

DETERMINACIÓN DE LA RECARGA CON ISÓTOPOS AMBIENTALES EN LOS ACUÍFEROS DE SANTA FE DE ANTIOQUIA

María Victoria Vélez O. & Remberto Luis Rhenals G.
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

vvelez@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 08 de Octubre de 2008 / Aceptación: 04 de Noviembre de 2008 / Recibida versión final: 20 de Noviembre de 2008

RESUMEN

La zona del Occidente antioqueño, conformada por los municipios de Santa Fé de Antioquia, Sopetrán, San Jerónimo, Olaya y Liborina, es una de las principales zonas turísticas del departamento de Antioquia. Debido a esto, existe una importante demanda de agua que se ha incrementado con el aumento de la actividad turística propiciada por la construcción del proyecto «Conexión Vial entre los valles de Aburra y del Río Cauca». A pesar que esta zona posee varias fuentes hídricas superficiales, estas no abastecen completamente las necesidades del recurso hídrico ya que están contaminadas por lixiviados y residuos de la actividad agrícola, pecuaria y humana. Esto convierte el agua subterránea en una importante fuente de agua adicional y una gran alternativa para satisfacer la creciente demanda. La Universidad Nacional (2004) hizo un trabajo preliminar donde se identificaron zonas acuíferas con buen potencial para el abastecimiento de agua potable. Para la construcción de un modelo hidrogeológico, condición necesaria para el manejo y aprovechamiento óptimo del agua subterránea, se hace necesario además identificar las zonas de recarga de los acuíferos. Una de las herramientas más ampliamente usadas para este fin son los isótopos ambientales deuterio, H^2 y O^{18} . Se presentan en este trabajo los resultados de la utilización de estos isótopos para determinar las zonas de recarga de los acuíferos del Occidente antioqueño.

PALABRAS CLAVES: Isótopos ambientales, Recarga, Acuíferos, Aguas subterráneas.

ABSTRACT

The area of western Antioquia, formed by the towns of Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, San Jerónimo, Olaya and Liborina, is the most important tourist area of the department of Antioquia. Because of this, there is a strong demand for water that has increased with the increase in tourist activity prompted by the construction of the project «Connecting Road between Aburrá Valley and Cauca River.» Although this area has several sources of surface water, they do not fully satisfy the needs of water resources because they are contaminated by waste and leachate from farming, livestock and humans. This makes groundwater a mayor source of additional water and a great alternative to meet the growing demand. The National University of Colombia (2004) made a preliminary work which identified areas with good potential aquifers for drinking water. To build a hydrogeological model, a necessary condition for the management and optimum utilization of ground water, is to identify areas of aquifer recharge. One of the tools most widely used for this purpose are the environmental isotopes deuterium, H_2 and O^{18} . This paper presents the results of using these isotopes to determine areas of aquifer recharge the West Antioquia.

KEY WORDS: Aquifer, groundwater, Environmental isotopes, Recharge.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas isotópicas se han aplicado en hidrología e hidrogeología a nivel mundial durante más de 50 años, constituyéndose en una herramienta muy valiosa para la investigación y la solución de problemas relacionados con el medio ambiente y la ingeniería. Los isótopos ambientales, presentes en la naturaleza como resultado de procesos naturales o por las actividades antrópicas y que se presentan en gran abundancia, (entre ellos se encuentran: H, C, N, O y S.) son básicamente de dos tipos: isótopos estables e isótopos radiactivos o inestables y son actualmente utilizados como herramientas de rutina para resolver problemas en hidrología e hidrogeología (Clark & Fritz, 1997; Kendall & McDonnell, 1998; Cook & Herezeg, 2000) ya que son de muchísima utilidad en las investigaciones donde el origen del agua subterránea, zonas de recarga, direcciones de flujo, patrones de mezcla y la vulnerabilidad a la contaminación son tópicos a descubrir. La utilización de isótopos inestables o radiactivos esta orientada hacia temas como la edad del agua y las tasas de renovación, entre otros.

En Colombia se han realizado algunos estudios que involucran técnicas isotópicas a nivel investigativo y como herramienta de apoyo para la solución de problemas hidrogeológicos locales y regionales, entre los que se encuentran aplicaciones como la determinación de escapes en redes de acueducto y alcantarillado (Rodríguez, 1977), identificación del origen del agua subterránea para la solución de problemas geotécnicos (Rodríguez, 1977b; 1977c; 1990; Hoyos, 1990), estudios hidrogeológicos regionales y modelamiento de acuíferos (Gómez & Anaya, 2004; Díaz-Granados, 1988; Veloza, 2002), estudios isotópicos de la precipitación (Rodríguez, 2004; Salazar, 1996, estudios orientados a la gestión de los recursos hídricos (UNAL, 1997).

Los isótopos del agua, ^2H (Deuterio, D) y ^{18}O (Oxígeno 18), son muy útiles debido a su comportamiento conservativo (constituyentes de la molécula de agua) y a la gran variabilidad de sus relaciones isotópicas $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

En 1961, Harmon Craig encuentra una relación lineal entre el ^{18}O y ^2H para las aguas superficiales a escala global y la denomina «Craig's global meteoric water line» (Línea de Agua Meteórica Global de Craig), representada por la siguiente ecuación:

$$\delta^2 H = 8\delta^{18} O + 10\% \text{ smow} \quad (1)$$

Donde, $\delta^2\text{H}$ es la relación isotópica de Deuterio y $\delta^{18}\text{O}$ es la relación isotópica de Oxígeno-18.

Siendo el estado líquido del agua en el mar uno de los pasos del ciclo hidrológico, y que este contiene el 98% del agua líquida presente en la superficie de la tierra, su composición promedio se ha tomado como el estándar o patrón internacional (SMOW, Standard Mean Ocean Water) para el análisis de información isotópica. Toda concentración de isótopos estables en la molécula de agua se presenta entonces como la desviación delta (δ) con referencia al patrón antes mencionado, de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{R - R_{SMOW}}{R_{SMOW}} \quad (2)$$

Donde R es la llamada relación isotópica y representa el cociente entre los isótopos estables, ya sea del hidrógeno ($^2\text{H}/^1\text{H}$) o del oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

Una década más tarde es introducido el patrón VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water) que es el utilizado actualmente. El subsiguiente monitoreo isotópico de la precipitación mundial realizado por la Organismo Internacional de Energía Atómica con sus siglas en ingles –OIEA-, a través de la red global para isótopos en la precipitación GNIP ha refinado esta relación obteniendo la siguiente expresión (Clark y Fritz, 1997):

$$\delta^2 H = 8.13\delta^{18} O + 10.8\% \text{ vsmow} \quad (3)$$

Rodríguez (2004) construye una línea meteórica isotópica para Colombia a partir de diversos registros isotópicos provenientes de diferentes partes del país, encontrando la siguiente ecuación:

$$\delta^2 H = 8\delta^{18} O + 9.6\text{‰} \quad (4)$$

La concentración de isótopos estables en la lluvia está controlada por diversos factores entre los que se encuentran la temperatura de formación de las nubes, la topografía o altura sobre el nivel del mar, la latitud, la continentalidad (transporte de las masas húmedas desde el mar hacia el continente), la época del año y la cantidad de precipitación (Clark y Fritz, 1997).

La línea meteórica (regional confiable y aplicable a escala local) es una herramienta utilizada para la interpretación de los resultados isotópicos de muestras de agua provenientes de los hidrosistemas investigados (acuíferos, ríos, lagos, embalses, sistemas de acueducto y alcantarillados, etc.) y mediante la comparación o correlación permite inferir desde orígenes del agua subterránea, pasando por la cuantificación de la componente del flujo base, hasta la determinación de tiempos de tránsito en cuerpos de agua, aplicando los conceptos básicos de hidrología e hidrogeología, o mediante la utilización de modelos matemáticos alimentados con información isotópica (tomado de Rodríguez, 2004).

El efecto altitudinal de la composición isotópica en la precipitación es una relación muy útil en hidrología isotópica, ya que permite identificar la elevación a la que se produce la recarga, y por lo tanto diferenciar las aguas que se recargan a grandes alturas de aquellas que lo hacen a bajas alturas. Puede ser utilizado de manera directa para reconocer la incidencia de la infiltración local en la recarga. En zonas húmedas planas como la costa caribe colombiana la coincidencia de los contenidos isotópicos de la precipitación y del agua subterránea (Díaz-Granados, 1988) lleva a concluir que la recarga de estos acuíferos corresponde a la precipitación local a diferencia de las zonas montañosas o zonas áridas cerca de macizos montañosos húmedos (tomado de Hoyos, 1990), donde la comparación de los rasgos isotópicos de una y otra indican que la infiltración que da origen al agua subterránea procede en su mayor parte de áreas más elevadas topográficamente.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en el sector septentrional de los Andes Colombianos, en el centro – occidente del departamento de Antioquia. Tiene elementos geográficos importantes que le dan un comportamiento especial desde el punto de vista hidrológico e hidrogeológico. Esta conformada por la parte baja de la vertiente oriental de la cordillera Occidental, el cañón del río Cauca, la vertiente occidental de la cordillera Central, y el extremo mas occidental del altiplano Páramo de Belmira – Páramo de Sonsón (Arias et al, 2000) en jurisdicción de los municipios de Buriticá, Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, Liborina, San Jerónimo, Olaya, Belmira y San Pedro de los Milagros.

