

Uso de hidroquímica e isótopos ambientales para la evaluación de la conexión hidrológica entre el agua subterránea y el humedal ciénaga Colombia.

(Un primer acercamiento)

Recibido para evaluación: 10 de Julio de 2008

Aceptación: 1 de Agosto de 2008

Recibido versión final: 27 de Agosto de 2008

Diana Patricia Santa Arango¹

Diana Carolina Martínez²

Teresita Betancur Vargas³

RESUMEN

El entendimiento de las condiciones de flujo de agua desde y hacia un humedal se basa, en principio, en la interpretación de información hidrológica, pero además la incorporación de técnicas no convencionales como lo son la hidroquímica y la hidrología isotópica y permite un mayor nivel de comprensión de los sistemas hidrológicos, en la medida en que es posible identificar el origen, la evolución del agua y los tiempos de tránsito y residencia en los diferentes compartimientos del ciclo hidrológico. El sistema hidrológico Ciénaga Colombia representa un ecosistema estratégico en el Bajo Cauca antioqueño y en pro de su sostenibilidad, se requiere un mejor conocimiento de él. Se presentan aquí los primeros resultados del proyecto «Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca Antioqueño» que la Universidad de Antioquia adelanta en convenio con el Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, inspirados en la idea de usar técnicas isotópicas para evaluar procesos hidrológicos en humedales.

PALABRAS CLAVE: Bajo Cauca antioqueño, Hidroquímica, Humedales, Ciénaga Colombia, Isótopos ambientales.

ABSTRACT

The understanding of water flow paths around a wetland is based on the hydrologic information interpretation. Although the incorporation of non-conventional techniques like hydrochemistry and isotopic hydrology allows a major compression level of hydrologic systems: They allow identify origin and evolution of water, movement times, permanence in the hydrologic cycle components. Ciénaga Colombia wetland and its catch area, represent a strategic ecosystem located in the Bajo Cauca antioqueño. The natural conditions and the consequences of the human intervention on the wetland impose the need to approach its study and understanding, seeking to be able to design effective measures to guarantee its sustainability. We presents the firsts results of the project developed by Antioquia University and IAEA: «Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca Antioqueño» which is part of the program: «Isotopic techniques for assessment of hydrological processes in wetlands» by International Atomic Energy Agency, IAEA. The general objective of the study is evaluate the dynamic of water flow, in and out of the wetland in the Bajo Cauca Antioqueño, using geochemical and isotopic techniques,

KEY WORDS: Hydrochemistry, Wetland, Ciénaga Colombia, Environmental isotopes.

1 Ing.

2 Ing.

3 Dra., Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

Grupo GIGA de la Universidad de Antioquia.

diana.santa@gmail.com



1. INTRODUCCIÓN

El sistema hidrológico de Ciénaga Colombia ubicado en el Bajo Cauca antioqueño es un ecosistema estratégico; constituye un mecanismo regulador de caudales entre épocas de invierno y verano y soporta una amplia variedad de recursos ecológicos que son significativos en el desarrollo socio- económico de la zona. Este complejo hídrico se encuentra fuertemente impactado por actividades humanas asentadas en el área, que introducen cambios en su dinámica natural, afectando entre otros, los procesos hidrológicos que involucran tanto las corrientes superficiales como el acuífero libre de la región. Esta investigación se encuentra enmarcada dentro del programa «Isotopic techniques for assessment of hydrological processes in wetlands» del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, entidad que apoya la realización del estudio «Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca Antioqueño» cuyo objetivo es evaluar la dinámica del flujo desde y hacia un humedal en el Bajo Cauca antioqueño, usando técnicas hidroquímicas e isotópicas, apoyados en modelación numérica, con el fin de establecer una metodología de análisis en pro de la sostenibilidad de este tipo de ecosistemas. Este artículo presenta algunos resultados preliminares en relación con los aspectos de la caracterización hidroquímica e isotópica. La investigación, estudio, evaluación y control de los componentes del ciclo hidrológico, incluyendo las aguas subterráneas, requiere un amplio conjunto de conocimientos, medios, observaciones y métodos que permitan abordar desde diversos puntos de vista complementarios la complejidad y variabilidad de cada uno de esos componentes, de sus interrelaciones y de su relación con el medio físico, químico y biótico. Difícilmente una única técnica o método lleva a resultados seguros que generen la confianza de que se han logrado modelos conceptuales con una aproximación razonable a la realidad (Custodio, 2002). Es así como en los últimos años, además de las técnicas hidrológicas, se han venido desarrollando métodos químicos, hidroquímicos e hidrogeoquímicos, que en conjunto con las técnicas isotópicas permiten marcar la infiltración del agua subterránea, reconocer el goteo entre acuíferos, definir áreas de intrusión marina, evaluar aportes de flujo base hacia corrientes superficiales e investigar condiciones de recarga a través de la zona no saturada. Las características químicas del agua permiten identificar origen y movimiento de los solutos a través de los sistemas subterráneos. Los denominados trazadores ambientales ayudan a entender el fenómeno de la recarga, a establecer condiciones del flujo y escalas de tiempo en relación con la residencia del agua subterránea, y tienen un enorme potencial para evaluar sostenibilidad y vulnerabilidad (Betancur, 2008). En el campo de la hidrología, toda interpretación isotópica debe estar acompañada o precedida de una caracterización hidroquímica y el análisis acoplado que se haga de ambos resultados redundará en un mejor entendimiento de la dinámica de los sistemas hidrológicos.

2. EL HUMEDAL CIÉNAGA COLOMBIA Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El sistema hidrológico Ciénaga Colombia se encuentra ubicado en la parte baja de la cuenca del río Man, seis kilómetros al suroeste del casco urbano del municipio de Caucasia en el Bajo Cauca antioqueño (Figura 1). Por ser un humedal de rivera, constituye un mecanismo regulador de caudales entre épocas de invierno y verano, con un espejo de agua que oscila entre 2 y 0.6 Km² y una profundidad entre 4 y 0.6 m. Los principales afluentes de la ciénaga son quebrada Ciénaga, caño Ucrania y quebrada La Aduana. La interacción con las aguas subterráneas del acuífero libre regional, que en la zona tiene espesores entre 10 y 50 metros, representa sin lugar a dudas otra fuente de intercambio másico en el humedal. Bajo estas consideraciones no hay duda de que el humedal Ciénaga Colombia se enmarca dentro de la clase de humedales que dependen del agua subterránea según la definición dada al respecto por Custodio en 1999. El sistema acuífero del Bajo Cauca antioqueño está conformado por tres unidades hidrogeológicas la unidad hidrogeológica U₁₂₃ que tiene el carácter de acuífero libre, está asociada a los depósitos aluviales recientes y al Miembro Superior de la Formación sedimentaria Cerrito; la unidad U₄ que constituye un acuífero –Miembro Medio de la Formación Cerrito-, y U₅, un acuífero confinado asociado al Miembro Inferior de la Formación Cerrito. (Betancur, 2005). El sistema hidrológico Ciénaga Colombia está asociado

a la cuenca superficial y al área de flujo subterráneo de la unidad hidrogeológica U_{123} y tendría una extensión cercana a 80 Km².

