

Identificación de fuente y zonas de recarga a un sistema acuífero a partir de isótopos estables del agua

Caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño

Recibido para evaluación: 19 de Febrero de 2007
Aceptación: 17 de Abril de 2007
Recibido versión final: 30 de Abril de 2006

Paola Andrea Palacio B.¹
Teresita Betancur V.¹

RESUMEN

La hidrología isotópica y la hidrogeoquímica constituyen técnicas auxiliares avanzadas para la validación de modelos hidrogeológicos conceptuales. Los isótopos estables de la molécula de agua constituyen trazadores que permiten identificar fuentes de recarga y trayectoria del recurso dentro del acuífero, en tanto que el tritio permite evaluar tiempo de residencia. En este artículo se presentan los resultados de un estudio mediante el cual se utilizaron los isótopos $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y ^3H para determinar fuentes y zonas de recarga al sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño

PALABRAS CLAVE: Isótopos, Hidrología Isotópica, Recarga, Bajo Cauca Antioqueño

ABSTRACT

Isotopic hydrology and hydrogeochemical are auxiliary techniques to valid conceptual hydrogeology an recharge models. Stable isotopes from water trace sources and path flow and Tritium indicates age. This paper is about the use of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y ^3H to study the aquifer system on Bajo Cauca antioqueño.

KEY WORDS: Isotopes, Isotopic Hydrology, Recharge, Bajo Cauca Antioqueño

*1. Maestría en Ingeniería, Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental
Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.
papabu2@yahoo.es
ptebv787@udea.edu.co*

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo depende de varios factores relacionados con el conocimiento del sistema acuífero, el uso del suelo, la protección de captaciones, la regulación de los caudales de explotación, la identificación de zonas de recarga y la evaluación de esta.

La recarga se define como el proceso por el cual un acuífero se abastece de agua procedente del entorno que lo limita; dicha agua puede provenir de la infiltración de agua lluvia, de corrientes superficiales o de unidades hidrogeológicas adyacentes, también la acción del hombre puede intencionalmente o no ocasionar recarga artificial. Además de la disponibilidad de agua, la recarga de un acuífero esta condicionada por factores geológicos y geomorfológicos: el tipo de roca asociada al acuífero, las características de la roca encajante, el grado de pendiente que presenta el terreno, el uso y la textura del suelo.

A pesar de que la subregión del Bajo Cauca antioqueño cuenta con importantes fuentes de agua superficial como lo son los ríos Cauca, Man, Nechí y Cacerí, la calidad del agua que transporta cada una de estas corrientes se encuentra altamente deteriorada como consecuencia del mal manejo que el hombre le ha dado a los recursos naturales, situación esta que ha llevado a que las aguas subterráneas se constituyan en la principal fuente de abastecimiento de agua en la región.

Los acuíferos del Bajo Cauca antioqueño están asociados a depósitos aluviales recientes de las principales corrientes y sus afluentes, así como a los Miembros Superior e Inferior de la Formación sedimentaria Cerrito. El medio encajante corresponde a rocas metamórficas del Paleozoico, las cuales registran intenso fracturamiento.

La utilización de isótopos ambientales constituye una técnica complementaria, de la geoquímica y la hidrogeología básica, para ajustar y verificar el modelo conceptual de un sistema acuífero. En este sentido Palacio (2007) realizó un estudio con propósito identificar las posibles fuentes y zonas de recarga utilizando el ^2H , el ^{18}O y el ^3H , cuyos resultados se sintetizan en éste artículo.



2. HIDROLOGÍA ISOTÓPICA

El principio de la utilización de las técnicas isotópicas en hidrogeología se fundamenta en el hecho de que el agua subterránea puede tener diferentes composiciones isotópicas de acuerdo con su ambiente de recarga. La relación de isótopos entre la lluvia registrada a diferentes alturas, las fuentes superficiales y el agua subterránea proveniente de distintas profundidades permiten entender el fenómeno de la recarga, confirmar la distribución de las unidades hidroestratigráficas y conocer el modo de flujo al interior del acuífero.

Aunque todos los elementos presentes en sistemas hidrogeológicos tienen algunos isótopos, solo unos pocos, los que se encuentran en mayor cantidad como H, C, N, O y S, son de interés hidrogeológico. Los isótopos estables de estos elementos son útiles para rastrear las fuentes y direcciones de flujo y los radioactivos permiten medir edad y tiempo de residencia. Dentro de los isótopos estables los más utilizados son los de los elementos que conforman la molécula de agua, es decir los isótopos de H y O, particularmente el deuterio (D o ^2H) y el ^{18}O , los isótopos radioactivos más usados son el ^{14}C y el tritio ^3H .

Los análisis de la composición de ^2H y el ^{18}O , en una muestra se reportan en términos de la desviación de un estándar, el VSMOW (Viena Estándar Ocean Water), con relación a los de ^3H como UT, unidades de tritio (Clark and Fritz, 1999). Valores positivos de la desviación indican un enriquecimiento en isótopos estables frente al patrón, mientras que valores negativos indican un empobrecimiento de la muestra.

El cambio en la concentración de isótopos en un medio determinado se conoce como fraccionamiento isotópico y puede estar relacionado a la ocurrencia de reacciones químicas o al simple cambio de fase de un compuesto particular, como en el caso ^{18}O y el ^2H para el agua. Para este líquido, los procesos de evaporación conllevan a un enriquecimiento de ^{18}O y ^2H , con respecto a ^{16}O y H; por el contrario la condensación causa un enriquecimiento de los livianos frente a los pesados.

La composición isotópica del agua lluvia esta condicionada por los efectos orográfico o de

altitud, de latitud, de continentalidad y de abundancia, que determinan no solo las condiciones de temperatura, sino también con ellas, el origen de las masas de aire que transportan el vapor de agua. El comportamiento promedio de las lluvias se ajusta a la línea meteórica mundial, descrita por Craig en 1961 (Clarck y Fritz, 1999) según la ecuación 1.

$$\delta^2 H = 8\delta^{18} O + 10\%_0 VSMOW \quad (1)$$

A nivel local esta recta puede presentar ligeras variaciones en la pendiente y el intercepto. Para Colombia a partir de información recopilada durante varios años Rodríguez (2004) reporta una línea meteórica según la ecuación 2. Algunas relaciones locales para líneas meteóricas en Colombia se han realizado por Gómez y Colegial (2004), Toro et al (2004) y Herrera et al (2004).

$$\delta^2 H = (8.03 + -0.28)\delta^{18} O + 9.6 \quad (2)$$

Dado que los contenidos de ^{18}O y 2H se consideran conservativos una vez han alcanzado el reservorio subterráneo, sirven y se utilizan como trazadores de la fuente de recarga.