Desde el punto de vista físico la región esta conformada por una distribución bastante diversa de pendientes y formas, zonas planas, cóncavas, convexas, onduladas, suaves y empinadas sobre las cuales se desarrolla una red hídrica con características morfológicas muy diversas (dendrítica, angular y subparalela) entre las que se encuentra un marcado control estructural. La corriente principal de la región es el río Cauca, lugar donde desembocan la mayor parte de los drenajes de la zona. Otras corrientes importantes son los ríos Aurrá, y Tonusco, las quebradas La Sopetrana, La Seca, Juan García y la Yunada, todas corrientes localizadas en el cañón del río Cauca, y el río Chico localizado en el altiplano. Estos drenajes están relacionados directamente, en su mayoría, con los depósitos que conforman las zonas acuíferas de la región y con las zonas de recarga. En un estudio realizado por la Universidad Nacional (2004) se dividió la zona en 7 sectores al interior de los cuales se presentan las unidades acuíferas de la zona de estudio: Tonusco, La Isla, La Florida, Tunal, Aurrá, Sopetrán y San Jerónimo, Los acuíferos libres pertenecientes a la zona de estudio y de los cuales se pretende hallar el origen de la recarga se muestran en la Figura 1

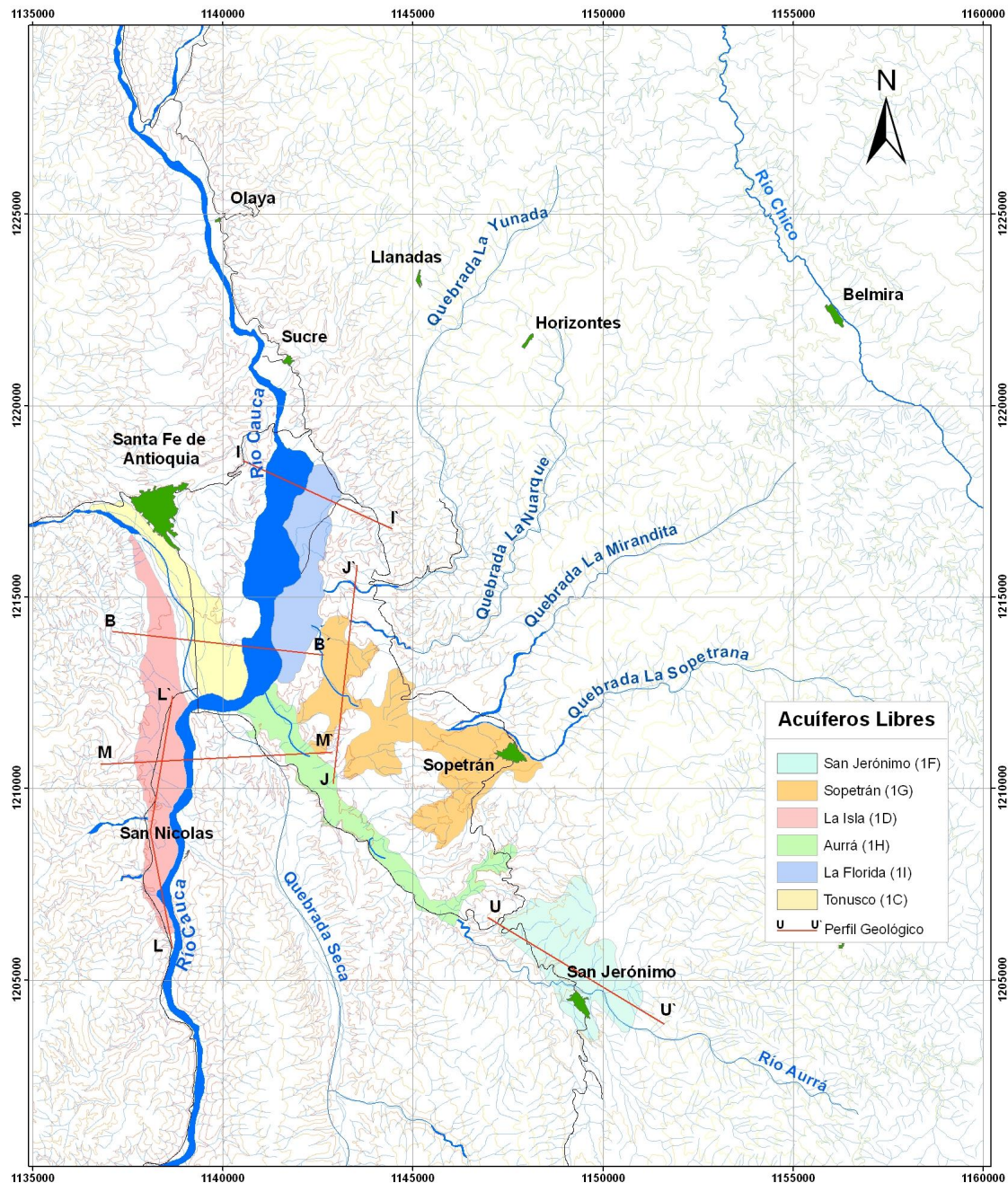


Figura 1. Distribución de los acuíferos libres en la zona de estudio asociados a los diferentes sectores geológicos (Modificado de UNAL, 2004).

El mapa de precipitación, Figura 2, muestra la clara influencia que tiene la topografía en su variabilidad espacial. En el fondo del Valle del río Cauca se presentan los valores más bajos de precipitación (850 - 950 mm/año), los cuales van aumentando conforme a la elevación del terreno para alcanzar valores máximos (2200 mm/año) en las zonas más altas. Sin embargo se presentan algunos efectos locales, como por ejemplo, el altiplano de San Pedro y la zona al norte de la cuenca del río Tonusco donde se presenta una disminución en la lluvia que puede estar relacionada con circulaciones locales, así como también la parte alta de la cuenca de la quebrada la García donde se presenta un aumento importante de la precipitación con relación a la tendencia en sus zonas adyacentes.

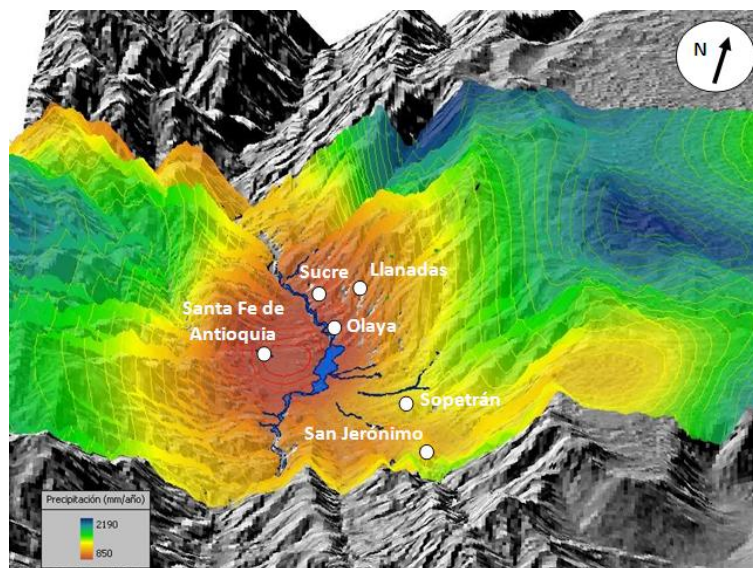


Figura 2. Mapa de precipitación multianual en la zona de estudio.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo investigativo el objetivo principal es comprender el funcionamiento del sistema hidrogeológico de la región, determinando características como el origen del agua, las zonas de recarga, las conexiones y las relaciones existentes entre las diversas fuentes. Teniendo en cuenta lo anterior, se elaboró una red de monitoreo que incluye puntos para toma de muestras de agua lluvia, agua subterránea (pozos) y aguas superficiales (ríos, quebradas, y lagunas). Los puntos que conforman la red fueron escogidos en función de condiciones generales como la facilidad de acceso, conservación y cuidado de los dispositivos de almacenamiento y muestreo (en el caso del agua lluvia), la representatividad de la fuente en la zona de estudio.