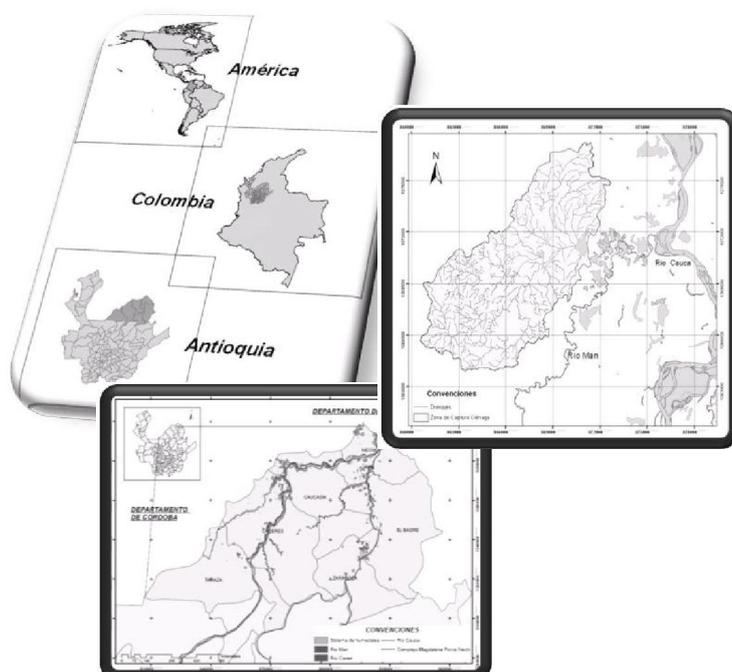


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Acerca del comportamiento cíclico de la dinámica hidrológica en este sistema se registra una alta complejidad, al estar ella regida por la combinación de factores hidroclimatológicos que trascienden el entorno local y tienen relación con toda la cuenca del río Cauca. Localmente ocurren interacciones entre el cuerpo léntico, las corrientes superficiales y el acuífero libre; en principio el agua subterránea sería la responsable de mantener la humedad en la ciénaga en épocas de estiaje, mientras que durante las temporadas invernales, se recibirían aportes superficiales y subterráneos. Sin embargo el tránsito de un régimen hidrológico bimodal, desde la zona andina, hacia otro monomodal, propio de la región Caribe, hace que no coincidan épocas de sequía y lluvia, aumentando la complejidad del sistema (Betancur, 2008).

3. METODOLOGÍA

3.1 La hidrogeoquímica y la hidrología isotópica como métodos de análisis en sistemas hidrológicos

Los análisis químicos del agua se han practicado históricamente con el fin principal de evaluar su calidad; sin embargo la composición del agua en los distintos compartimentos del ciclo hidrológico está condicionada tanto por factores naturales como antrópicos. La composición química de las aguas subterráneas es el resultado de la combinación de las características químicas propias del agua que, proveniente de la lluvia o de fuentes superficiales, entra al acuífero y las reacciones que se presentan con el medio mientras ésta circula a través del suelo y durante su almacenamiento en la roca (Appelo y Postma, 2005). La hidroquímica tiene entonces como



principal propósito el trazar el origen y la historia del agua. Para llevar a cabo esa interpretación se requieren datos de parámetros fisicoquímicos tales como temperatura, pH, conductividad y potencial de óxido-reducción; se precisa conocer la concentración de los iones mayoritarios: sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-) y nitratos (NO_3^-); se obtienen argumentos adicionales a partir del conocimiento de la presencia de compuestos minoritarios, trazas, compuestos microbiológicos, orgánicos y volátiles.

Una buena manera de caracterizar químicamente el agua y establecer una aproximación tentativa acerca de su origen y grado de evolución es representando la concentración de iones mayores en diagramas Piper. Un diagrama Piper es una combinación de dos triángulos equiláteros alineados en la base y un rombo entre ellos. Un triángulo contiene, en miliequivalentes, la composición porcentual de cationes y el otro la de aniones; la proyección de esa composición sobre el rombo central permite caracterizar diferentes tipos de agua.

En áreas continentales, el agua lluvia es normalmente bicarbonatada cálcica. De acuerdo con la secuencia de Chebotarev, condicionadas por la naturaleza del medio sólido que determina la solubilidad y abundancia de elementos químicos, y el tiempo de reacción, en términos generales, las aguas subterráneas empiezan siendo, según la concentración de aniones, bicarbonatadas, luego sulfatadas y finalmente cloruradas y, de acuerdo con los cationes, cálcicas, magnésicas y después sódicas.

Glynn y Plumer (2005) destacan con suficientes argumentos, la contribución que la hidrogeoquímica ha hecho durante los últimos 50 años en pro del entendimiento de los procesos que ocurren en los sistemas hidrogeológicos a partir de la teoría del equilibrio, de la investigación de los procesos de oxidación-reducción y la datación con radiocarbono. Junto con ello, se destacan también los avances en las técnicas analíticas que permiten detectar la presencia de sustancias químicas e isótopos en muestras muy pequeñas y con muy bajas concentraciones, y el creciente poder computacional que permite usar novedosas técnicas de modelación numérica para refinar las interpretaciones de los sistemas de flujo/reacción en aguas subterráneas (Betancur, 2008).

La hidrología isotópica se define como la disciplina que se ocupa de las investigaciones isotópicas para resolver un amplio espectro de problemas hidrológicos relacionados con los recursos superficiales y subterráneos y los estudios ambientales en los sistemas hidro-ecológicos.

Si bien las primeras bases teóricas de la isotopía, el fraccionamiento isotópico y su posible aplicación en hidrología, se aportaron desde los años veinte (Aggarwal, et al., 2005), el uso de herramientas isotópicas y técnicas nucleares en estudios del ciclo hidrológico empezó a crecer durante los años que siguieron la segunda guerra mundial, a partir del monitoreo del tritio incorporado a la atmósfera desde las explosiones termonucleares y del uso de radioisótopos como herramienta de datación en geología. Ha sido la Sección de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, el ente que ha servido como catalizador para la maduración de esta disciplina (Betancur, Palacio, 2008)

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 permite entender los fenómenos de recarga y descarga, confirmar la distribución de las unidades hidroestratigráficas y conocer las interconexiones de flujos superficial y subterráneo.

Aunque todos los elementos presentes en sistemas hidrogeológicos tienen algunos isótopos, sólo unos pocos, los que se encuentran en mayor cantidad como son los de los elementos Hidrógeno, Carbono, Nitrógeno, Oxígeno y Azufre, son de interés hidrológico. Además la propia molécula de agua y las de muchos compuestos naturales involucran dentro de su estructura química isótopos de un mismo elemento. Se abre entonces la posibilidad de utilizar estos isótopos ambientales, estables y radioactivos, como «trazadores» naturales de la ruta del agua en el ciclo hidrológico.

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 Viena Estándar Ocean Water, VSMOW, con relación a los de ^3H

como UT, unidades de tritio (Clark y 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; la presencia de tritio permite reconocer un agua originada después del inicio de los ensayos nucleares, mientras un agua sin tritio sería un agua antigua.

El comportamiento promedio global de las lluvias se ajusta a la línea meteórica mundial, descrita por Craig en 1961 (Clark y Fritz, 1999) según la ecuación 1.

$$\delta^2H = 8.13\delta^{18}O + 10.8\%_0 VSMOW \quad (1)$$

La composición isotópica del agua lluvia está condicionada por los efectos orográfico o de altitud, de latitud, de continentalidad y de abundancia, que determinan no sólo las condiciones de temperatura, sino también con ellas, el origen de las masas de aire que transportan el vapor de agua. Así a nivel local, esta recta puede presentar ligeras variaciones en la pendiente y el intercepto. Para el Bajo Cauca antioqueño, Palacio y Betancur (2007) reportan una línea meteórica idéntica a la línea global.

3.2 Aplicación de métodos hidroquímicos e hidrología isotópica para caracterizar el sistema hidrológico Ciénaga Colombia

Si bien se ha afirmado que la caracterización isotópica de un sistema hidrológico se sustenta en una previa caracterización hidrogeoquímica, es cierto que las interpretaciones que de una u otra información se haga después de que se cuenta con ambos tipos de datos, entran a acoplarse en un ciclo de confrontaciones y formulación de hipótesis que finalmente desencadenan en un sólido modelo hidrológico conceptual. A partir de la hidrogeoquímica, se formulan preguntas que se espera sean respondidas con los datos isotópicos. Por su parte los datos isotópicos pueden conducir a nuevas interpretaciones de la información hidrogeoquímica disponible (Figura 2).

