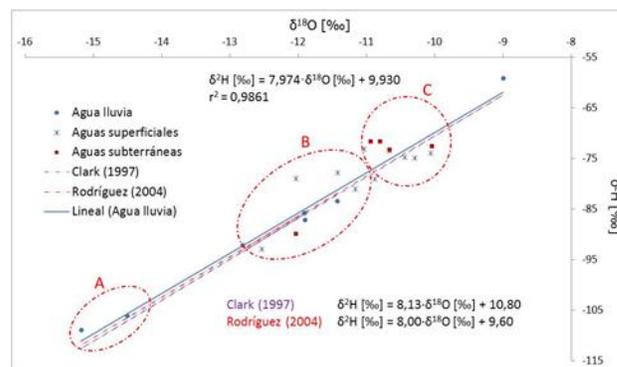


Figura 3. Línea meteórica local (LML) para la zona de estudio y resultados del contenido isotópico para todas las muestras.

El grupo denominado “B”, está conformado por aguas cuyo contenido isotópico se encuentra en la zona media de la LML, particularmente se tienen 4 puntos de aguas lluvias T1, T2, T3 y T4, todos estos puntos se localizan en la zona de influencia de la quebrada La Guala en el eje B - B' como se muestra en la figura YY; es de resaltar la presencia de puntos tomados sobre dos afluentes importantes de la quebrada La Guala (quebradas La Colosa y La Arenosa, P11 y P4 respectivamente) que pueden estar sujetos a procesos de mezcla de aguas, a pesar de ser afluentes superficiales importantes no se evidencia evaporación en tanto que dichos puntos no se encuentran más empobrecidos a lo que indica la LML. De igual manera se encuentran dentro de este grupo un punto superficial y otro subterráneo, P14 y P15 respectivamente, ubicados en cercanías al Alto de La Línea, más cerca incluso de los puntos de aguas lluvias P5 y P6, lo que sugiere que no son resultado de la precipitación local; también se tiene que estos puntos pudieron verse afectados por el proceso de evaporación (en cuanto se ubican a la derecha de la LML), lo que permite deducir que el punto subterráneo encontrado es resultado de origen sub-superficial y que tiene una estrecha relación con el punto superficial.

Finalmente, el grupo “C”, con contenidos isotópicos menos empobrecidos, no contiene puntos de agua lluvia en cambio a éste pertenecen 6 puntos de aguas superficiales y 4 puntos de aguas subterráneas, que pueden ser divididos en dos cuencas distintas, ambas conformadas por afluentes importantes de la quebrada La Guala. La cercanía de todos los puntos a la LML es un indicativo de que la respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación es muy rápida y aunque no es posible relacionar todos los puntos con las aguas lluvias que cae en cercanía de ellos se puede concluir que el flujo superficial y sub-superficial es una respuesta clara a los eventos de precipitación y no obedece a procesos de almacenamiento y descarga importantes, esta conclusión es conforme a las fuertes pendientes que se encuentran en la zona.

4.2 Conductividad eléctrica medida en campo.

Cómo se mencionó anteriormente durante las campañas de muestreo se realiza la medición de parámetros de campo: pH, temperatura (T) y conductividad eléctrica (CE), éste último parámetro en particular ofrece información muy relevante en cuanto al ambiente geológico en que estuvo el agua, dada la existencia de una correlación directa entre la CE y el total de iones disueltos, que incluso es lineal para valores de iones disueltos superiores a 50 meq/l (Mazor, 2004). De acuerdo a los resultados

obtenidos en campo existe una relación importante entre la altura y la CE para los puntos muestreados como se muestra en la figura 4, los resultados de los puntos P4 y P11 (afluentes importantes de la quebrada La Guala) pueden ser excluidos porque al ser corrientes relativamente grandes son el resultado de un proceso de mezcla.

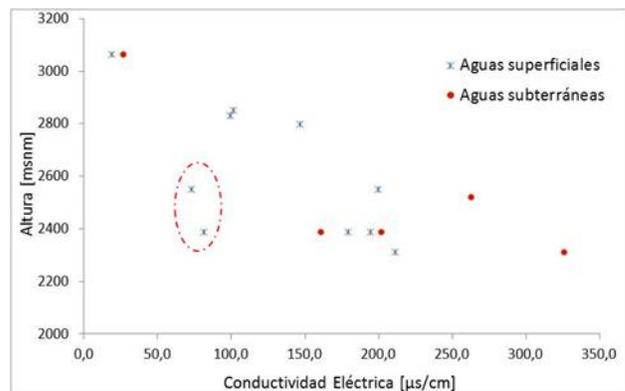


Figura 4. Relación conductividad eléctrica [µs/cm] con la altura [msnm].

Adicional a esto se explora la relación existente entre el contenido isotópico de los distintos puntos y el valor de CE, se obtiene que para el $\delta^{18}\text{O}$ existe una relación lineal con la altura como se muestra en la figura 5, en cuanto al $\delta^2\text{H}$ se obtiene que es posible sectorizar las aguas, el grupo I conformado por las agua más empobrecidas en $\delta^2\text{H}$ y con las menores CE corresponden con los puntos P14 y P15 ubicados en la parte alta del río Bermellón, dentro del grupo II se ubican los puntos P1, P2, P4 y P11, todos correspondientes a aguas superficiales, finalmente el grupo III contiene los puntos restantes, para estos puntos el contenido de $\delta^2\text{H}$ no varía con la CE de los mismos.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de técnicas isotópicas se constituye en una pieza muy importante durante la construcción de modelos hidrogeológicos, dado que permiten establecer la relación existente entre las aguas lluvias, superficiales y subterráneas, sin embargo sólo el monitoreo continuo y cuidadoso de estas variables conduce a resultados confiables y concluyentes.