Las estaciones de monitoreo de agua lluvia se localizaron teniendo en cuenta criterios como la distribución altitudinal, la distribución espacial de la precipitación en la zona de estudio (cantidad de precipitación) y las hipótesis existentes sobre el origen de la misma. Es importante mencionar que la distribución altitudinal de las estaciones está relacionada con la utilidad que tiene la variación isotópica de la lluvia con la altitud en la determinación de las zonas de recarga. De esta manera las estaciones fueron localizadas en diferentes cotas a lo largo de la zona de estudio, según se muestra en la Figura 3. La información general de cada una de las estaciones se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Información general de las estaciones de monitoreo de la precipitación

Nombre	Código	Cota	Este (m)	Norte (m)	Municipio	Lugar-Vereda
Entrerrios	P1-E	2220	1172560	1218100	Entrerrios	Cabecera
Belmira	P2-B	2527	1155830	1222260	Belmira	Cabecera
Horizontes	P3-H	2150	1148090	1221800	Sopetrán	Cabecera
Llanadas	P4-LL	1760	1145160	1223280	Olaya	Cabecera
Piñones	P5-P	1140	1144720	1220030	Olaya	Piñones
Sucre	P6-S	495	1141240	1221710	Olaya	km 2 Vía Sucre-Olaya
Boquerón del Toyo	P7-BT	2100	1125320	1229860	Giraldo	Boquerón del Toyo

Las muestras de agua superficial se tomaron en los ríos Cauca, Aurrá, Chico y Tonusco, y las quebradas La Sopetrana, La Nuarque, La Seca, Juan García, La Barbuda, Tafetanes, la Venteña, Juanfue, y La Yunada. Estos drenajes están relacionados, en su mayoría, directamente con los depósitos que conforman las zonas acuíferas de la región y con las zonas de recarga. La localización de los sitios para el muestreo de agua superficial está determinada por condiciones como la facilidad de acceso y la representatividad del sitio.

Las muestras de agua superficial fueron tomadas en dos períodos climáticos octubre de 2005 (período Húmedo) y junio de 2006 (Período Seco).

El muestreo de agua subterránea en la zona de estudio está condicionado principalmente por la existencia de obras de captación como aljibes y pozos. Las muestras de agua subterránea fueron tomadas en 30 puntos entre manantiales, pozos y aljibes existentes teniendo en cuenta su distribución en las unidades acuíferas más importantes. La toma de muestras en aljibes fue realizada en octubre de 2005, mientras que los manantiales fueron muestreados en junio de 2006.

En la Figura 3 se presenta la localización de las estaciones de muestreo isotópico, según sea la fuente superficial, subterránea o agua lluvia.

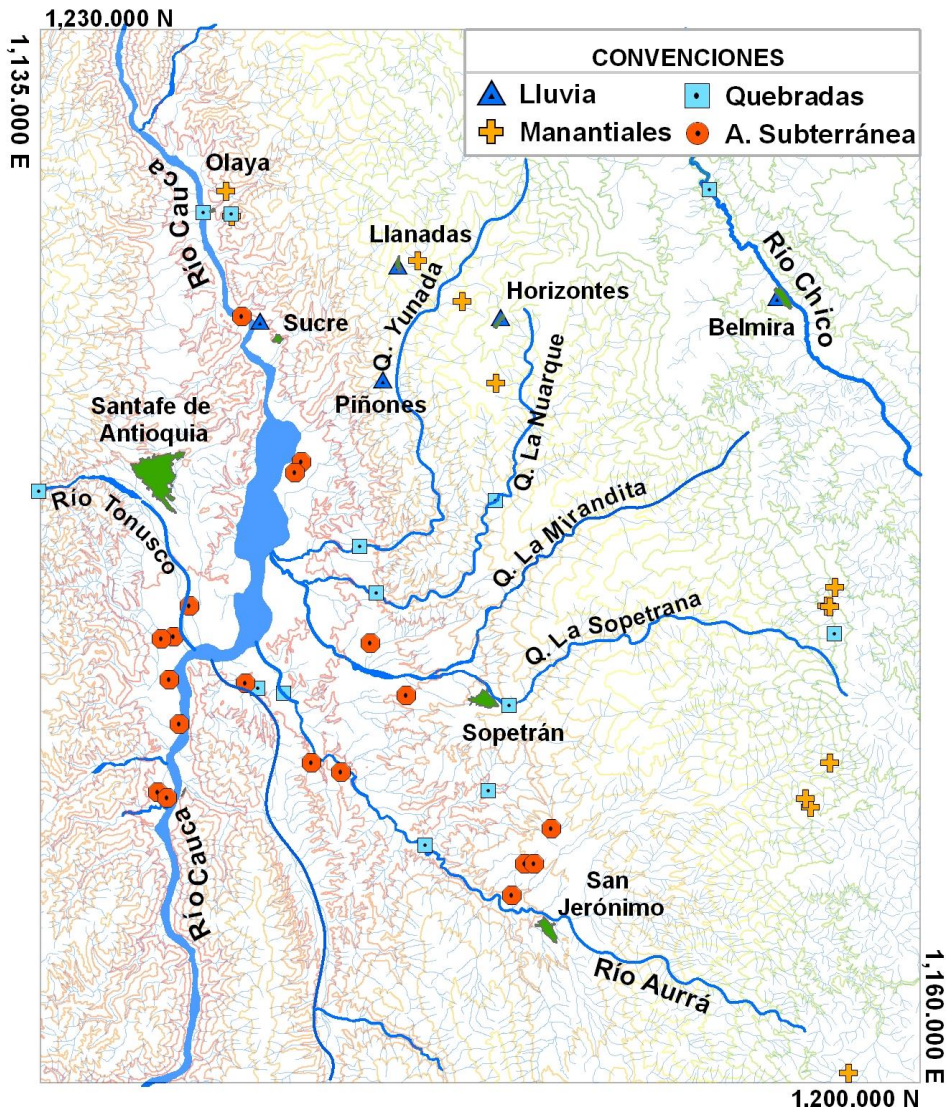


Figura 3. Localización de las estaciones de monitoreo isotópico.

4. RESULTADOS

En la Tabla 2 se muestran los resultados del contenido de isótopos estables en la precipitación para las estaciones de la zona de estudio.

Tabla 2. contenido de isótopos estables en la precipitación para las estaciones de la zona de estudio.

Estación		2005						2006				
		Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
P1-E	$\delta^{18}\text{O}$	-13.1	-8.8	-7.8	-12.1	-15.9	-8.9	-6.1	-5.5	-6.6	-15.6	-15.0
	δD	-97.0	-60.0	-51.1	-85.5	-117.1	-62.2	-34.5	-32.6	-42.7	-113.7	-116.6
P2-B	$\delta^{18}\text{O}$	-14.9	-9.9	-8.3	-11.3	-14.6	-9.3	-6.0	-7.1	-7.0	-13.8	-17.1
	δD	-111.6	-68.3	-57.2	-79.9	-107.6	-60.5	-32.8	-45.1	-44.2	-99.4	-127.6
P3-H	$\delta^{18}\text{O}$	-14.8	-9.6	-6.8	-11.1	-14.1	-7.0	-4.5	-6.2	-6.5	-13.6	-17.9
	δD	-110.9	-65.0	-48.1	-77.6	-101.4	-44.3	-22.6	-39.2	-42.7	-98.4	-133.6
P4-LL	$\delta^{18}\text{O}$	-13.0	-9.2	-6.4	-11.2	-13.7	-7.9	-3.4	-5.4	-5.3	-13.9	-17.7
	δD	-96.0	-63.8	-47.5	-78.7	-100.6	-55.6	-16.1	-34.6	-34.3	-102.0	-133.6
P5-P	$\delta^{18}\text{O}$	-12.3	-9.9	-5.6	-11.0	-12.4	-7.2	-2.6	-4.2	-4.8	-13.7	-17.0
	δD	-90.6	-71.8	-41.8	-77.5	-91.9	-46.2	-13.2	-27.8	-31.3	-101.8	-128.7
P6-S	$\delta^{18}\text{O}$	-12.5	-8.4	-7.2	-10.4	-11.6	-6.9	-4.8	-3.3	-3.2	-13.1	-16.5
	δD	-93.0	-61.2	-53.1	-72.8	-87.5	-54.1	-31.4	-21.5	-18.0	-96.0	-124.9
P7-Bt	$\delta^{18}\text{O}$	-13.6	-11.0	-8.7	-12.4	-13.5	-9.2	-6.7	-7.6	-6.2	-14.7	-12.3
	δD	-97.3	-75.1	-54.4	-87.2	-97.4	-59.9	-38.3	-48.9	-37.0	-106.0	-86.7

E: Entrerrios, B: Belmira, H: Horizontes, LL: Llanadas, P: Piñones, S: Sucre, Bt: Boquerón del Toyo.