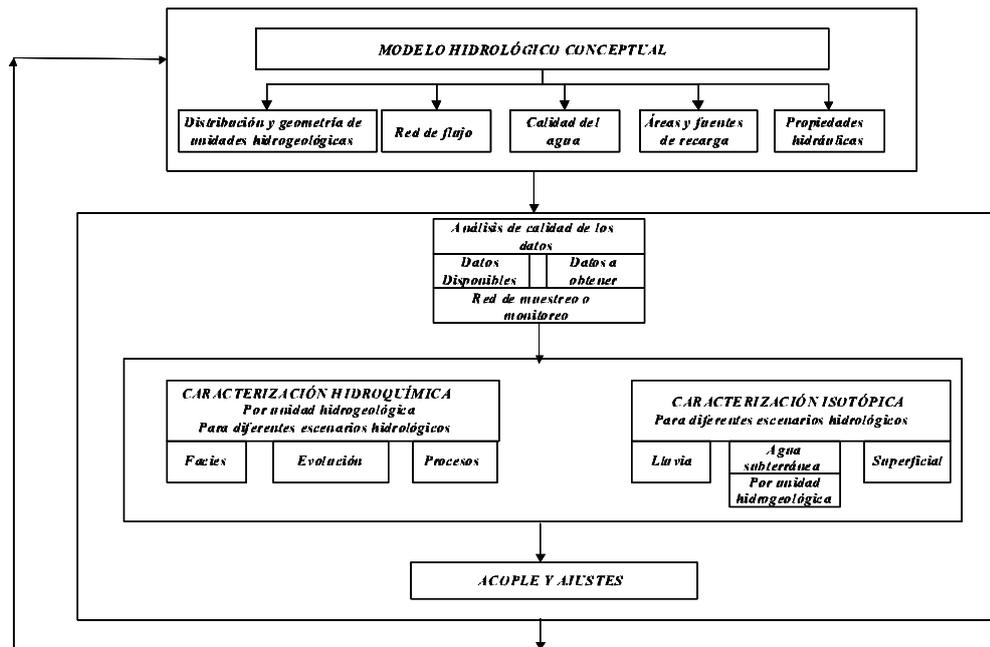


Figura 2. Diagrama metodológico para la construcción del Modelo (Betancur, 2008)

Adoptadas como metodología para fortalecer la caracterización hidrológica, la consecución de los datos hidrogeoquímicos e isotópicos que permitan cumplir con ese propósito, debe sustentarse en el adecuado diseño de una red de monitoreo, acompañado de un riguroso control de la calidad analítica de los reportes de laboratorio. Para la realización de este estudio, se parte de un modelo hidrogeológico regional existente para la zona del Bajo Cauca antioqueño y de la hipótesis, deducida de la piezometría, de que el humedal Ciénaga Colombia depende de las aguas subterráneas del acuífero libre. Considerando la zona de captura superficial del humedal y extendiendo aproximadamente 1 kilómetro su área de influencia, se tuvieron en cuenta condiciones hidrográficas, hidrogeológicas, hidrometeorológicas, topográficas, las posibles relaciones de interacción entre componentes superficial y subterráneo y la posibilidad de acceso a los sitios de muestreo para diseñar una red de monitoreo (Figura 3). Con el fin de tratar de verificar la relación entre aguas lluvia y aguas superficiales con el acuífero libre, se analizaron condiciones hidroquímicas e isótopos estables $d^{18}O$ y d^2H en los compartimientos terrestres del ciclo hidrológico.

La red está conformada por 22 puntos de agua subterránea, 11 de agua superficial y 1 de agua lluvia (Tabla 1). Los puntos de agua subterránea se procuraron ubicar sobre líneas de flujo que iniciaran en los puntos y llegaran al humedal; se establecieron estaciones de muestreo en las tres corrientes de agua –Caños Ucrania, Aduana y Colombia– que proveen caudal a la ciénaga y en el punto de descarga hacia Caño Ucrania; también se incluyeron en la red, muestras superficiales antes de la confluencia de caño Ucrania en el río Man y en éste, antes y después de recibir agua de la ciénaga. La idea inicial fue la de tomar muestras que permitieran evaluar escenarios hidrológicos contrastantes entre épocas húmedas y secas.

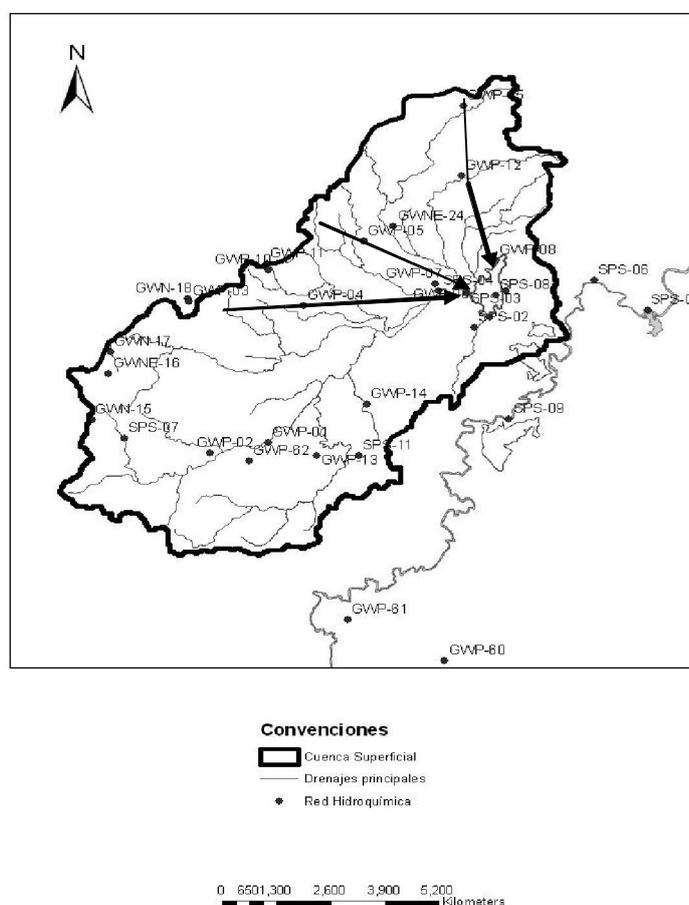


Figura 3. Red de muestreo (Universidad de Antioquia – OIEA, 2008)

Con relación al agua lluvia para el análisis de los isótopos estables del agua $d^{18}O$ y d^2H , la toma de muestras se hizo cada mes en una estación de precipitación ubicada en predios de la hacienda La Candelaria de la Universidad de Antioquia. Esta estación venía operando desde julio de 2005 en el marco del proyecto «Validación del modelo conceptual de los acuíferos en la territorial Panzenú», realizado por CORANTIOQUIA y la Universidad de Antioquia (2006).