2.1. Área de Estudio

La región conocida como Bajo Cauca antioqueño con una población que supera los 200.000 habitantes, se ubica en las últimas estribaciones de las cordilleras Central y Occidental de Colombia. Después de descender desde una región con alturas de hasta 2.600 metros sobre el nivel del mar, el Bajo Cauca exhibe una topografía suave de relieve colinado con toques redondeados a subredondeados forjada sobre un terreno con elevaciones entre 50 y 600 metros. Esta región tiene como principal arteria fluvial el río Cauca que fluye en sentido sur-norte hasta Caucasia y luego oeste-este hasta la confluencia con el río Nechí (Figura 1)

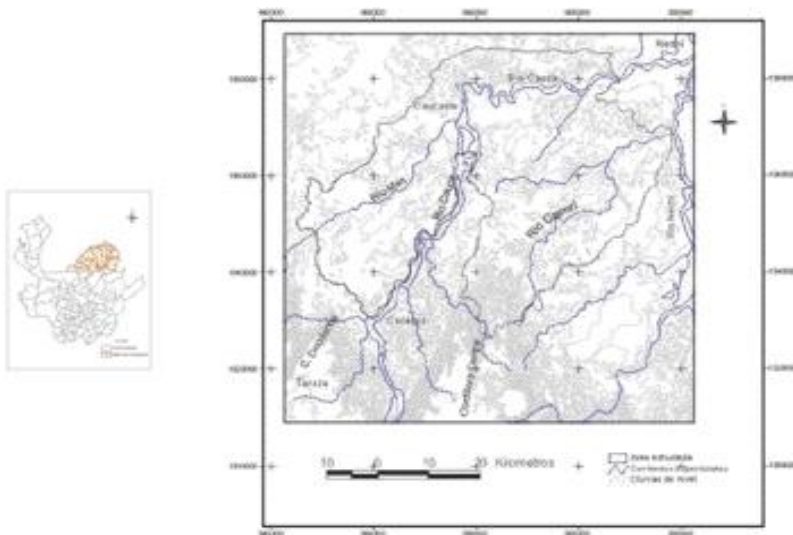


Figura 1. Localización del área de estudio

De acuerdo con Betancur (2005), la geología del Bajo Cauca antioqueño esta caracterizada por diferentes tipos de roca y posee algunos rasgos estructurales relevantes. El Batolito Jurásico de Segovia (Jdse) es el principal cuerpo ígneo regional, que aflora al este de la zona de estudio. Las rocas metamórficas del norte de Antioquia están representadas por el Complejo Puquí y el Complejo Cajamarca. Las rocas sedimentarias presentes al norte de Antioquia y especialmente importantes desde el punto de vista hidrogeológico fueron correlacionadas por Zapata y Cossio (1992) con la Formación Cerrito y el Grupo Sincelejo. La Formación Cerrito esta dividida en tres miembros: Miembro Superior, areno-arcillosos, con niveles de arenitas calcáreas fosilíferas y





algunos mantos de carbón. Miembro Medio, principalmente limo-arcillosos con capas de arenitas calcáreas fosilíferas hacia la parte media, presenta 54 mantos de carbón y espesor de 850 m. El Miembro Inferior, conformado por areniscas, conglomerados y calizas, se caracteriza por la ausencia de mantos de carbón y posee un espesor de 400 m. Regionalmente los depósitos aluviales presentes están asociados a los ríos Cauca, Nechí, Man y Cacerí.

A escala regional se registran algunos rasgos tectónicos importantes tales como la Falla del Río Tarazá, Falla quebrada Urales, Falla Espíritu Santo, Sinclinal Taraza y Sur de Córdoba.

Los depósitos aluviales y la Formación Cerrito albergan dentro de ellos el sistema acuífero del Bajo Cauca formado por tres unidades hidrogeológicas dentro de las cuales dos tienen el carácter de acuífero. La unidad hidrogeológica U₁₂₃ (Mejía 2006) asociada a los depósitos aluviales y al Miembro Superior de la Formación Cerrito constituye un acuífero libre; su extensión es de 2.050 km², tendría un volumen de 46.500 millones de metros cúbicos (Mm³) y unas reservas de agua subterránea de unos 3.300 Mm³. Subyaciendo al acuífero libre se encuentra U₄, constituida por el Terciario del Miembro Medio de la Formación Cerrito, su extensión donde aflora es de 70 km², es una unidad confinante. El Miembro Inferior de la Formación Cerrito, unidad hidrogeológica U₅, se comporta regionalmente como un acuífero confinado con afloramientos puntuales hacia el norte del área de estudio, y hacia las partes altas de las cuencas de los ríos Man y Cacerí. Los valores de conductividad hidráulica de las unidades acuíferas oscilan entre 0.5 y 5 m/día. Los valores de coeficiente de almacenamiento están dentro de los rangos característicos de acuíferos libres para U₁₂₃ y de acuíferos confinados para U₅. El Basamento del sistema acuífero estaría constituido por rocas metamórficas fisuradas. La Figura 2 muestra el mapa hidrogeológico y una sección transversal de los acuíferos.

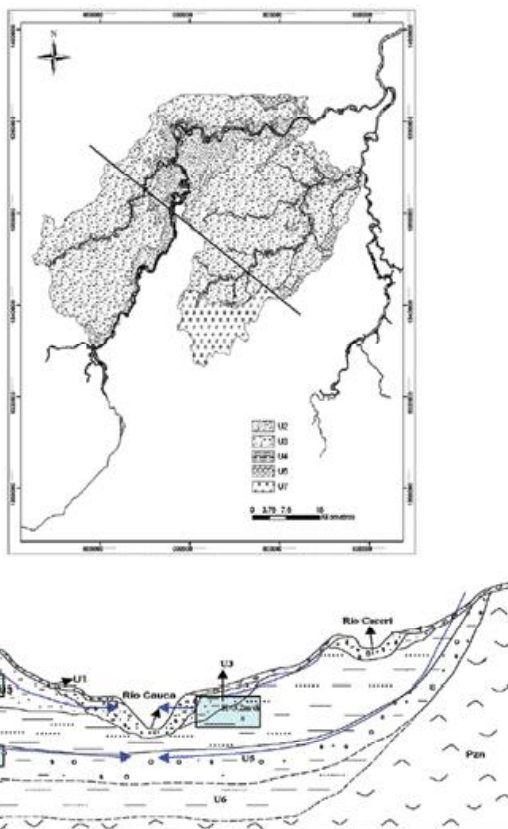


Figura 2.
Modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño

A partir del modelo hidrogeológico conceptual, y teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas y fisiográficas del Bajo Cauca antioqueño y sus alrededores, se propone un modelo conceptual de la recarga para el sistema acuífero según el cual la unidad hidrogeológica U₁₂₃ a escala regional debe ser recargada directamente por precipitación; las corrientes superficiales