4.1. Variación Estacional de los Isótopos Estables en la Precipitación

El ^{18}O y el D (^2H) poseen prácticamente el mismo comportamiento en toda la zona de estudio, un ciclo bimodal con valores de desviación más negativos que coinciden con los periodos húmedos y valores menos negativos que coinciden con los periodos secos. Esto puede explicarse teniendo en cuenta la menor temperatura ambiente en los periodos húmedos (Sep-Oct-Nov y Mar-Abr-May) y la mayor temperatura en los periodos secos (Dic-Ene-Feb y Jun-Jul-Ago), ya que la relación inversamente proporcional entre la temperatura y el coeficiente de fraccionamiento isotópico hace que las precipitaciones sean más negativas en invierno que en verano. Las Figuras 4 y 5 muestran la variación estacional los isótopos en la precipitación.

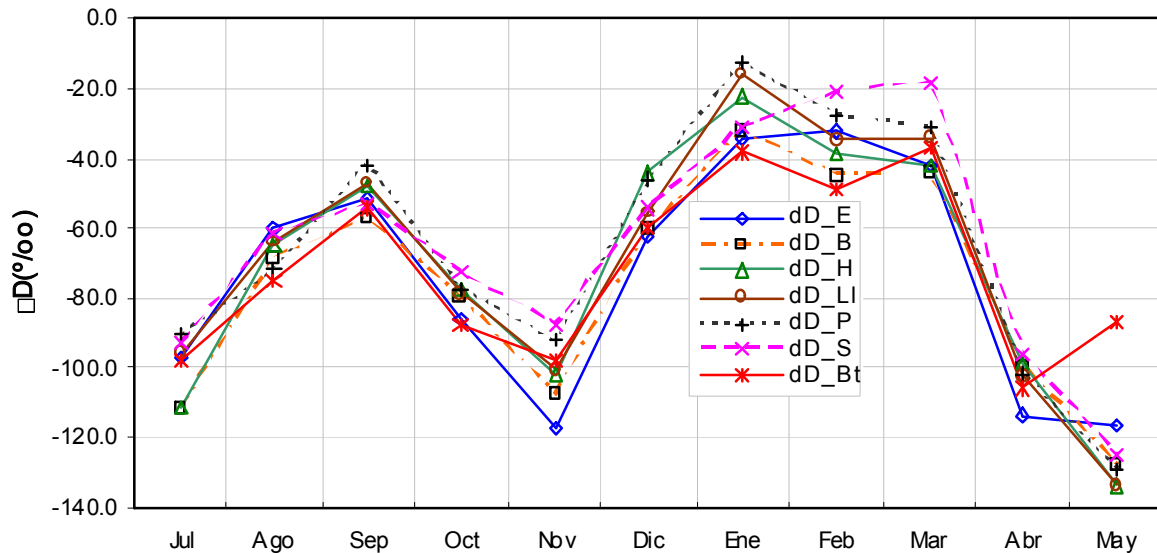


Figura 4. Variación estacional del Deuterio en la precipitación (E: Enterrrios, B: Belmira, H: Horizontes, LI: Llanadas, P: Piñones, S: Sucre, Bt: Boquerón del Toyo).

El deuterio presenta un rango de valores de desviación (δ) que varía entre -133.6 y -13.2‰ con una media de -70.3‰, presentando su valor máximo en la estación Piñones para el mes de enero, y su valor mínimo en el mes de mayo para la estación Llanadas. El rango de variación de la desviación (δ) para el ^{18}O es mas pequeño pero en % es lo mismo ya que los dos elementos (^{18}O y D) tienen el mismo comportamiento. Este presenta valores entre -17.9 y -2.6‰ con una media de -10‰; su valor máximo es registrado en la estación Piñones para el mes de enero y su mínimo en la estación Horizontes en el mes de mayo.

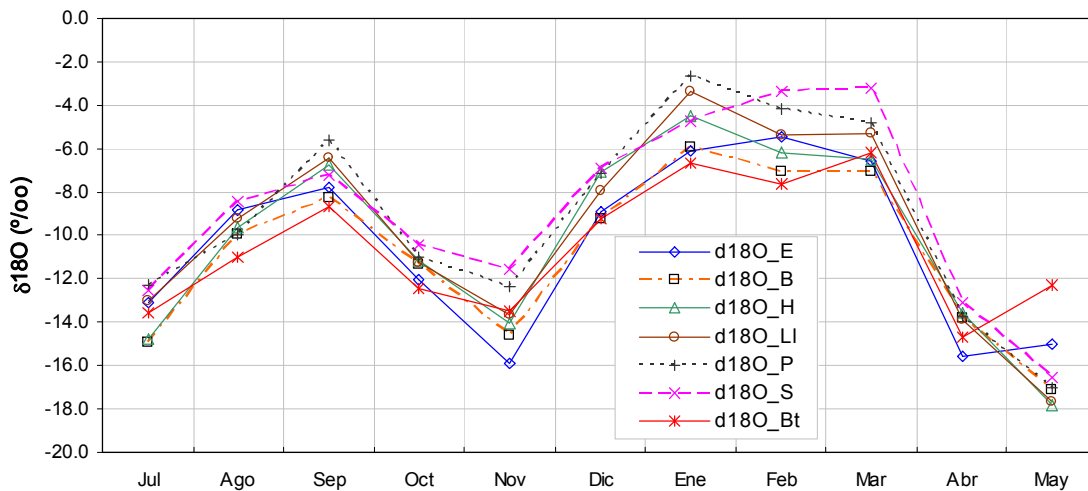


Figura 5. Variación estacional del ^{18}O en la precipitación (E: Enterrrios, B: Belmira, H: Horizontes, LI: Llanadas, P: Piñones, S: Sucre, Bt: Boquerón del Toyo).

El exceso de deuterio es un parámetro fundamental en la descripción de los datos isotópicos ya que es un indicador de evaporación en las muestras. Los valores de este parámetro para las muestras recolectadas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores del exceso de deuterio para las estaciones de muestreo a nivel mensual.

Mes/Estación	Entrerrios	Belmira	Horizontes	Llanadas	Piñones	Sucre	Boquerón del Toyo
Julio	7.5	7.9	7.3	7.9	7.5	7.3	11.1
Agosto	10.6	11.3	12.1	10.0	7.6	6.3	12.6
Septiembre	11.0	9.2	6.2	4.0	3.4	4.9	15.2
Octubre	10.9	10.7	11.5	11.2	10.5	10.6	12.2
Noviembre	9.7	9.1	11.0	8.8	7.0	5.3	10.8
Diciembre	8.9	13.5	12.0	7.9	11.2	1.0	13.9
Enero	14.6	14.9	13.4	11.2	7.8	6.8	15.1
Febrero	11.3	11.3	10.3	8.4	5.4	5.2	12.2
Marzo	9.7	12.1	9.3	8.0	7.1	7.7	12.5
Abril	11.0	11.4	10.4	8.9	7.8	9	11.7
Mayo	3.6	9.4	9.4	7.6	7.5	7.2	11.8

El rango de variación para los valores de exceso de deuterio es de 11.8‰ con un mínimo de 3.4‰, un máximo de 15.2‰ y una media de 9.6‰, para valores normales (sin evidencias de evaporación). También se encuentran valores por debajo del límite de evaporación ($d < 3‰$) como es el caso de la muestra del mes de Diciembre en la estación Sucre, con un valor de 1‰. La evaporación de la muestra fue ocasionada por situaciones ajenas a la investigación.

La Figura 6 muestra dos elementos importantes en los valores del exceso de deuterio a lo largo del período de muestreo; primero, el comportamiento estacional es diferente para estaciones como Boquerón del Toyo y Entrerrios con respecto a las demás; y segundo, el amplio rango de variación de este parámetro. Estos elementos pueden indicar diferencias en el origen de las masas húmedas que generan la precipitación en la zona de estudio.

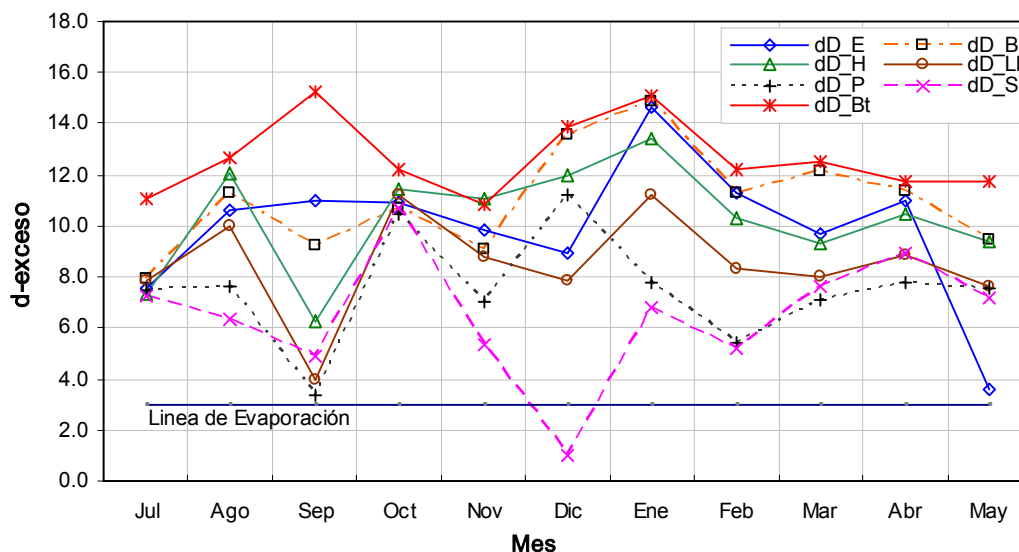


Figura 6. Variación Estacional del Exceso de Deuterio en las estaciones de la zona de estudio.