Al graficar los puntos muestreados sobre la LML es posible clasificar las aguas en tres grupos distintos de acuerdo a su contenido isotópico, llamados A, B y C desde las aguas más empobrecidas a los menos empobrecidos.

El grupo A sólo está conformado por aguas lluvias y no posee relación con las aguas superficiales y subterráneas muestreadas, incluso con las más cercanas. Se resalta que el punto de aguas lluvias T3 se encuentra por encima del punto T6, y sin

embargo dicho punto no se encuentra tan empobrecido, esto puede deberse a que el punto T3 no es ubicado en la zona de influencia directa del río Bermellón sino de la quebrada La Guala.

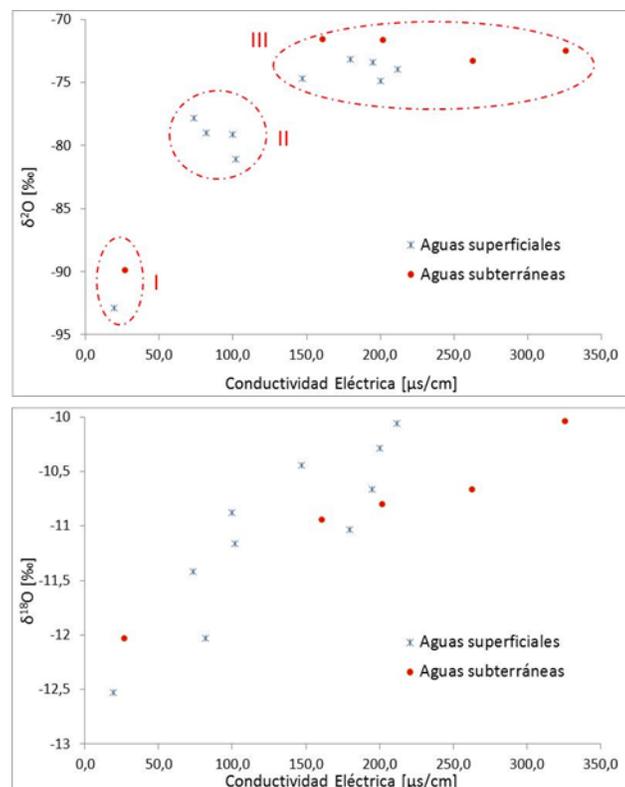


Figura 5. Relación entre la conductividad eléctrica [μ s/cm] y el contenido isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{2}\text{H}$.

En el grupo B se encuentran 4 puntos de aguas lluvias, ubicados en la cuenca de la quebrada La Guala a excepción de T1, en este grupo se ubican los puntos de dos afluentes importantes, que por su tamaño pudieron ser sujetos a mezclas de distintos tipos de agua y puntos ubicadas cerca a La Línea, que no pueden ser vinculados directamente con lluvias ocurridas en el Bermellón o La Guala.

Por otro lado, el grupo C no contiene puntos de agua lluvias, solo subterránea y superficiales, a pesar de su cercanía a totalizadores en el área no se pueden vincular a eventos de precipitación locales, pero su cercanía a la línea meteórica indica que la respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación es muy rápida y el flujo superficial y sub-superficial es una respuesta clara a eventos de precipitación y no obedece a procesos de almacenamiento y descarga importantes.

Finalmente se pudo comprobar que la variación de la conductividad eléctrica y la altura de muestreo muestra una tendencia lineal, y que el contenido isotópico guarda también una relación lineal con la conductividad, siendo posible incluso separar grupos de acuerdo a la variación de $\delta^2\text{H}$ y CE, pero debido a la cantidad de datos no es posible realizar un análisis detallado de esto.

A modo de recomendación se sugiere seguir con el plan de muestreo para obtener más datos y realizar un análisis más concluyente, es necesario

realizar ajustes a la red de muestreo y se considera necesario ubicar puntos de muestreo de agua lluvia en la parte alta de la quebrada La Guala y al otro lado de la divisoria de aguas en el norte de la zona de estudio. De igual manera implementar puntos de agua superficiales (en cuerpos pequeños) en partes más bajas y en la zona de influencia directa del río Bermellón para determinar el punto de salida de las aguas infiltradas en la Línea.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la empresa AngloGold Ashanti de Colombia por su apoyo logístico durante las campañas de muestreo y permitirnos hacer uso de la información isotópica recolectada para ellos. Este trabajo se realiza en el marco del desarrollo del proyecto “Monitoreo Hidrogeológico del Proyecto de Exploración Minero La Colosa”.

7 REFERENCIAS

- Clark, I. & Fritz, P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis, Boca Raton. 328 pp.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, 1702–1703.
- Mazor, E. 2004. Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. Marcel Decker. New York, 470 pp.
- Rodríguez, N. 2004. Línea isotópica meteórica de Colombia. Meteorología Colombiana 08, 43-51.
- Vélez, M. & Rhendals, R. 2008. Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe de Antioquia. Boletín de ciencias de la tierra 24, 37-54.