cerca de la confluencia del río Man en el Cauca y a la altura de Puerto Bélgica, también al sur desde la roca encajante podría haber aportes laterales (CORANTIOQUIA– Universidad de Antioquia, 2003, 2004, 2005), U4 y U5 registran sólo afloramientos puntuales en la zona del Bajo Cauca, a través de ellos es difícil que se produzca la recarga de éstas unidades, la geometría de la unidad confinada lleva a suponer que la principal zona de posible recarga debe estar ubicada hacia el sur del Bajo Cauca en la zona montañosa (desde la cordillera Central y Occidental) y desde la roca encajante conformada por un macizo paleozoico intensamente fracturado. En la Figura 3 se muestra este modelo de recarga.



3. MATERIALES Y METODOS

La identificación de fuentes y zonas de recarga a partir de la aplicación de técnicas isotópicas, debe ser apoyada de una caracterización hidrogeoquímica. La red de muestreo que se diseñó para tal fin, considero además de las propiedades hidrogeológicas, hidrometeorológicas y topográficas, la posible influencia a través de la región de los aspectos que pueden ocasionar el fraccionamiento isotópico. (Figura 3). La red esta conformada por 8 puntos de agua lluvia, identificados con las siglas SPR, 30 puntos de agua subterránea, nombrados con las iniciales GWD, GWB o GWS, según pertenezcan a aljibes, pozos o manantiales y 5 puntos de agua superficial designados con las siglas SRI para muestras de ríos y SLA para muestras de ciénagas.

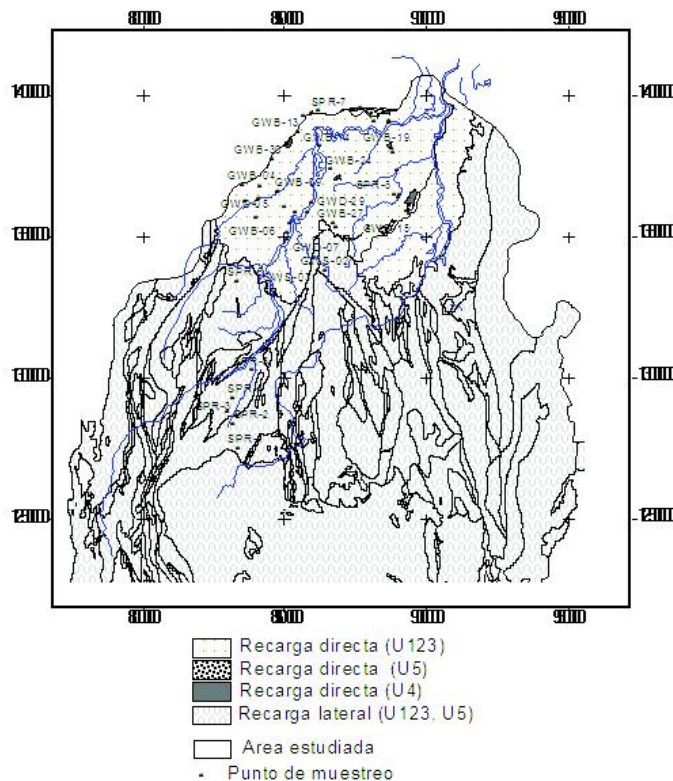
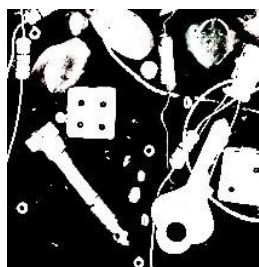


Figura 3.
Modelo de recarga del sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño y red de monitoreo para su validación

Las muestras de agua lluvia se tomaron desde 2.500 hasta 90 metros de altura sobre el nivel del mar, con una diferencia de cota aproximada de 500 metros; considerando la posibilidad de diferentes orígenes de la lluvia en el piedemonte y en la planicie del Bajo Cauca, se tomaron dos muestras cerca de la cota 500 y 2 próximas a la cota 90; el muestreo de agua lluvia se realizó con periodicidad mensual durante un año entre julio de 2005 y junio de 2006. Las muestras de agua subterránea de la unidad U123 se localizaron en cuatro secciones transversales siguiendo



direcciones de flujo y fueron considerados algunos sitios para tomar muestras de agua desde U4 y U5. Los acuíferos y las aguas superficiales fueron muestreadas durante dos escenarios hidrológicos diferentes, en noviembre de 2005 durante la temporada de lluvias y en marzo de 2006 durante el verano. Los análisis isotópicos se realizaron en los laboratorios LaGeo ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) e INGEIS (Tritio) en el marco del convenio 5878 entre CORANTIOQUIA y la Universidad de Antioquia (2006), estos resultados se presentan en la Tabla 1. Los análisis hidrogeoquímicos fueron realizados en los laboratorios de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Antioquia en desarrollo del proyecto CODI «Modelación Hidrogeoquímica y Numérica del los Acuíferos del Bajo Cauca antioqueño» (Palacio, en ejecución).

El proceso de análisis e interpretación de resultados se fundamentó en las hipótesis de recarga propuestas y toma en consideración el modelo hidrogeológico conceptual.

Una exploración descriptiva de los datos de isótopos permitió formarse una primera idea acerca de las condiciones existentes en el sistema hidrológico de la región y detectar algunas situaciones de interés para analizar luego. Desde aquí las diferencias en rangos y valores medios y en el exceso de deuterio insinuaron que las lluvias consideradas tienen diferentes orígenes.

Para obtener información a partir de los datos de lluvia, se realizaron varias «separaciones» y «agrupamientos»: se miraron los datos de cada estación individualmente y se exploró la existencia de alguna relación de linealidad entre los contenidos isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, luego se determinó un contenido, ponderado, de isótopos para cada estación y se propuso una línea meteórica local preliminar. Las tendencias lineales individuales, para cada estación, además de los valores de exceso de deuterio permitieron agrupar los puntos de lluvia por orígenes diferentes y proponer tendencias meteóricas lineales a mayor escala.

Tabla 1.
Composición isotópica de las aguas lluvia, superficial y subterránea en la región del Bajo cauca antioqueño.