4.2. Variación Altitudinal de los isótopos estables en la precipitación

Resulta claro de la observación de los resultados de desviación isotópica en las estaciones de la zona de estudio, tanto para ^{18}O como para D, que existe una correlación de dichos valores con la altitud y que esta representada por las ecuaciones mostradas en la Figura 7. Los valores que parecen en cada punto corresponde a la media anual ponderada de cada estación de monitoreo.

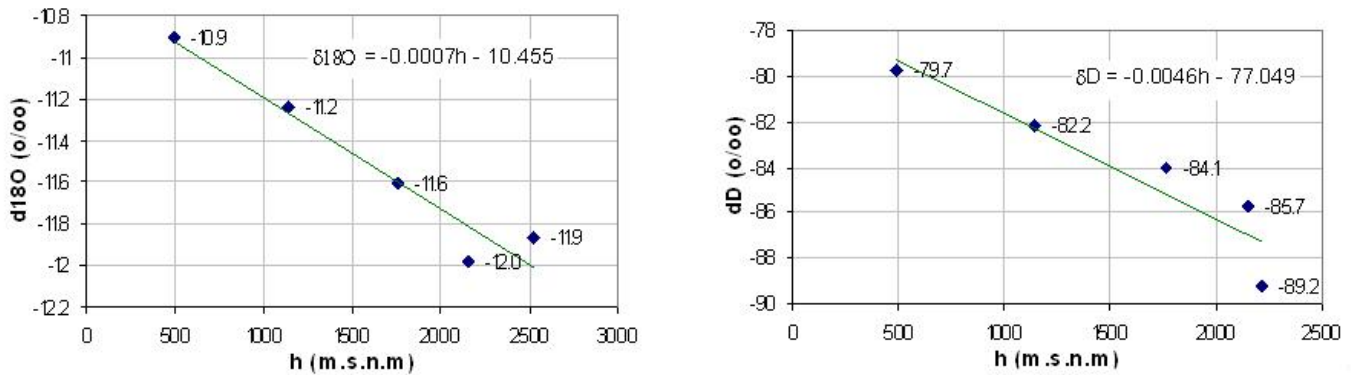


Figura 7. Variación del contenido isotópico con la altura en la zona de estudio, para los datos ponderados.

El efecto de la altitud sobre el contenido isotópico en la precipitación presenta tasas de cambio del orden de 0.07 unidades (δ) para ^{18}O y 0.47 unidades (δ) para ^2H por cada 100 m de altitud. Los gradientes altitudinales para los dos elementos son bajos ya que el efecto de altitud es más pequeño para grandes altitudes. En Argentina, Vogel et al (1975, Tomado de IGME, 2002) encontró gradientes de 0.2 unidades por 100m para ^{18}O , y Palacio (2007) encontró este mismo valor para Colombia en la zona de Antioquia- Bajo Cauca.

4.3. Línea Meteórica Local

Con los resultados derivados del monitoreo de isótopos estables en la precipitación, realizado durante el curso de este proyecto, se construyó la línea meteórica para la zona de estudio utilizando los datos de todas las estaciones presentes, obteniendo la siguiente expresión:

$$\delta^2 H = 7.99\delta^{18} O(\pm 0.08) + 9.44(\pm 0.87) \quad (5)$$

$$R^2 = 0.9924$$

La expresión 3 es muy parecida a la línea meteórica para Colombia encontrada por Rodríguez (2004), mostrando un intercepto y una pendiente ligeramente menores. Al compararla con la línea meteórica mundial se observa también una pendiente ligeramente menor y un desplazamiento derivado del intercepto. La Figura 8 muestra la línea meteórica para la zona de estudio.

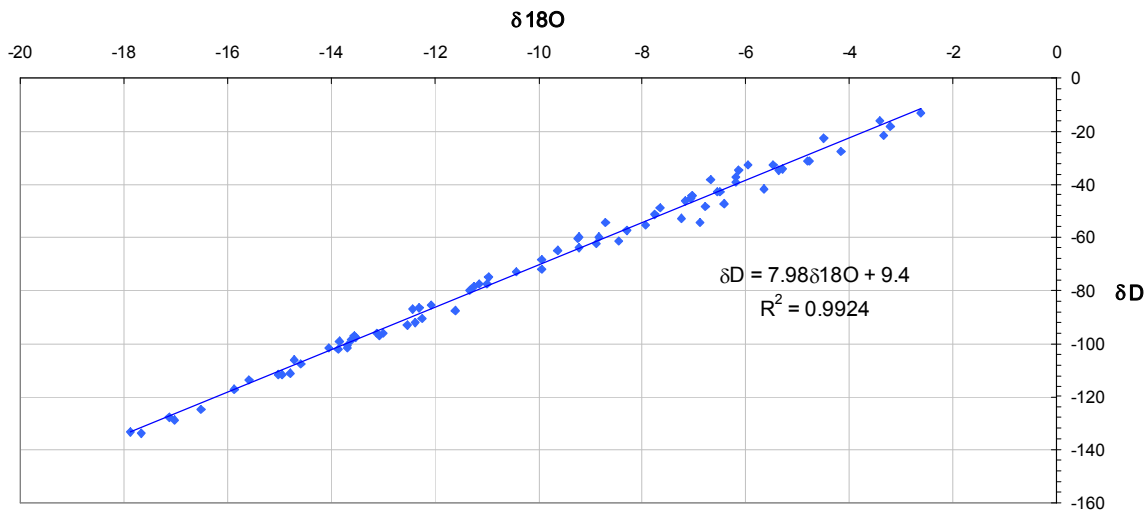


Figura 8. Línea Meteórica para la zona de estudio (Utilizando la totalidad de las estaciones).

De acuerdo con las características climáticas se tienen 2 fuentes de humedad principales: la corriente del Chocó, y la circulación local de los valles interandinos. La primera tiene influencia principalmente sobre la cordillera occidental, lugar donde se encuentra localizada la estación Boquerón del Toyo; la segunda determina el comportamiento de la zona oriental en la parte alta de la cordillera central, donde se encuentran las estaciones Entrerrios y Belmira. Las demás estaciones corresponden probablemente a una mezcla de frentes de humedad o a alta evaporación por las condiciones de humedad y temperatura del aire en el cañón.

4.4. Características Isotópicas del Agua Subterránea y superficial

Agua Subterránea

Los contenidos isotópicos del agua subterránea en la zona de estudio varían entre -10.4 y -7.5‰ con una media de -9.9 unidades de δ para el ^{18}O ; y entre -76.7 y -61.6‰ con una media de 72.2 unidades de δ para el D (^2H). Los manantiales a su vez presentan valores entre -12.9 y -9.8‰ con una media de -10.9 unidades de δ para ^{18}O , y entre -95.1 y -70.6‰ con una media de 77.7 unidades de δ para el D. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos.

Las muestras de aguas subterráneas pertenecientes a la misma unidad acuífera presentan en general valores isotópicos semejantes incluidos dentro de los rangos mencionados en el párrafo anterior, con algunas excepciones como AS-18 (San Judas) y AS-12 (La Jodelina) que se alejan de este comportamiento. La Figura 9 muestra la localización de los puntos de agua subterránea con respecto a la línea meteórica local; especialmente las muestras AS-12 y AS-18 muy alejadas y por debajo de la línea meteórica. Construyendo una línea de regresión para las muestras de agua subterránea se obtiene una ecuación de ajuste con una pendiente de 4.83 que indica evaporación.