CÓDIGO	NOMBRE	X	Y	TIPO	Observaciones
ALL	Agua lluvia	878237	1385098	Agua Lluvia	
GWN-15	El Mirador Las Brisas	861304	1367664	Subterránea	1
GWN-17	Rancho Tijuana	861756	1369558	Subterránea	1
GWN-18	Ajibe Santa Clara	863611	1371043	Subterránea	1
GWNE-16	Rancho Alegre	861708	1368943	Subterránea	1
GWNE-24	La candelaria	868551	1373052	Subterránea	1
GWP-01	Jesusalen	865547	1367044	Subterránea	1
GWP-02	Charrascal	864140	1366753	Subterránea	1
GWP-03	Santa Clara	863638	1370953	Subterránea	1
GWP-04	Piez. Jalisco	866386	1370829	Subterránea	1
GWP-05	Piez. Candelaria	867832	1372630	Subterránea	1
GWP-06	P. Aduana-1	869572	1371442	Subterránea	1
GWP-07	P. Aduana-2	869570	1371440	Subterránea	1
GWP-08	P. Norte cienga	871000	1372098	Subterránea	1
GWP-09	Dinastia	871243	1371241	Subterránea	1
GWP-10	El Porvenir-1	865555	1371827	Subterránea	1
GWP-11	El porvenir-2	865518	1372011	Subterránea	1
GWP-12	La Siberia	870182	1374433	Subterránea	1
GWP-13	El Topacio	866717	1366672	Subterránea	1
GWP-14	Hoyo Hondo-Jaicana	867925	1368098	Subterránea	1
GWP-15	Costa rica	870232	1376367	Subterránea	1
GWP-60	La Coquera	869788	1361011	Subterránea	1
GWP-61	Hda Buenos Aires	867459	1362127	Subterránea	1
SPS-01	Ucrania de Ciénaga	831371	1370237	Superficial	3
SPS-02	Ucrania a Ciénaga	870497	1370237	Superficial	2
SPS-03	Q Ciénaga a Ciénaga	870299	1371170	Superficial	2
SPS-04	Aduana a Ciénaga	869642	1371256	Superficial	2
SPS-05	Rio Man abajo	874655	1370724	Superficial	5
SPS-06	Ucrania a Man	873384	1371546	Superficial	3
SPS-07	Quebrada del Medio en Sta Rosita	862082	1367171	Superficial	2
SPS-08	Ciénaga centro	871011	1371133	Superficial	4
SPS-09	Rio Man arriba	871331	1367698	Superficial	5
SPS-11	Quebrada del Medio en Topacio	867717	1366672	Superficial	2
SPS-12	Rio Man-Manizales	857488	1353863	Superficial	5

OBSERVACIONES:

1. Punto de agua subterránea sobre una línea de flujo.
2. Corriente que alimenta la Ciénaga
3. Corriente que desagua la Ciénaga
4. Punto en el centro del cuerpo de la Ciénaga
5. Rio Man

Durante un año, entre agosto de 2007 y julio de 2008, ha operado la red de monitoreo en la que, con apoyo de los habitantes de la zona, se toman registros semanales de nivel piezométrico, y durante cuatro comisiones de campo, se tomaron 56 muestras de agua subterránea y superficial para análisis hidroquímicos e isotópico (Tabla 2). Los muestreos se realizaron en septiembre y noviembre de 2007 y en febrero y abril de 2008.

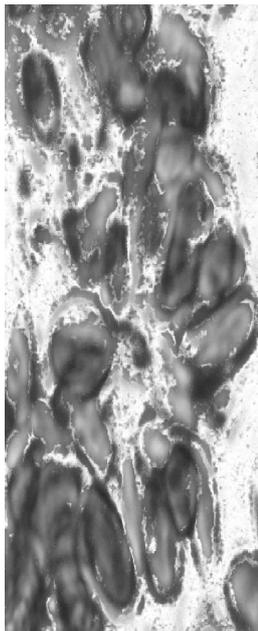
Tabla 1. Red de monitoreo hidroquímico, isotópico y piezométrico.

Tabla 2. Resultado hidroquímicos

CÓDIGO	Fecha	Facie	X m	Y m	pH	Conductividad mS/cm	Temperatura °C	Na mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	HCO ₃ mg/l	CO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l
ALL	23/04/2008	Ca-HCO ₃	ND	ND	ND	ND	ND	0.518	11.2	0.317	1.52	42.4	0.01	3
ALL	13/09/2007	Na-HCO ₃ -ND3	ND	ND	5.92	1	ND	0.221	0.0045	0.046		2.9	0.01	
GWN-15	19/11/2007	Ca-Na-Cl-HCO ₃	861304	1367664	5.5	ND	ND	1.167	1.96	0.322	2.1	3.4	0.01	1.5
GWN-15	13/09/2007	Na-HCO ₃ -Cl-SO ₄	861304	1367664	3.8	ND	ND	1.966	0.0045	0.3	1.9	3.5	0.01	1.5
GWN-15	24/04/2008	Mg-Na-Cl-HCO ₃	861304	1367664	6.42	22.9	29.4	1.27	0.5	0.783	3.29	2.82	0.01	1.5
GWN-17	19/11/2007	Na-Vg-Cl-HCO ₃	861756	1369558	4.78	49.6	ND	1.002	0.5	0.456	2.5	4	0.01	1.5
GWN-18	19/11/2007	Na-Ca-Cl-HCO ₃	863611	1371043	5.32	51.5	29.4	6.619	2.63	1.178	11.3	17.1	0.01	1.5
GWN-18	12/09/2007	Na-Vg-Ca-HCO ₃ -Cl	863611	1371043	5.54	90	28	7.51	3.36	2.474	12.2	22.7	0.01	1.5
GWNE-43	23/04/2008	Ca-Na-HCO ₃	849496	1356757	5.84	27	27.8	1.93	2.66	0.862	2.67	19	0.01	1.5
GWNE-44	23/04/2008	Ca-Vg-HCO ₃	854629	1355671	6.27	95	28.1	3.32	12.5	4.16	1.89	79.3	0.01	1.5
GWNE-46	23/04/2008	Na-Vg-Ca-Cl-HCO ₃	858773	1358551	4.81	32	29.8	2.73	1.58	1.26	2.81	4.44	0.01	1.5
GWNE-58	23/04/2008	Mg-Na-HCO ₃	857678	1353429	4.85	10	28	1.1	0.5	0.685	0.75	8.91	0.01	1.5
GWP-01	12/09/2007	Ca-Na-HCO ₃ -Cl	865547	1367044	6.1	172	25	13.283	13.5	2.974	16.4	52.9	0.01	3.9
GWP-02	19/11/2007	Ca-Na-HCO ₃ -Cl	864140	1366753	5.26	24.9	ND	2.604	2.38	0.46	2.6	10.6	0.01	1.5
GWP-02	12/09/2007	Ca-Na-HCO ₃	864140	1366753	5.1	67	32	2.759	7.59	0.913	2.4	27.6	0.01	1.5
GWP-02	24/04/2008	Ca-Na-HCO ₃	864140	1366753	6.82	65.6	28.6	3.91	6.42	1.08	3.96	33.3	0.01	1.5
GWP-03	24/04/2008	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄	863638	1370953	5.98	205.5	30.1	14.81	14	5.17	12.7	73.3	0.01	27.8
GWP-04	24/04/2008	Na-HCO ₃	866386	1370829	7.47	953	28.6	215	29	10.9	42.3	567	0.01	3.89
GWP-04	12/09/2007	Na HCO ₃	866386	1370829	7.05	7.93	28.5	160.367	35.33	23.039	14.3	566.5	0.01	1.5
GWP-04	19/11/2007	Na-Ca-HCO ₃	866386	1370829	7.5	27.8	29.8	67.001	32.36	13.959	8.8	393.1	0.01	1.5
GWP-05	12/09/2007	Mg-Ca-Na-HCO ₃	867832	1372630	7.26	5.11	ND	36.714	43.67	50.258	6.1	371.4	0.01	1.5
GWP-05	24/04/2008	Mg-Ca-Na-HCO ₃	867832	1372630	ND	ND	ND	30.8	27.9	24	4.67	260	0.01	3.71
GWP-06	18/11/2007	Ca-Vg-Na-HCO ₃	869572	1371442	7.46	14.5	31	28.143	43.92	21.504	6	258.9	0.01	1.5
GWP-06	13/09/2007	Ca-Vg-Na-HCO ₃	869572	1371442	8.07	30.2	29.1	30.575	40.18	22.97	5.6	203.1	0.01	3.7
GWP-07	28/02/2008	Ca-Vg-Na-HCO ₃	869570	1371440	7.28	527	30.2	34.46	58.1	31.47	5.1	406	0.01	1.5
GWP-07	23/04/2008	Ca-Vg-HCO ₃	869570	1371440	6.2	694	28.7	34.6	68	28.3	6.14	476	0.01	3
GWP-07	18/11/2007	Ca-Vg-Na-HCO ₃	869570	1371440	6.81	0	31	16.78	35.82	18.253	3.1	159.9	0.01	1.5
GWP-08	28/02/2008	Na-Vg-HCO ₃ -Cl	871000	1372098	6.68	686	30.1	121.89	13.4	24.68	96.5	288	0.01	1.5
GWP-08	18/11/2007	Na-HCO ₃ -Cl	871000	1372098	5.95	54.5	ND	19.725	1.18	0.336	7.1	42.9	0.01	1.5
GWP-08	13/09/2007	Na-Vg-HCO ₃	871000	1372098	6.6	205	ND	50.915	6.54	10.899	11.7	143.5	0.01	1.5