Código_Campo	Periodo de muestreo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d	3H
SPR-01	Jul-05	-10,7	-74,0	11	
	Ago-05	-9,9	-67,0	12	
	Sep-05	-10,6	-71,3	13	
	Oct-05	-13,8	-98,8	11	
	Nov-05	-13,1	-92,8	12	
	Dic-05	-5,5	-27,6	16	
	Ene-06	-5,8	-32,5	14	
	Feb-06	-5,1	-27,6	14	
	Mar-06	-6,9	-40,4	14	
	Abr-06	-11,2	-79,0	11	
	May-06	-18,4	-135,2	12	
	Jun-06	-16,7	-122,1	11	
SPR-2	Jul-05	-9,3	-61,3	13	
	Ago-05	-8,0	-52,6	11	
	Sep-05	-9,4	-61,6	13	
	Oct-05	-12,9	-90,1	13	
	Nov-05	-12,8	-90,6	12	
	Dic-05	-5,2	-23,9	18	
	Ene-06	-4,3	-20,6	14	
	Feb-06	-4,2	-20,1	13	
	Mar-06	-7,2	-44,6	13	
	Abr-06	-9,4	-62,0	13	
	May-06	-16,9	-123,1	12	
	Jun-06	-16,8	-123,8	10	

Código_Campo	Periodo de muestreo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d	3H
SPR-3	Jul-05	-8,8	-57,9	12	
	Ago-05	-8,0	-51,6	12	
	Sep-05	-9,2	-60,3	13	
	Oct-05	-10,5	-71,7	12	
	Nov-05	-11,1	-75,2	13	
	Dic-05	-3,5	-10,2	18	
	Ene-06	-3,8	-15,1	15	
	Feb-06	-3,7	-15,9	14	
	Mar-06	-5,8	-35,0	11	
	Abr-06				
	May-06	-16,3	-119,0	11	
SPR-4	Jun-06	-15,0	-110,1	10	
	Jul-05	-7,4	-47,1	12	
	Ago-05	-6,8	-43,9	11	
	Sep-05	-7,6	-47,9	13	
	Oct-05	-10,1	-69,2	11	
	Nov-05	-9,2	-60,4	13	
	Dic-05	-3,2	-11,4	14	
	Ene-06	-3,9	-19,7	11	
	Feb-06	-3,1	-11,9	13	
	Mar-06	-6,1	-39,8	9	
	Abr-06	-8,4	-56,9	11	
SPR-5	May-06	-14,9	-107,9	11	
	Jun-06	-12,3	-88,2	10	
	Jun-05	-12,2	-89,0	9	
	Jul-05	-7,6	-50,8	10	
	Ago-05	-7,6	-49,9	11	
	Sep-05	-7,5	-48,9	11	
	Oct-05	-10,5	-74,2	10	
	Nov-05	-9,8	-67,0	11	
	Dic-05	-2,3	-4,5	14	
	Ene-06	-2,3	-6,2	12	
	Feb-06	-2,2	-5,2	12	
SPR-6	Mar-06	-4,7	-29,2	9	
	Abr-06	-6,7	-42,6	11	
	May-06	-13,6	-96,4	12	
	Jun-06	-13,2	-95,2	10	
	Jul-05	-7,1	-46,5	10	
	Ago-05	-7,5	-50,5	9	
	Sep-05	-7,0	-43,5	12	
	Oct-05	-10,1	-71,7	9	
	Nov-05	-8,9	-61,4	10	
	Dic-05	-3,6	-14,9	14	
	Ene-06	-2,8	-12,7	10	
Feb-06	-1,1	2,8	12		
Mar-06	-5,3	-34,2	8		
Abr-06	-6,9	-46,3	9		
May-06	-15,3	-111,2	11		

Tabla 1.
Composición isotópica de las aguas lluvia, superficial y subterránea en la región del Bajo cauca antioqueño.



Tabla 1.
Composición isotópica de las aguas lluvia, superficial y subterránea en la región del Bajo Cauca antioqueño.

Código	Campo	Periodo de muestreo	? 18O	? 2H	d	3H
SPR-7		May-06	-15,3	-111,2	11	
		Jun-06	-12,0	-86,8	9	
		Jun-05	-11,3	-81,3	9	
		Jul-05	-6,3	-39,6	11	
		Ago-05	-8,0	-52,4	11	
		Sep-05	-6,8	-44,3	10	
		Oct-05	-8,9	-61,7	9	
		Nov-05	-7,5	-49,4	10	
		Dic-05	-1,4	-1,3	10	1.5± 0.5
		Ene-06	-3,0	-11,9	12	(lluvia
		Feb-06	-0,1	7,8	9	anual)
		Mar-06	-4,7	-32,4	5	
		Abr-06	-3,7	-20,1	9	
SPR-8		May-06	-12,3	-89,0	9	
		Jun-06	-11,9	-85,8	10	
		Jun-05	-10,4	-74,2	9	
		Jul-05	-6,5	-40,6	12	
		Ago-05	-7,3	-48,5	10	
		Sep-05	-7,0	-44,8	11	
		Oct-05	-8,8	-65,5	5	
		Nov-05	-8,4	-56,5	11	
		Dic-05	-2,1	-3,8	13	
		Ene-06	-2,9	-15,7	7	
		Feb-06	-0,9	2,2	9	
		Mar-06	-2,7	-14,3	7	
		Abr-06	-4,0	-22,1	10	
GWB-04		May-06	-13,8	-100,5	10	
		Jun-06	-11,9	-86,7	8	
GWB-06		02/Nov/05	-9,6	-69,9		
		01-Mar-06	-6,3	-42,5		
GWB-08		01/Nov/05	-8,4	-58,8		
		01-Mar-06	-7,3	-50,0		
GWB-09		02/Nov/05	-7,3	-51,0		
		01-Mar-06	-6,9	-47,8		
GWB-11		01-Mar-06	-8,9	-61,6		
		01/Nov/05	-8,8	-62,2		
GWB-12		19-Mar-06	-8,8	-63,0		
		01/Nov/05	-7,4	-50,5		
GWB-13		01-Mar-05	-7,3	-50,5		
		01/Nov/05	-9,0	-63,5		
GWB-14		21-Mar-06	-9,0	-65,2		
		01/Nov/05	-7,3	-50,8		
GWB-19		22-Mar-06	-7,5	-54,6		
		06-Ene-06	-8,1	-56,1		
GWB-22		22-Mar-06	-8,1	-55,7		
		01/Nov/05	-7,9	-54,0		
GWB-24		22-Mar-06	-8,0	-55,4		
		01/Nov/05	-8,4	-56,7		0 ± 0.4