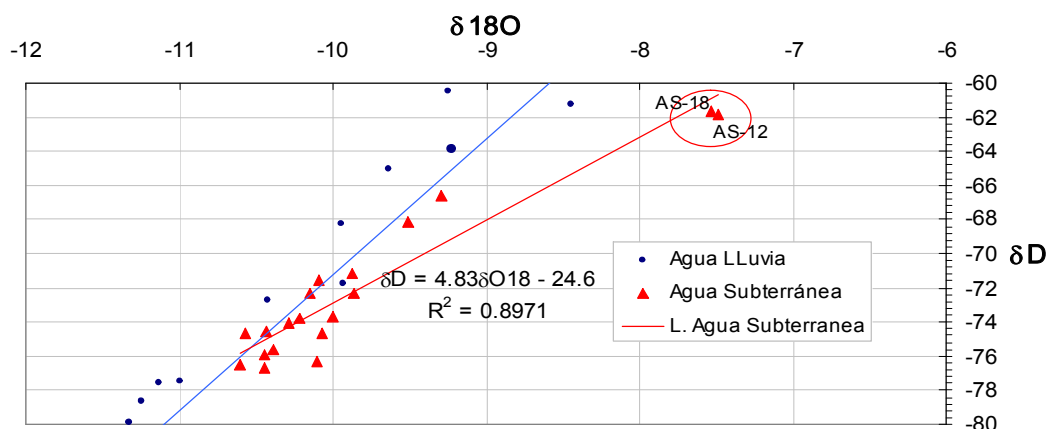


Figura 9. Posición de las muestras de agua subterránea con respecto a la Línea Meteórica Local (LML).

La variación altitudinal de los isótopos en la precipitación es muy útil para determinar una característica importantísima en el agua subterránea, las zonas de recarga. Graficando la relación entre la altura y los contenidos isotópicos de la precipitación y el agua subterránea se encontraron diferentes zonas de recarga para las unidades acuíferas presentes en la zona de estudio, como puede observarse en las Figuras 10 y 11.

Se presentan básicamente dos zonas de recarga, una alta por encima de los 1800 m.s.n.m (1800 - 2400 m.s.n.m) correspondientes a las zonas más altas de la ladera y el borde del altiplano; y una más baja, localizada a media ladera entre los 1100 y 1400 m.s.n.m. También se presenta una mezcla entre aguas de recarga alta y aguas de recarga baja. Cada zona de recarga corresponde a determinadas unidades acuíferas, la zona de recarga alta (1800-2400 m.s.n.m) alimenta la mayoría de los acuíferos (1D, 1F, 1H, y 1B), mientras que la zona baja (1100 - 1400 m.s.n.m) alimenta los acuíferos de la unidad 1G. Se propone el modelo mostrado por la Figura 12, para la recarga de los acuíferos en la zona de estudio.

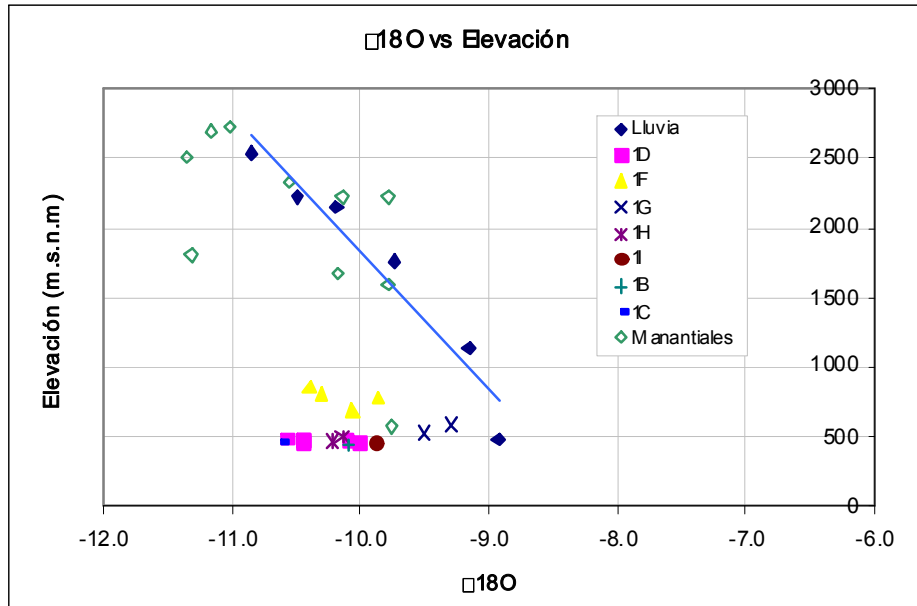


Figura 10. Elevación vs $\delta^{18}\text{O}$ (1B, 1C, 1D, 1F, 1G, 1H, 1I: Unidades Acuíferas)

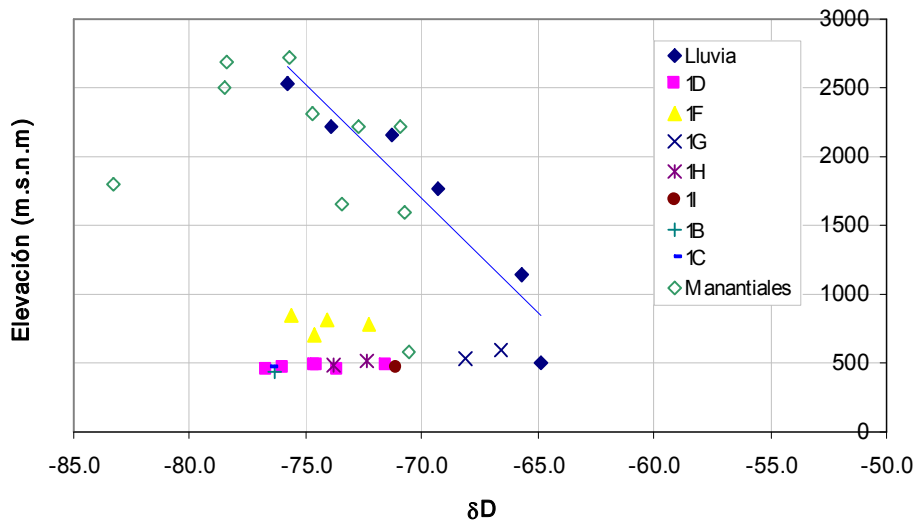


Figura 11. Elevación vs δD (1B, 1C, 1D, 1F, 1G, 1H: Unidades Acuíferas)

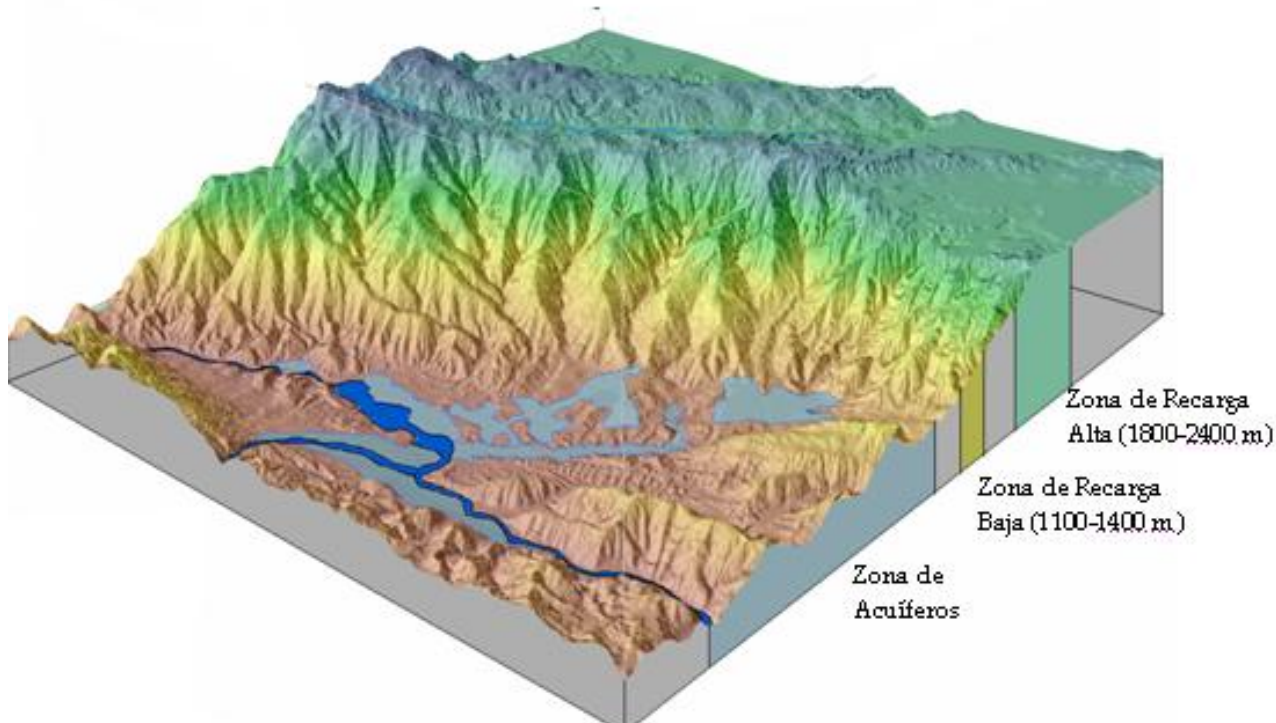


Figura 12. Modelo para la recarga en la zona del Occidente Antioqueño

En la Figura 13 se muestra como los contenidos isotópicos de la precipitación en el mes de agosto presentan una gran semejanza con los contenidos isotópicos del agua subterránea (muestras colectadas al iniciar el mes de octubre), indicando que esta época del año representa un período de recarga muy importante para los acuíferos. La diferencia temporal entre la señal isotópica del agua subterránea y la precipitación del mes de octubre (mes de recolección de muestras de agua subterránea) es de 2 meses, por lo tanto este lapso de tiempo puede representar un mínimo en el tiempo de residencia del agua subterránea en el acuífero.