CÓDIGO	Fecha	Facie	X	Y	pH	Conductividad	Temperatura	Na	Ca	Mg	Cl	HCO3	CO3	SO4
			m	m		mS/cm	°C	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
GWP-08	23/04/2008	la-Mg-HCO3	871000	1372098	7.92	1425	29.6	290	37.9	47.5	121	784	0.01	3.94
GWP-09	18/11/2007	Ca-HCO3	871243	1371241	6.51	83	29.5	3.104	4.72	1.369	3.3	57.1	0.01	1.5
GWP-09	13/09/2007	Ca-Mg-Na-HCO3	871243	1371241	6.43	99	28.6	6.845	11.01	3.686	3.7	60.1	0.01	1.5
GWP-09	28/02/2003	Ca-Na-Mg-HCO3	871243	1371241	6.8	111	27.6	7.86	11.3	3.74	5.2	70.2	0.01	1.5
GWP-09	23/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	871243	1371241	6.23	127.6	27.7	8.99	10.7	4.96	6.49	67.1	0.01	1.5
GWP-10	24/04/2003	Ca-HCO3	865555	1371827	6.85	201.9	28.5	7.85	26.1	4.74	11.8	110	0.01	1.5
GWP-10	12/09/2007	Ca-Na-HCO3-CI	865555	1371827	6.85	ND	ND	4.661	7.94	1.929	9.3	29.8	0.01	1.5
GWP-10	19/11/2007	Ca-Na-HCO3-CI	865555	1371827	6.84	61	ND	5.868	11.26	2.295	11.6	45.5	0.01	1.5
GWP-12	14/09/2007	Na-Mg-Ca-HCO3-CI	870182	1374483	6.85	655	ND	76.475	39.7	26.171	86.2	246.8	0.01	1.5
GWP-13	19/11/2007	Mg-Ca-Na-HCO3-CI	866717	1366672	6.47	305	28.5	26.41	23.72	17.837	35.8	161.5	0.01	1.5
GWP-13	24/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3-CI	866717	1366672	6.54	458	28.3	32	50.4	23.9	42.1	266	0.01	1.5
GWP-14	19/11/2007	Na-HCO3	867925	1366098	5.52	28	30.3	6.333	2.15	0.263	4.4	56.8	0.01	1.5
GWP-15	24/04/2003	Ca-HCO3-CI	870232	1376367	6.54	176.7	27.6	6.71	23.4	2.85	15	80.2	0.01	3.03
GWP-60	24/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	860788	1361011	6.32	167	28.4	11.5	15	8.16	0.75	118	0.01	1.5
GWP-61	24/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	867459	1362127	6.2	131	29.9	7.96	14.8	5.66	3.89	83	0.01	1.5
GWP-62	24/04/2003	Na-Ca-Cl-HCO3	865091	1366525	5.16	94	28.2	13.2	5.96	1.05	17.3	17.4	0.01	1.5
GWP-66	23/04/2003	Ca-Na-Mg-HCO3	868399	1358202	6.35	172	27.7	12.4	22.4	6.29	4.61	117	0.01	1.5
GWP-F	12/09/2007	Na-Ca-HCO3	865555	1371827	6.3	129	27.9	45.075	11.52	2.676	2	75.9	0.01	1.5
SPS-01	28/02/2003	Mg-Ca-HCO3	831371	1370237	7.26	83	30.2	4.21	9.28	5.78	2.7	52.7	0.01	1.5
SPS-01	13/09/2007	Mg-Na-Ca-HCO3	831371	1370237	6.57	30	30.2	2.861	1.59	1.674	0.75	19.6	0.01	1.5
SPS-01	18/11/2007	Mg-Ca-Na-HCO3	831371	1370237	6.57	53	32.8	2.31	2.49	2.211	0.75	24.8	0.01	1.5
SPS-01	24/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	831371	1370237	6.62	116.7	28.6	7.07	10.7	4.75	3.12	60	0.01	8.05
SPS-02	23/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	870497	1370237	6.54	105	29.7	6.73	8.84	4.2	3.97	52.9	0.01	3.53
SPS-02	13/09/2007	Na-Mg-HCO3-SO4	870497	1370237	6.12	14	27.1	2.392	0.99	0.728	0.75	11.1	0.01	4
SPS-02	28/02/2003	Mg-Ca-HCO3	870497	1370237	7.33	91	31.1	4.22	7.94	5.03	2.6	51	0.01	1.5
SPS-02	18/11/2007	Mg-Ca-Na-HCO3	870497	1370237	6.57	29.1	ND	2.812	2.56	2.557	1.5	27.2	0.01	1.5
SPS-03	28/02/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	870299	1371170	6.96	77	32.2	4.81	7.54	3.57	2.6	45.8	0.01	1.5
SPS-03	18/11/2007	Mg-Ca-HCO3	870299	1371170	6.85	29.6	ND	2.121	2.95	1.96	1.5	24.4	0.01	1.5
SPS-03	13/09/2007	Mg-Na-Ca-HCO3	870299	1371170	6.53	13	31.6	2.5	1.98	1.701	0.75	18.9	0.01	1.5
SPS-04	28/02/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	869642	1371256	7.02	78	31.6	4.46	7.24	3.68	2.7	47.3	0.01	1.5