Código_Campo	Periodo de muestreo	? 18O	? 2H	d	3H
GWB-26	22-Mar-06	-10,1	-72,9		
GWB-27	22-Mar-06	-7,7	-54,0		
GWB-28	01/Nov/05	-7,5	-51,2		
	01-Mar-05	-6,9	-49,0		
GWB-28A	01-Mar-05	-6,7	-46,4		
GWB-30	01/Nov/05	-7,9	-53,2		
	21-Mar-06	-8,1	-57,0		
GWD-05	01/Nov/05	-6,5	-45,5		
	01-Mar-06	-6,2	-45,5		
GWD-07	01/Nov/05	-7,9	-54,3		
	01-Mar-05	-7,2	-51,0		
GWD-10	06/Nov/05	-8,8	-61,5		
	01-Mar-05	-7,1	-48,5		
GWD-16	01/Nov/05	-7,0	-46,8		
	01-Mar-06	-6,6	-45,2		
GWD-17	03/Nov/05	-6,6	-46,0		
	01-Mar-05	-6,4	-45,0		1.5 ± 0.5
GWD-18	01/Nov/05	-6,3	-41,9		
	22-Mar-06	-6,4	-42,9		
GWD-19	01/Nov/05	-7,3	-49,8		
GWD-20	01/Nov/05	-6,2	-41,6		
	01-Mar-06	-6,6	-44,9		
GWD-21	04/Nov/05	-6,7	-44,3		
GWD-23	03/Nov/05	-7,1	-46,0		
	20-Mar-06	-6,9	-46,4		
GWD-25	01/Nov/05	-7,2	-49,1		
	01-Mar-05	-7,2	-48,9		0 ± 0.4
GWD-29	01/Nov/05	-7,2	-49,5		
	22-Mar-06	-7,1	-50,4		
GWS-01	01/Nov/05	-7,7	-52,9		
	01-Mar-05	-7,5	-51,3		1.4± 0.5
GWS-02	01/Nov/05	-8,0	-53,8		
	01-Mar-05	-7,6	-50,0		
GWS-03	01/Nov/05	-8,5	-59,7		
	01-Mar-05	-7,0	-48,0		
GWS-15	01-Mar-05	-6,8	-47,6		
SLA-04	06-Ene-06	-5,9	-38,4		
	01-Mar-05	-5,2	-36,5		
SRI-01	07-Ene-06	-9,5	-66,8		
	21-Mar-06	-8,8	-60,5		
SRI-02	07-Ene-06	-7,4	-51,1		
	01-Mar-06	-4,9	-33,0		
SRI-03	01/Nov/05	-7,8	-52,9		
	22-Mar-06	-6,4	-43,3		
SRI-05	19-Mar-06	-5,9	-39,7		

Tabla 1.
Composición isotópica de las aguas lluvia, superficial y subterránea en la región del Bajo cauca antioqueño.

Se exploró también la ocurrencia de los efectos que ocasionan fraccionamiento isotópico (Gourcy, et al, IAEA, 2005). El empobrecimiento relativo desde las zonas mas cercanas a la costa



hacia el continente valida el efecto de continentalidad, el empobrecimiento relativo en la composición isotópica conforme aumenta la altura sobre el nivel del mar confirma el efecto altitudinal y permite establecer la relación que determina el gradiente altitudinal; la diferencia de composición isotópica entre meses secos y calidos evidencian el efecto estacional, cuando se detectan cambios inversos en el comportamiento de la precipitación y la composición isotópica se tienen indicios del efecto de cantidad.

Para observar la relación entre aguas lluvia y subterránea se evaluó sobre un gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ la posición de las muestras de agua subterránea de cada unidad hidrogeológica con relación a las tendencias meteóricas a las que se asocian según las posibles hipótesis de fuente de recarga, de esta manera se identificó si la recarga se ha producido directamente desde la precipitación o desde fuentes que han sufrido antes algo de evaporación según las muestras se ubiquen por encima o por debajo de la línea meteórica local (Hunt et al, 2005). El grado de proximidad en la composición isotópica de las aguas superficiales y subterráneas a lo largo de una línea de flujo, permite establecer la relación existente entre ambos compuestos del sistema hidrológico en términos de corrientes ganadoras o perdedoras (Martínez et al, 2006).

En este momento del análisis se deben haber reunido elementos suficientes para establecer las diferentes fuentes de recarga a cada acuífero. Es ya la relación altitudinal mes a mes la que confrontada con la composición isotópica de las aguas subterráneas, particularmente $\delta^{18}\text{O}$, permite identificar zonas de recarga.

Finalmente los datos de tritio para agua lluvia, superficial y subterránea permiten determinar de manera aproximada el tiempo de residencia del recurso hídrico en el acuífero y así la renovabilidad del mismo.

4. RESULTADOS

El análisis de los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para cada una de las muestras recolectadas permitió obtener la línea meteórica local, definir un gradiente altitudinal de la precipitación y establecer las relaciones entre aguas lluvia, superficial y subterránea para identificar zonas de recarga.

4.1. Síntesis desde la hidrogeoquímica

Partiendo de que la composición química del agua subterránea obedece a las características de las fuentes de recarga y de los materiales a través de los cuales ha circulado o ha estado almacenada, se sintetiza una caracterización hidrogeoquímica al sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño.

La unidad hidrogeológica U₁₂₃ almacena en los depósitos aluviales agua mixta con facies próximas a una composición bicarbonatada a clorurada cálcica. La composición bicarbonatada cálcica es característica de aguas poco evolucionadas con corto tiempo de residencia. En la cuenca del río Man y de la margen izquierda del río Cauca, hacia el norte sobre el terciario del Miembro Superior de la Formación Cerrito se presenta composición bicarbonatada sódica, la cual se explica por efectos de intercambio iónico con facies arcillosas gracias a un mayor tiempo de residencia. Algunas manifestaciones de agua clorurada magnésica y clorurada sódica sugieren contaminación antrópica. En invierno se registran puntualmente aguas sulfatadas relacionadas con focos de explotación acuífera y aguas magnésicas tal vez por disolución de cemento dolomítico. En la unidad hidrogeológica U4 el agua es bicarbonatada cálcica a mixta con efectos antrópicos puntuales. La unidad hidrogeológica U5, hacia el norte en las áreas en donde la unidad confinada esta poco profunda o cercana a un sitio en el que aflora, la facie registrada es bicarbonatada cálcica, donde U5 esta efectivamente confinada se registra una facie bicarbonatada sódica, característica de agua evolucionada y con un tiempo de residencia que ha posibilitado la ocurrencia de intercambio iónico.