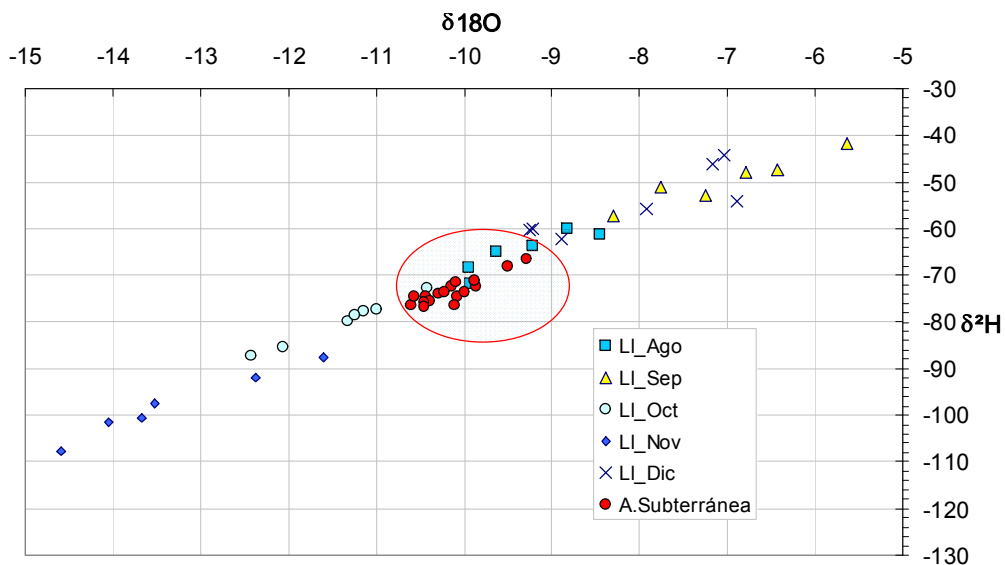


Figura 13. Correspondencia de los valores isotópicos de las aguas subterráneas con la precipitación.

Agua Superficial

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ para las aguas superficiales varían entre -13.5‰ y -10.5‰ con una media de -11.8 . Los valores de δD esta en el rango de -98.3 y -75.1‰ con una media de 84.5 .

Los contenidos más empobrecidos los presentan las muestras del río Aurrá (QB-15), el río Chico (QB1, QB2, QB17), y la quebrada la Barbuda (QB11), mientras los mayores valores de las corrientes de agua los presentan las muestras de las quebradas Tafetanes (QB7) y Juan fue (QB3).

Las semejanzas en los contenidos isotópicos de algunos manantiales (M3, M7) con muestras de aguas superficiales (QB11, QB17) (0) tomadas en el mismo periodo sugieren conexiones hidráulicas; aporte de manantiales a corrientes superficiales o viceversa. La muestra QB17 localizada en el altiplano y tomada en el río Chico a una elevación de 2402 m.s.n.m posee un contenido isotópico muy similar al manantial M7 localizado en la parte media-alta de la ladera en la Vereda Morrón del municipio de Sopetrán a una cota de 2205 m.s.n.m. De igual forma ocurre con las muestras M3 (Cabecera del municipio de Olaya) y QB11 (Quebrada la Barbuda), y M5 (Vereda Morrón) con QB16 (Afluente Quebrada La Sopetrana).

En el río Chico se tomaron muestras aguas arriba (QB1) y aguas abajo (QB2 y QB17) en dos periodos climáticos diferentes, presentado valores isotópicos casi idénticos para los dos elementos (Oxígeno y Deuterio). Esta situación puede sugerir un comportamiento constante o con variaciones muy pequeñas de los valores isotópicos a lo largo del año. De igual manera indica que en el tramo que incluye la toma de muestras no existe un aporte importante de otra corriente de agua, o de flujo subsuperficial con una señal isotópica diferente en la zona.

En la Figura 14 se grafican las muestras de agua superficial para los dos periodos analizados, los manantiales, y la precipitación de periodos en que se realizo el muestreo o que presentan valores isotópicos semejantes a las muestras de manantiales o agua superficial.

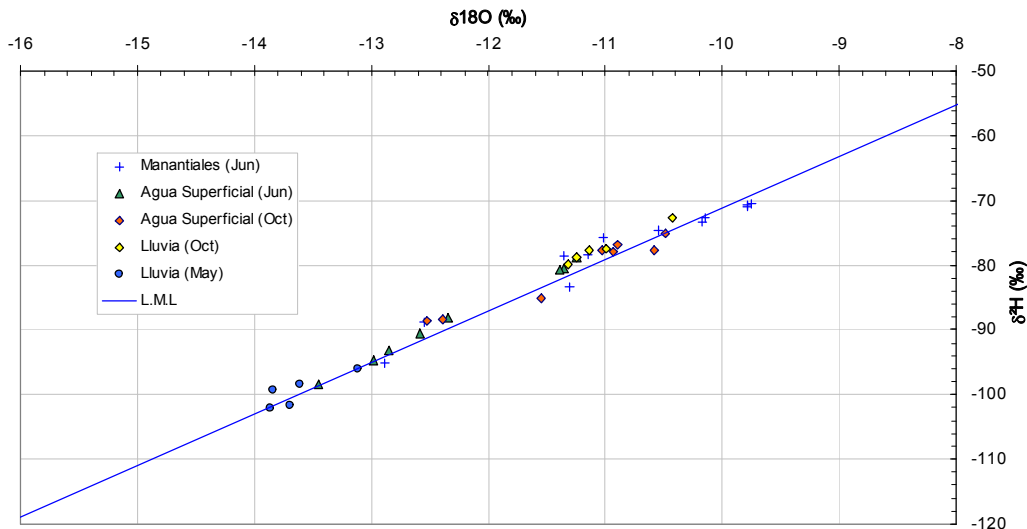


Figura 14. Comparación isotópica aguas superficiales, manantiales y lluvias de periodos coincidentes con la época de muestreo.

La señal isotópica de las aguas superficiales de octubre es muy parecida a las lluvias del mismo mes, excepto para las muestras del río Chico que se originan mucho más arriba fuera de la zona de estudio.

Las muestras de agua lluvia del mes de junio, son muy negativas comparadas con las muestras de agua superficial del mismo mes. Estas últimas (Aguas superficiales de junio) tienen contenidos isotópicos más similares a las aguas lluvias del mes de mayo, lo que puede explicarse teniendo en cuenta que el mes de mayo es un mes muy lluvioso y el suelo y las rocas aún en el mes siguiente pueden descargar agua a las corrientes superficiales.

El agua superficial muestra una alta variabilidad en el contenido isotópico. La composición isotópica es afectada por la evaporación, la mezcla de flujos base de diferentes altitudes y la escorrentía superficial. La Figura 15 presenta la posición de la recarga de aguas superficiales, mostrando como algunas corrientes principales no tienen su principal fuente de recarga al interior del área de estudio, como es el caso de los ríos Cauca y Chico, mientras que quebradas como La Nuarque, La Sopetrana, la Yunada, Tafetanes y Juan Fue muestran la posición altitudinal de su fuente. Teniendo en cuenta lo anterior las precipitaciones locales son un componente importante del agua de estas corrientes en las cabeceras de la cuenca, en las partes bajas, el aporte local de agua de precipitación puede ser menos importante.