CÓDIGO	Fecha	Facies	X m	Y m	pH	Conductividad mS/cm	Temperatura °C	Na mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	HCO3 mg/l	CO3 mg/l	SO4 mg/l
SPS-04	23/04/2008	Ca-Mg-Na-HCO3	869642	1371256	7.38	106.1	30.8	6.36	8.95	4.22	5.87	54.6	0.01	3.76
SPS-04	13/09/2007	Mg-Ca-Na-HCO3	869642	1371256	6.35	26	31.8	1.912	1.67	1.512	0.75	15.9	0.01	1.5
SPS-05	28/02/2003	Mg-Ca-HCO3	874655	1370724	7.15	98	31	4.79	9.7	6.08	2.4	57	0.01	1.5
SPS-05	13/09/2007	Mg-Ca-HCO3	874655	1370724	7	24	28.1	0.589	2.56	1.894	0.75	22.1	0.01	1.5
SPS-05	23/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	874655	1370724	7.33	141.9	26.2	9.64	13.6	5.77	4.05	64.5	0.01	9.84
SPS-05	18/11/2007	Ca-Mg-Na-HCO3	874655	1370724	6.91	74	ND	2.853	5.11	2.424	0.75	31.5	0.01	1.5
SFS-06	10/11/2007	Mg-Ca-HCO3	073304	1371546	6.40	60	30.0	2.035	2.00	2.157	0.75	20.4	0.01	1.5
SPS-06	28/02/2003	Mg-Ca-HCO3	873384	1371546	7.29	73	30.8	2.76	6.88	4.8	1.1	52.8	0.01	1.5
SPS-06	13/09/2007	Mg-Ca-Na-HCO3	873384	1371546	6.5	29	28.9	2.882	2.6	1.91	0.75	21	0.01	1.5
SPS-07	19/11/2007	Ca-Na-HCO3	862082	1367171	4.9	13.8	27	2.628	3.75	0.642	1.5	22.9	0.01	1.5
SPS-08	18/11/2007	Mg-Ca-Na-HCO3	871011	1371133	6.74	55.7	ND	2.22	1.96	2.102	1.7	25	0.01	1.5
SPS-08	23/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	871011	1371133	5.72	106.9	30	7.66	9.33	4.5	3.43	56.5	0.01	3.03
SPS-08	13/09/2007	Mg-Na-Ca-HCO3	871011	1371133	6.15	27	31.6	2.748	1.94	1.639	0.75	19.4	0.01	1.5
SPS-08	28/02/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	871011	1371133	7.13	89	30.5	5.31	9.02	5.2	2.7	52.8	0.01	1.5
SPS-09	19/11/2007	Ca-Mg-Na-HCO3	871331	1367698	6.93	48	29.6	3.444	5.89	2.626	2.1	34.5	0.01	1.5
SPS-09	24/04/2003	Ca-Mg-Na-HCO3	871331	1367698	6.45	35	28	2.84	2.98	1.75	2.16	21.1	0.01	4.17
SPS-11	19/11/2007	Ca-Mg-Na-HCO3	867717	1366672	6.8	33	28.1	2.737	3.14	1.65	2.2	25.9	0.01	1.5
SPS-12	18/11/2007	Ca-Mg-Na-HCO3	857488	1353863	7.11	41	26.5	2.921	4.73	2.713	0.75	31.6	0.01	1.5
SPS-12	23/04/2003	Ca-Mg-HCO3-SO4	857488	1353863	6.55	31	26	1.74	2.98	1.7	2.1	19	0.01	9.69

ND: No determinado.

Los análisis químicos se realizaron, según el método estándar, en el laboratorio de Calidad Ambiental de CORANTIOQUIA. Los isótopos estables del agua $d^{18}O$ y d^2H fueron analizados por espectrometría de masas con referencia a gases, en el laboratorio LAGEO de El Salvador; los límites de confianza de estos análisis fueron de 0,1‰ para ^{18}O y 1,2‰ para 2H .

Una vez recibidos los resultados de laboratorio para los análisis hidroquímicos, se realizó una descripción estadística preliminar, la evaluación de la calidad de los análisis según las recomendaciones de Appelo y Postma (2006), caracterización de facies hidrogeoquímicas mediante diagramas Piper, aplicación de las relaciones iónicas propuestas por Custodio y Llamas (1996) y por Hounslow (1995) para deducción de roca fuente. Los datos de isótopos se analizaron según la propuesta metodológica planteada por Palacio y Betancur (2007).

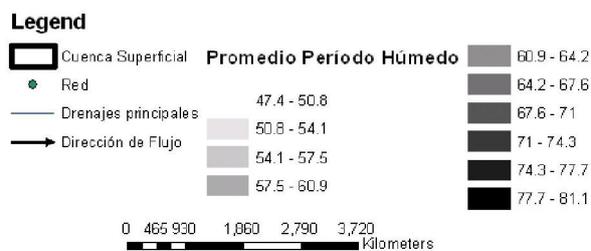
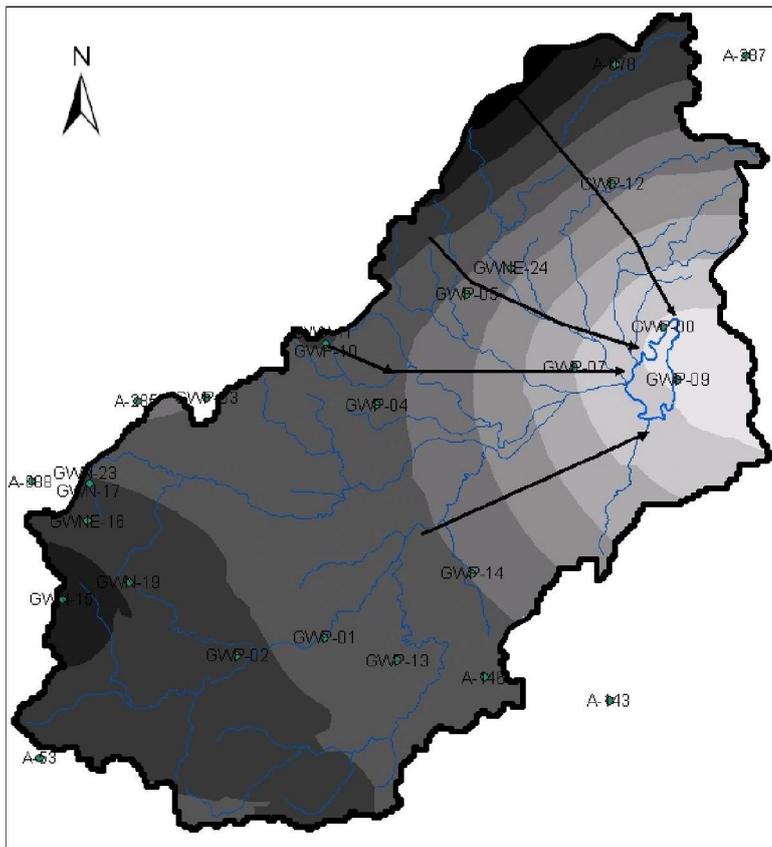
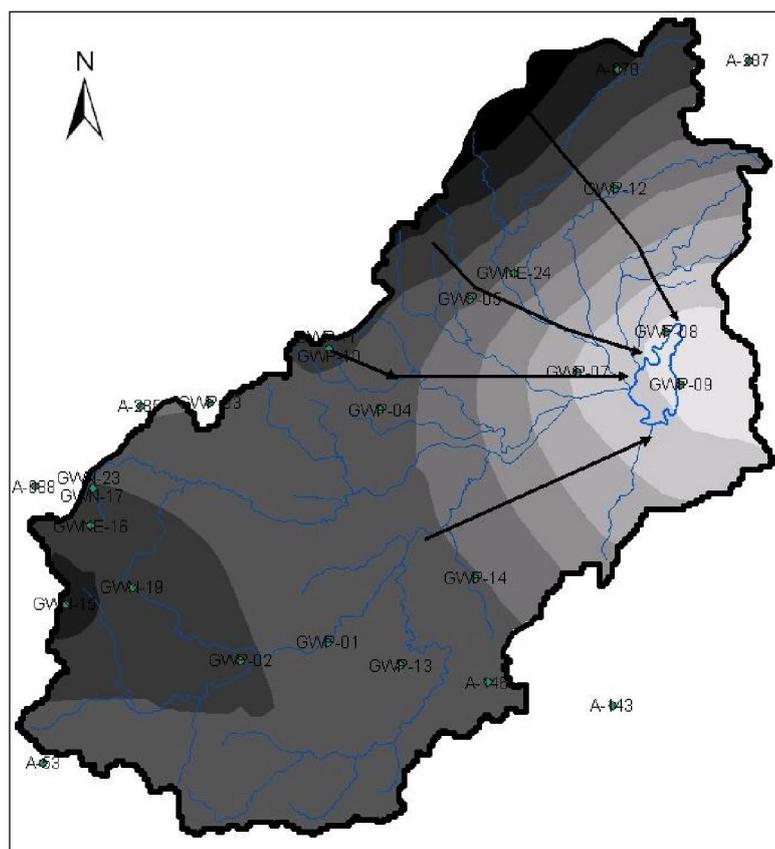