4.2. Comportamiento de la precipitación

El comportamiento hidrológico de la precipitación en el área que abarcan las 8 estaciones para el muestreo de agua lluvia registra dos regimenes diferentes: un régimen bimodal con dos épocas lluviosas (marzo a mayo y septiembre a noviembre) y dos épocas de menor precipitación (junio a agosto y diciembre a febrero) para las estaciones SPR-01, SPR-02 y SPR-03, ubicadas en la zona montañosa de la cordillera Central entre 2500 y 1500 metros de altura; las estaciones

SPR-04, SPR-05, SPR-06, SPR-07 y SPR-08, entre el piedemonte y el Bajo Cauca, se caracterizan por un periodo seco entre diciembre y marzo y oscilación con lluvias de magnitud importante, entre abril y noviembre. Esta información concuerda con los promedios multianuales de la zona según la cual la época invernal se presenta en el periodo comprendido entre los meses de abril y noviembre y el verano se inicia a partir de diciembre y se prolonga hasta marzo.

4.3. Descripción de los datos isotópicos de agua lluvia

En total se tomaron 96 muestras de agua correspondientes a lluvias mensuales recolectadas durante un año en cada una de las 8 estaciones instaladas. Una síntesis de los parámetros estadísticos básicos indica valores máximos, mínimos y promedio de cada elemento y muestra para la región de estudio (Tabla 2) un exceso de deuterio con un rango amplio de variación (13), condición que insinúa lluvias con diferentes orígenes.

Parámetro	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d
Máximo	-0,1	7,8	18,0
Mínimo	-18,4	-135,2	5,0
Media	-8,0	-52,9	11,1
Rango	18,3	143,0	13,0
Desviación estándar	4,2	33,5	2,2
Numero de datos	99	99	99

Tabla 2
Composición isotópica promedio del agua lluvia para la zona de estudio.

4.4. Tendencias meteóricas de los datos

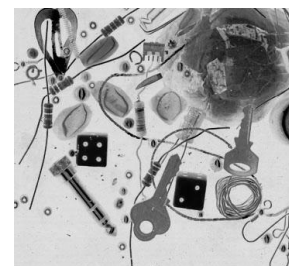
Determinando la tendencia isotópica para cada una de las estaciones de agua lluvia se aprecian situaciones interesantes que permitieron agrupar la precipitación según tres características diferentes. Si bien en todos los casos la tendencia lineal (Tabla 3) registra una pendiente cercana a 8, un grupo conformado por SPR-01, SPR-02 y SPR-03, tienen su intercepto cercano a 15.5 y un exceso de deuterio de 13, SPR-04 y SPR-05 intercepta el eje del $\delta^2\text{H}$ alrededor de 12.5 y registra un exceso de éste compuesto que indicaría un mismo origen de la lluvia para ambas estaciones, por último SPR-06, SPR-07 y SPR-08 presentan un exceso de deuterio entre 9 y 10, indicando otro origen de la lluvia.

De acuerdo con esta discusión podrían determinarse varias tendencias meteóricas locales preliminares (Figura 4), una para toda la zona evaluada, desde la parte alta de la cordillera hasta la planicie del Bajo Cauca cuya relación sería $\delta^2\text{H} = 8,1\delta^{18}\text{O} + 12,5$, para la zona montañosa (parte alta) y definida por las estaciones SPR-01, SPR-02, SPR-03 se tendría $\delta^2\text{H} = 8,3\delta^{18}\text{O} + 13,5$; en la vertiente baja de las cordilleras, SPR-04 y SPR-05, la lluvia se comportaría según la tendencia $\delta^2\text{H} = 8,3\delta^{18}\text{O} + 13,5$; y para la zona plana, una relación isotópica determinada por la lluvia de las estaciones SPR-06, SPR-07 Y SPR-08, que tendría las formas $\delta^2\text{H} = 8,0\delta^{18}\text{O} + 10$ En cada caso es notoria la proximidad de las tendencias meteóricas a la línea meteórica mundial.

De acuerdo con los datos reportados, el efecto altitudinal se comporta según la relación $\delta^{18}\text{O} = -0.0021h - 7.9$ dándose una disminución de $-0.21 \text{‰ } ^{18}\text{O}$ cada 100m de ascenso.

Estación	Pendiente	Intercepto	d
SPR-01	8.3	15.4	13
SPR-02	8.3	15.5	13
SPR-03	8.3	15.4	13
SPR-04	8.2	12.8	12
SPR-05	8.2	12.3	11
SPR-06	8.1	11.1	10
SPR-07	8.0	9.6	10
SPR-08	8.0	9.7	9

Tabla 3.
Tendencias lineales para cada estación.



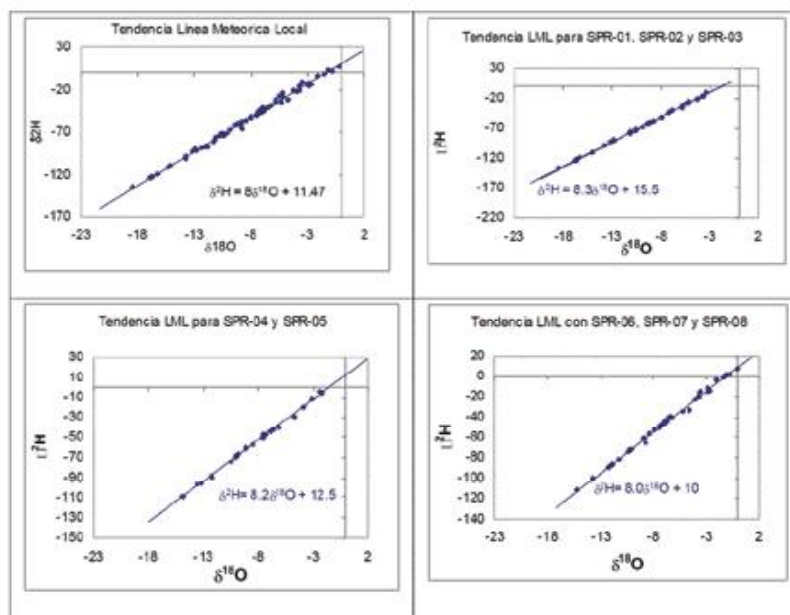


Figura 4.
Tendencia de la línea meteórica local con SPR-06, SPR-07 y SPR-08.

4.5. Relación agua subterránea - agua lluvia

De acuerdo con el modelo conceptual, la recarga de la unidad hidrogeológica U₁₂₃ se estaría efectuando de manera directa, por lo cual se consideran las relaciones isotópicas de los puntos que captan esta unidad con la tendencia meteórica establecida para el Bajo Cauca antioqueño a partir de las estaciones SPR-06 SPR-07 y SPR-08.