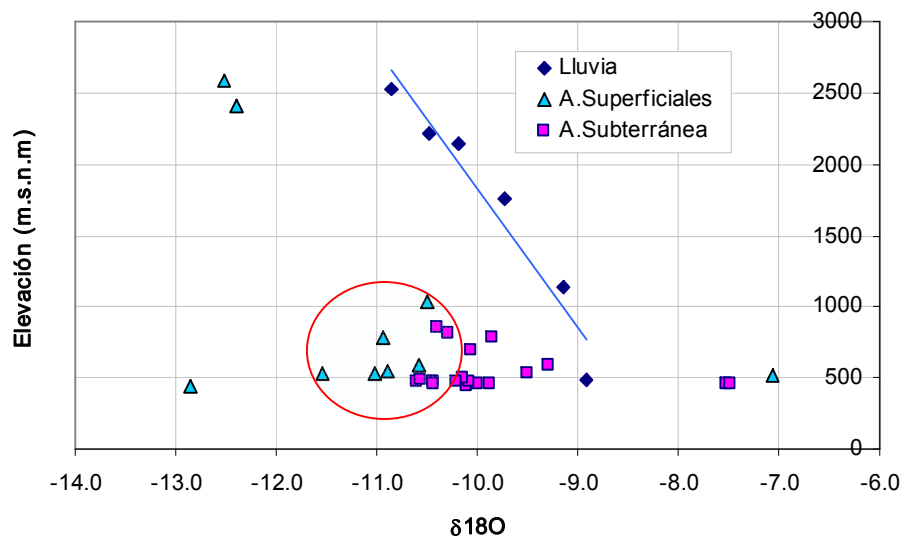


Figura 15. Elevación vs d¹⁸O (Aguas Superficiales)

Como es conocido, la composición isotópica del oxígeno y del hidrógeno de la mayoría de los ríos del mundo se aproxima a la Línea de Agua Meteorica Mundial. Esto indica que la evaporación del agua de las corrientes superficiales posee, en la mayoría de los casos, una influencia insignificante en la composición isotópica de esta agua. (IGME, 2002).

5. CONCLUSIONES

El efecto estacional, ampliamente descrito por la literatura queda ampliamente comprobado por el comportamiento de los isótopos de aguas lluvias. Los isótopos estables presentes en la precipitación de la zona de estudio (¹⁸O y D) poseen un ciclo bimodal con valores de desviación más negativos para los periodos húmedos y valores menos negativos que coinciden con los periodos secos.

El efecto de la altitud sobre el contenido isotópico en la precipitación presenta tasas de cambio del orden de 0.07 unidades (δ) para ¹⁸O y 0.47 unidades (δ) para ²H por cada 100 m de altitud. Los valores de variación de oxígeno (¹⁸) y deuterio con la altitud son bajos comparados con los resultados de otros estudios en regiones similares.

La línea meteórica obtenida para la zona de estudio tiene la siguiente expresión

$$\delta^2 H = 7.99\delta^{18} O \pm 0.08 + 9.44 \pm 0.87$$

La línea meteórica obtenida incluyendo todas las estaciones utilizadas en la zona de estudio es muy similar a la línea meteórica colombiana obtenida por Rodríguez (2004), mientras que aquella obtenida eliminando las estaciones con una

señal isotópica diferente (Entrerríos y Boquerón del Toyo) es mas parecida a la encontrada por Hoyos (1990) para la cordillera central.

Las diferencias en los parámetros de las ecuaciones y los valores promedio para el exceso de deuterio pueden explicarse de acuerdo con la posición geográfica de las estaciones que identifican diferentes orígenes de las fuentes de humedad y por lo tanto de la precipitación. En este caso tenemos 2 fuentes de humedad principales: la corriente del Chocó, y la circulación local de los valles interandinos.

Los parámetros pendiente e intercepto, que diferencian las líneas meteóricas regionales y locales dependen en gran medida de factores tanto matemáticos como físicos, el número de datos, la resolución espacial y temporal, las condiciones fisiográficas de cada región entre otros elementos.

La comparación de los rasgos isotópicos de la precipitación y el agua subterránea indican que la infiltración que da origen a esta última procede, en su mayor parte, de áreas mas elevadas topográficamente, a diferencia de las zonas planas donde la semejanza de dichos contenidos isotópicos llevan a concluir que la recarga de estos acuíferos corresponde a la precipitación local.

En la zona de estudio pueden identificarse dos zonas de recarga, una alta por encima de los 1800 m.s.n.m (1800 – 2400 m.s.n.m) correspondientes a las zonas más altas de la ladera y el borde del altiplano, que recarga la mayoría de las unidades acuíferas (1D, 1F, 1H, y 1B); y una más baja, localizada a media ladera entre los 1100 y 1400 m.s.n.m que coincide con el óptimo pluviográfico de la región y que recarga los acuíferos de la unidad Sopetrán (1G). También se presenta una mezcla entre aguas de recarga alta y aguas de recarga baja.

Algunos manantiales de la región, especialmente los localizados en zonas altas, tienen una relación directa con la precipitación de la misma zona, sin embargo existen algunos cuya recarga se encuentra en una zona bastante alejada de su ubicación espacial. Las semejanzas en los contenidos isotópicos de algunos manantiales con muestras de agua superficial tomadas en el mismo período sugieren conexiones hidráulicas; aporte de manantiales a corrientes superficiales o viceversa. El caso mas relevante es el del río Chico, que se encuentra conectado con algunas cuencas que drenan a la cuenca del río Cauca a través de manantiales.

El agua superficial muestra una alta variabilidad en el contenido isotópico, ésta es afectada por la evaporación en diferentes periodos climáticos, la mezcla de flujos base de diferentes altitudes y la escorrentía superficial. Las variaciones estacionales son mayores en los ríos y arroyos en los que la escorrentía superficial procedente de la precipitación reciente es la fuente principal del caudal, la variación es menor cuando la fuente dominante de los ríos es el agua subterránea.

REFERENCIAS

- Arias, L., 2000. Historia del relieve y los suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos. Antioquia Región El Vergel. Contrato Interadministrativo 1745. Universidad nacional de Colombia – Corporación Autónoma regional del Centro de Antioquia. Medellín, pp. 8 – 62.
- Clark, I. & Fritz, P, 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis Publishers, Baton Rouge, New York, 328 P.
- Cook, P.G. & Herczeg, A.L., 2000. Environmental tracers in subsurface hydrology. Kluwer Academic Publishers, Boston, 529 P.
- Craig, H., 1961, Isotopic Variations in Meteoric Waters, Science, 133, pp. 1702 – 1703.
- Díaz-granados, G., 1988. Estudio Hidrogeológico del flanco nordeste de la Serranía de San Jacinto y de la zona Litoral del Golfo de Morrosquillo, Ingeominas. Bogota. Boletín Geológico, 29-1, pp. 1-44.
- Gómez, S. & Anaya, A., 2004. Acercamiento a un Modelo Conceptual de Recarga de los Acuíferos de la región de Bucaramanga. Avances en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. N°11. pp. 37-50. .

- Hoyos, F., 1990. Efecto de las Infiltraciones distantes en la Inestabilidad de Laderas de alta Pendiente. Boletín de Vías, Vol. XXI, N° 71. Universidad nacional de Colombia. Sede Manizales. pp. 98-128.
- Instituto Geológico Minero de España - IGME, 2002. Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico, Principios y aplicaciones. Serie Guías y Manuales N°1. Ed. W.G. Mook. Madrid.
- Kendall, C. & McDonnell, J, 1998. Isotope Tracers in Catchment hydrology. Elsevier. Ámsterdam. 839 P.
- Palacio, P., 2007. Identificación de fuentes y zonas de recarga a partir de isótopos estables del agua (Caso de estudio: El Bajo Cauca antioqueño). Tesis de Maestría en Ingeniería - Universidad de Antioquia.
- Rodríguez, N. C, 1977a. Estudio de Escapes de la red de Acueducto y Alcantarillado de Manizales con técnicas isotópicas. Hidrología Isotópica en Colombia. Instituto de Asuntos Nucleares IAN - AIH. Bogota. pp. 13-20.
- Rodríguez, N. C, 1977b. Determinación del Origen del Agua Subterránea causa principal del deslizamiento de Quebradablanca. Hidrología Isotópica en Colombia. Instituto de Asuntos Nucleares IAN - AIH, Bogotá, pp. 21-29.
- Rodríguez, N. C, 1977c. Identificación del Origen del Agua Subterránea en el derrumbe del Túnel de Palacio. Hidrología Isotópica en Colombia. Instituto de Asuntos Nucleares IAN - AIH. Bogota, pp. 30-39.
- Rodríguez, N. C, 2004. Línea meteórica isotópica de Colombia. Meteorología Colombiana. N° 8 ISSN-0124-6984. Bogotá. pp. 43-51.
- Salazar, B., 1996. Gradiente Orográfico de la Composición isotópica del Agua Lluvia en el Valle de Aburrá. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 66 P.
- Universidad Nacional de Colombia, 1997. Estudio de Oferta y Demanda Hídrica en la Subregión N°1 del departamento de Risaralda. Postgrado en Aprovechamiento de los recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Informe Final. Tomo 1. 254 P.
- Universidad Nacional de Colombia, 2004. Evaluación del Potencial Acuífero de los municipios de Santa fe de Antioquia, San Jerónimo, Sopetrán, Olaya y Liborina. Corporación Autónoma Regional del centro de Antioquia - Corantioquia.
- Veloza, J., 2002; Desarrollo del modelo Hidrogeológico Conceptual del lago de Tota. XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Medellín.