Figura 4. Flujo subterráneo para periodo seco y periodo húmedo

4. RESULTADOS

En el contexto de la utilización de las técnicas hidroquímicas e isotópicas para los estudios hidrológicos, un modelo conceptual del sistema considerado es fundamental. Para el caso particular de Ciénaga Colombia, este modelo es construido a partir de las interpretaciones realizadas en los estudios: «Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical, caso de estudio Bajo Cauca antioqueño» (Betancur 2008) y «Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca antioqueño» (en ejecución). Como se mencionó anteriormente, el sistema Ciénaga Colombia está conformado por el cuerpo



Legend

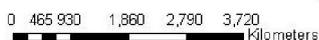
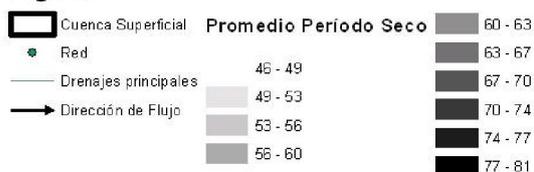
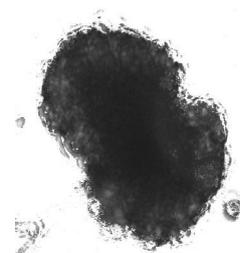


Figura 4. Flujo subterráneo para periodo seco y periodo húmedo

superficial de la ciénaga, las corrientes que la alimentan y el acuífero libre. A partir de la información piezométrica recopilada durante un año, se ha logrado obtener la distribución espacial de 12 superficies piezométricas (una por mes) y se han sintetizado las condiciones de flujo subterráneo para dos escenarios hidrológicos diferentes: período seco y período húmedo (Figura 4). Según las líneas de flujo trazadas a partir de estas dos superficies piezométricas, se logra apreciar desde el centro y hacia el norte de la cuenca, un patrón de flujo que no difiere drásticamente entre los dos períodos. En él, se observa cómo el agua fluye desde la divisoria superficial hacia el cuerpo de la ciénaga. En la parte suroeste, se resalta una divisoria de aguas subterráneas, más marcada en el período seco.

Estas imágenes del sistema hidrológico son fundamentales para la interpretación de las condiciones hidroquímicas e isotópicas. El plan de muestreo programado contemplaba la realización de análisis y mediciones cubriendo como mínimo los dos escenarios hidrológicos característicos de la región; sin embargo dadas las condiciones de variabilidad climática que han afectado a todo el país el último año, en el que se registran condiciones anómalas sin la presencia clara de un período característicamente seco, los cuatro muestreos realizados han coincidido en términos generales con épocas lluviosas.



4.1. Primer acercamiento a las condiciones hidroquímicas

Los diagramas piper de la figura 5 muestran la distribución de facies para aguas superficiales y aguas subterráneas en los meses de septiembre y noviembre de 2007 y febrero y abril de 2008. Se observan facies de tipo: bicarbonatadas sódicas, bicarbonatadas cálcicas, cloruradas sódicas y bicarbonatadas mixtas.

Las facies cloruradas que se observan en los monitoreos de abril y noviembre para los puntos GWN-15 y GWN-18, no pueden asociarse con procesos de evaporación con la información disponible a la fecha; esta composición podría deberse a fuentes puntuales de contaminación.

La composición bicarbonatada sódica de las muestra GWP-04, Piezómetro Jalisco, y GWP-08, piezómetro Norte Ciénaga, puntos conectados posiblemente por una línea de flujo subterránea, permanece constante durante todo el período de muestreo. Esta condición podría deberse a la interacción del agua con rocas de la unidad hidrogeológica U_4 , tal como se reportó en estudios anteriores (Betancur, 2008) o a una situación de flujo lento.

El cambio en las facies de la muestra GWN-15, Mirador Las Brisas al oeste de la zona de estudio, de bicarbonatada cálcica a magnésica entre los muestreos de septiembre y abril, sugiere cierta evolución del agua que podría haber ocurrido entre un período de recarga y otro en el que se produjo un descenso en el nivel piezométrico por disminución en los aportes desde la superficie.

El carácter bicarbonatado cálcico a mixto, generalizado en las muestras provenientes tanto de la superficie como del acuífero es concordante con el orden de evolución propuesto por Chevotareb y corresponde a aguas provenientes de la precipitación y de poco tiempo de residencia.

En la figura 6 se observa la distribución espacial de facies empleando diagramas Stiff, para los monitoreos de septiembre y abril.