La relación agua subterránea-agua lluvia de la unidad hidrogeológica U₁₂₃, muestra un buen agrupamiento en la composición isotópica con excepción del punto GWB-26 que está relativamente empobrecido. La posición de estos puntos en relación con la tendencia meteórica sugiere una leve evaporación del agua lluvia antes de la infiltración (Figura 5). La información reportada en relación con los datos de tritio (Tabla 1) confirma que al tener el agua del acuífero el mismo contenido de tritio del agua lluvia (1.5 ± 0.5), se presenta una recarga reciente y un tiempo de residencia corto. En relación con U4 y U5, el contenido de tritio de 0 ± 0.5, sugiere que el agua almacenada en estas unidades tiene un tiempo de residencia superior a 60 años, tiempo en el que se empezaron a realizar ensayos nucleares. No tiene entonces sentido establecer relaciones latitudinales entre las aguas subterráneas de estas unidades con la lluvia actual de las cordilleras. Serán otras técnicas, por ejemplo el 14C, las que permitan datar esta agua.

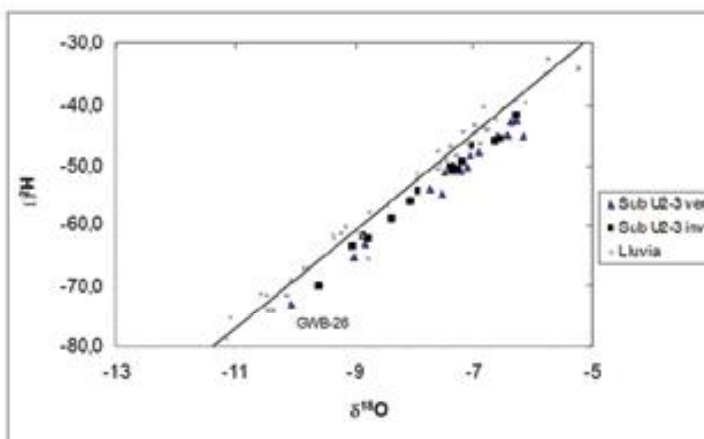
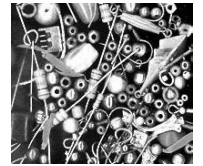


Figura 5.
Relación agua subterránea vs agua lluvia para U₁₂₃.

4.5. Relación agua subterránea-agua superficial

La posición de los puntos de agua superficial en relación con la línea meteórica y los datos de agua subterránea sugiere que el caudal transportado por las corrientes Man y Cacerí en la zona de estudio en época de verano provendría del sistema acuífero libre al registrar una composición isotópica cercana y enriquecida por algo de evaporación. Durante el invierno el agua subterránea y la superficial tienen una composición isotópica similar y cercana a la de la lluvia. La relación isotópica entre las aguas del río Cacerí en su parte media y la muestra GWS27, indica el posible aporte de agua superficial hacia el acuífero (Figura 6).



4.6. Zonas de recarga

La relación isotópica de las aguas subterráneas con el agua lluvia permiten validar la hipótesis que se tenía en el modelo conceptual de recarga según el cual la unidad hidrogeológica U123 se recarga por precipitación local, Si bien no se descarta la idea de una recarga lejana para U4 y U5 la edad reportada por el tritio no permite a partir de la lluvia actual verificar su fuente.

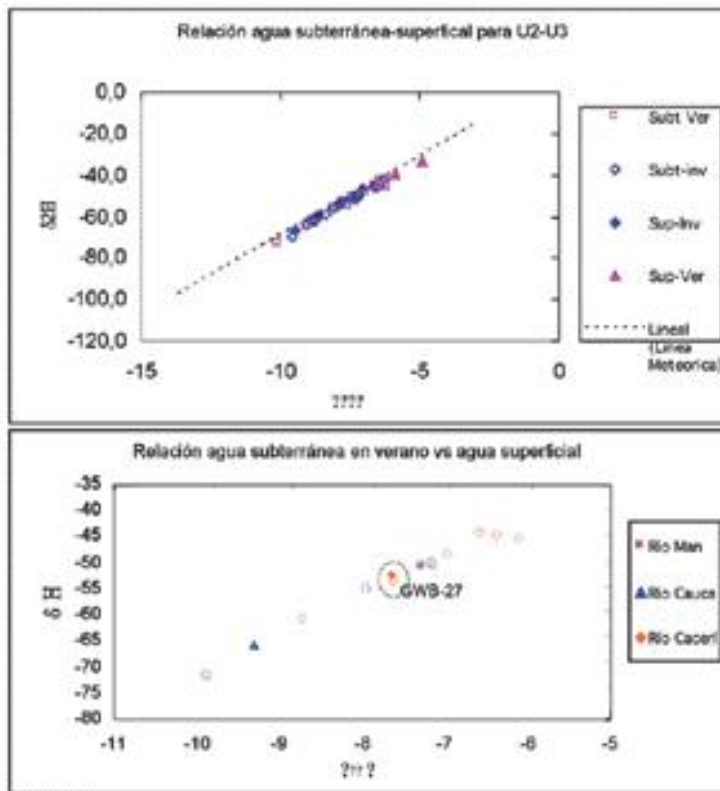


Figura 6. Relación agua subterránea – agua superficial para las unidades U2 y U3

5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

El modelo hidrogeológico del Bajo Cauca antioqueño propone la existencia de dos unidades acuíferas principales: un acuífero libre designado como U₁₂₃ y un acuífero confinado designado como U5; U4 tiene propiedades hidráulicas de acuitardo sin embargo localmente es utilizado como fuente de agua subterránea. Desde la hidrogeoquímica se logró una caracterización preliminar para la unidad U₁₂₃, según la cual predominan las facies bicarbonatadas cálcica y bicarbonatada sódica, la primera asociada principalmente a las aguas almacenadas en depósitos aluviales recientes y la segunda característica del agua que circula a través del Miembro Superior de la Formación Cerrito en el cual probablemente se ha producido intercambio iónico (Na por Ca)



con las arcillas de esta Formación, algunas manifestaciones magnésicas en invierno podrían obedecer a la disolución del cemento dolomítico de la misma Formación Cerrito y la ocurrencia de facies sulfatadas estaría asociada a la presencia de mineralizaciones de sulfatos en la cuenca del río Cacerí. Sin embargo en términos generales no se presenta una variación significativa en las facies entre invierno y verano. El agua almacenada en U5, donde esta unidad esta efectivamente confinada, tiene el carácter de bicarbonatada sódica.

Para el análisis isotópico, después de considerar las posibles relaciones que pueden físicamente darse entre las aguas lluvia, subterránea y superficial se logra establecer una clara tendencia lineal para las aguas meteóricas del Bajo Cauca y de la zona montañosa al sur. Las aguas subterráneas del acuífero libre U_{123} si bien se concentran dentro de un rango de variación entre -10 y -5 para $\delta^{18}O$ y alrededor de -60 para δ^2H , presentan una ligera dispersión que sugiere que el agua en la unidad no confinada no es homogénea o lo que es lo mismo no esta bien mezclada.. El agua de U4 y U5 por el contrario tiene una clara marca isotópica.

Los resultados obtenidos de exceso de deuterio y la tendencia lineal meteórica de cada estación de muestreo de agua lluvia pone de manifiesto que efectivamente en la región ocurren precipitaciones de origen diferente, unas influenciadas por los procesos continentales y que se registran en la parte alta de la cordillera central, otros influenciados tal vez por efectos oceánicos en la planicie del Bajo Cauca y una tercera clase en la que posiblemente se produzcan mezclas de las dos fuentes. Consecuentemente con este comportamiento de la lluvia, y tal como lo confirma el análisis de isótopos estables y de tritio, la recarga del acuífero libre se produce de manera directa desde el agua precipitada localmente y después de sufrir en algunos casos algo de evaporación. Siendo el agua almacenada en U4 y U5 un agua con tiempo de residencia superior a 60 años, no puede con los datos actuales identificarse sus zonas de recarga, por lo tanto se hace necesario la utilización de técnicas como el ^{14}C para datar el agua allí contenida.

Los estudios con isótopos ambientales que ayudan a descifrar enigmas hidrológicos constituyen una novedosa herramienta de análisis poco utilizada aún en el país. El carácter conservativo de los isótopos estables del agua permite utilizarlos como trazadores del ciclo hidrológico. En el caso particular del Bajo Cauca antioqueño permitieron avanzar en el entendimiento del sistema acuífero de la región. De otro lado los isótopos radioactivos permiten determinar edades y tiempos de residencia. Se abren pues nuevas perspectivas en la investigación hidrológica, en la medida en que se profundice en el estudio de los isótopos con propósitos de completar y validar modelos hidrológicos conceptuales y con el fin de identificar y rastrear sustancias o compuestos que natural o antrópicamente entran y afectan el ciclo del agua comprometiendo su sostenibilidad como recurso natural.

AGRADECIMIENTOS A las instituciones y personas sin cuyo apoyo no habría sido posible realizar este estudio: CORANTIOQUIA, la Universidad de Antioquia y la doctora Laurence Gourcy

6. BIBLIOGRAFIA

- Betancur, T., 2005. Estado actual y perspectivas de la investigación hidrogeológica en el Bajo Cauca Antioqueño. Boletín de Ciencias de la Tierra, N. 17, Medellín, pp. 97-108
- Clack y Fritz., 1999. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, New York, 328 P.
- CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia., 2003. Evaluación Hidrogeológica entre los Municipios de Caucasia y Cáceres. Informe final del convenio interinstitucional 1201, Medellín, 365 P.
- CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia., 2004., Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos al norte del municipio de Caucasia. Informe final del convenio interinstitucional 5119, Medellín, 344 P.
- CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia., 2005. Evaluación hidrogeológica y Vulnerabilidad de Acuíferos en la cuenca del Río Cacerí. Informe final del convenio interinstitucional 5691, Medellín, 316 P.
- CORANTIOQUIA y Universidad de Antioquia., 2006. Validación del modelo conceptual de los acuíferos en la territorial Panzenu. Informe final del convenio interinstitucional 5878, Medellín, 104 P.

- Gourcy, L., Groening, M. y Aggarwal, P.K., 2005. Stable oxygen and hydrogen isotopes. Isotopes in the water cycle, past, present and future of a developing science, IAEA, Vienna, pp. 39-51.
- Gómez S. y Colegial J., 2004. Un modelo conceptual de recarga en acuíferos de Bucaramanga a partir de rasgos hidrogeológicos y uso de isótopos estables del agua. Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. Medellín, Colombia, memorias en CD.
- Hunt, R., Tyler, B., Coplen, N., Saad D. y Borchardt, M., 2005. Investigating surface water-well interaction using stable isotope ratios of water. *Journal of Hydrology*, v. 302, iss. 1-4, pp. 154-172.
- Herrera, H. M., Romero, L. M., Taupin, D. y Vargas, M., 2004. Estudio hidrogeológico e hidroquímico del acuífero Morroa, Sucre. Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. Medellín, Colombia, memorias en CD.
- Huddart, P.A., Longstaffe, F.J. y Crowe, A.S., 1999. δD and $\delta^{18}O$ evidence for inputs to groundwater at a wetland coastal boundary in the southern Great Lakes region of Canada. *Journal of Hydrology*, V. 214, pp. 18-31.
- Martínez, D., Massone, H., Bocanegra, E. y Quiroz, M., 2006. Hidrogeoquímica y flujo subterráneo en la cuenca del río Quequen, provincia de Buenos Aires, Argentina. X Congreso Latinoamericano de Hidrogeología. Asunción, Paraguay, memorias en CD.
- Mejía O., 2006. Técnicas geoestadísticas en hidrogeología, caso de estudio Bajo Cauca antioqueño. Trabajo de grado, Especialización en Sistemas de Información Geográfica, Universidad San Buenaventura, Medellín, 108 P.
- Palacio, C. y Betancur, T., en ejecución. Modelación numérica e hidrogeoquímica del sistema acuífero del Bajo Cauca Antioqueño. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Palacio, P., 2007. Identificación de fuentes y zonas de recarga a partir de isótopos estables del agua. (Caso de estudio bajo cauca antioqueño). Proyecto de investigación, Maestría en Ingeniería con énfasis en Ambiental. Universidad de Antioquia, Medellín, 93 P.
- Rodríguez C., 2004. Línea meteórica isotópica de Colombia. *Revista Meteorología Colombiana* N. 8, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, pp. 43-51.
- Toro, L., Taupin, D., Gourcy, L., Vargas, M., 2004. Aplicación de técnicas isotópicas para identificar la recarga reciente de acuíferos (casos de Colombia). Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología. Medellín, Colombia, memorias en CD.
- Zapata, G. y Cossio, U., 1993. Geología de la plancha 93 (Cáceres) escala 1:100.000. Ingeominas, Medellín, 98 P.