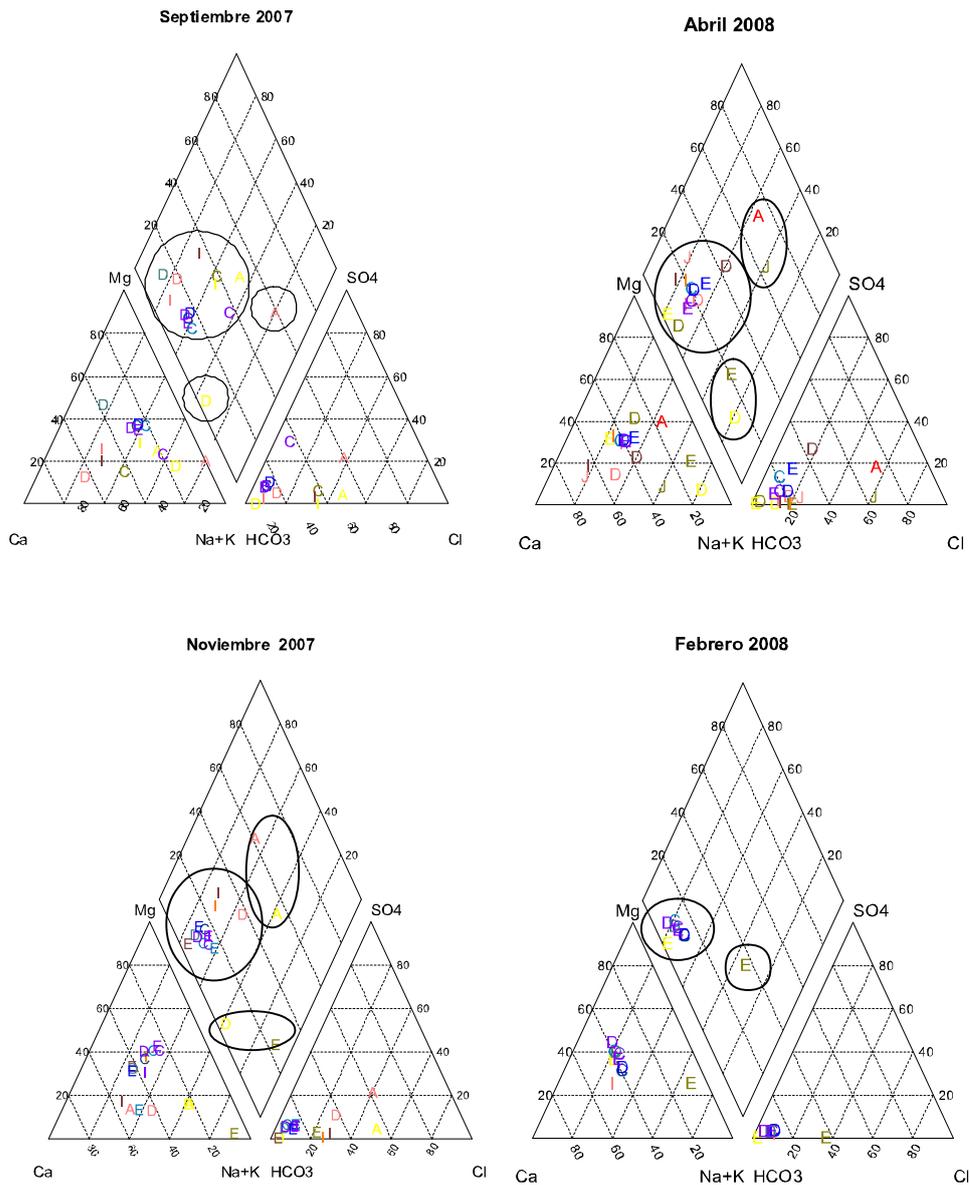


Figura 5. Diagramas Piper

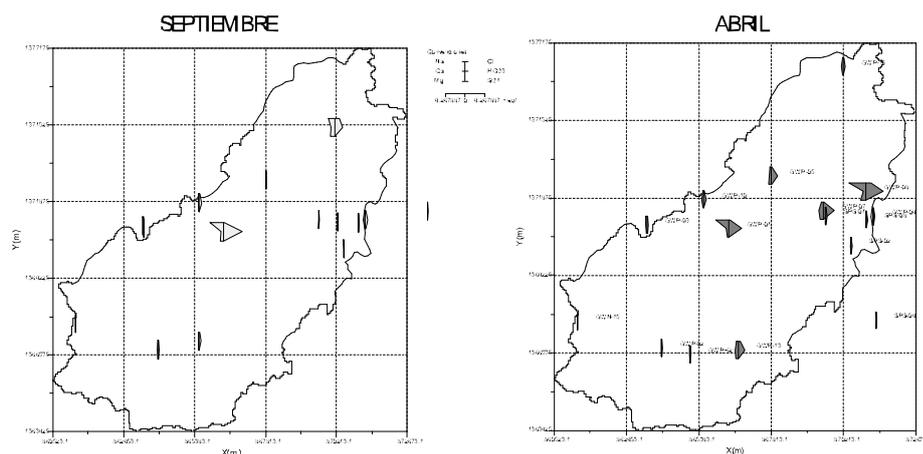


Figura 6. Mapas con diagramas Stiff

4.2. Primer acercamiento a las condiciones isotópicas

A partir de la información isotópica disponible para agua lluvia, superficial y subterránea (Figura 7) es posible exponer algunas consideraciones generales.

La tendencia meteórica local, tras casi tres años de toma de muestras en la estación SPR-07, sigue siendo coincidente con la Línea Meteórica Global según se aprecia en la expresión 2. Los datos obtenidos desde fuentes superficiales en marzo de 2007 y febrero y abril de 2008, época en la que localmente se registran mayores temperaturas asociadas al verano de la región, permiten trazar la línea local de evaporación según la expresión 3.

$$\delta^2\text{H} = 8,02 \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (2)$$

$$\delta^2\text{H} = 5,90 \delta^{18}\text{O} - 7.3 \quad (3)$$

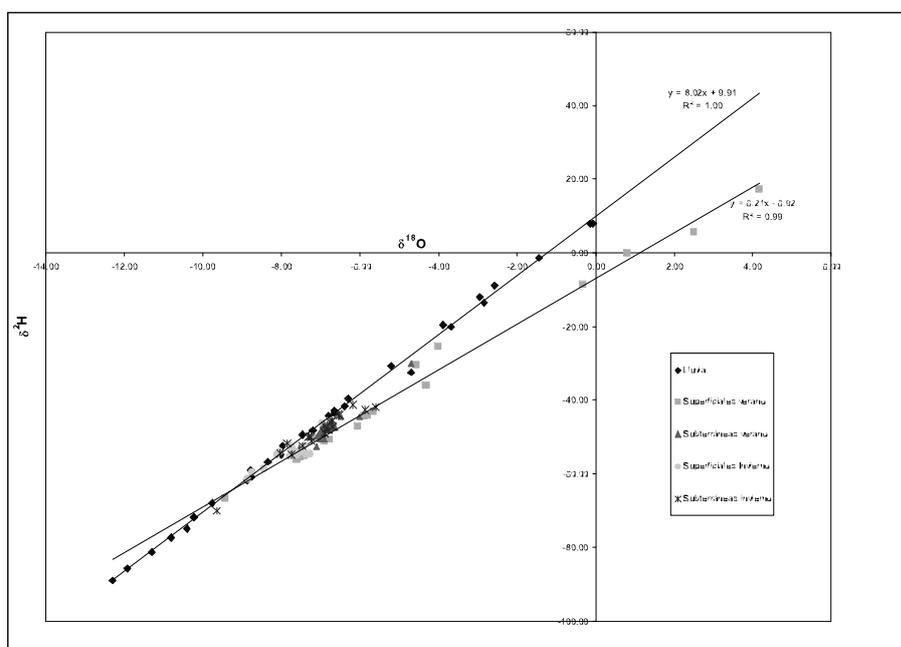


Figura 7. Relaciones isotópicas preliminares para las aguas lluvia, superficial y subterránea en el humedal Ciénaga Colombia.



La cercanía de los puntos de agua subterránea a la LML evidencia una recarga dispersa por infiltración de agua lluvia, en algunos casos con una leve evaporación. Para la temporada invernal, las aguas superficiales se asemejan a la lluvia que se registró en promedio entre los meses de agosto y noviembre y al agua subterránea, puede entonces inferirse que los cauces transportan agua proveniente de la mezcla de escorrentía directa y flujo base.

5. DISCUSIÓN FINAL

Con la utilización de técnicas hidroquímicas e isotópicas, es posible mejorar el conocimiento de un modelo hidrológico conceptual y entender la dinámica y las interacciones entre los compartimientos superficial y subterráneo asociados a la zona de captura de un humedal.

Las diferencias en la composición química de las muestras disponibles evidencian que, efectivamente en el sistema hidrológico de Ciénaga Colombia, existen diferentes facies hidrogeoquímicas asociadas a aguas de distinta procedencia o con distinta evolución; el acuífero libre no es un sistema homogéneo y aportaría al humedal aguas bicarbonatadas cálcicas, bicarbonatadas sódicas y puntualmente cloruradas; la mezcla de estas composiciones con las de las aguas superficiales ocasiona la presencia en el humedal de aguas de facies mixta. De otro modo, la información isotópica confirma la presencia de agua en el medio superficial producto de la mezcla de la escorrentía directa y el flujo base.

Como objetivo de futuros estudios, puede pensarse la realización de balances hidroquímicos con compuestos e isótopos estables para cuantificar los aportes de las diferentes fuentes que sostienen el humedal Ciénaga Colombia.

También está al orden del día el continuar con la toma periódica de muestras a partir de la red de monitoreo existente en procura de obtener resultados que permitan describir la dinámica del sistema en épocas secas y la evolución del agua a través de su flujo en el tiempo, evaluando los efectos de las diferencias en velocidad entre el acuífero y las corrientes superficiales.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a:

La Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, CORANTIOQUIA, por su disposición para analizar las muestras en el Laboratorio de Calidad Ambiental.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, por el apoyo para emprender nuevos caminos en la investigación en Colombia.

A la comunidad de la zona por su inmensa colaboración con la recolección de los datos en campo.

BIBLIOGRAFIA

- Aggarwal, P. K., Floerlich, K., et al, 2005. *Isotope Hydrology: A historical perspective from the IAEA. Isotopes in the water cycle, past, present and future of a developing science.* IAEA, Vienna, pp. 3- 8 .
- Appelo, C., Postman, D., 2005. *Geochemistry groundwater and pollution.* A.A. Balkema. Rotterdam Brookfield.
- Betancur, T., 2008. *Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: Bajo Cauca antioqueño. Tesis doctoral.* Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. 227 P.
- Betancur, T. 2005. Estado actual y perspectiva de la investigación hidrogeológica en el Bajo Cauca antioqueño, *Boletín de Ciencias de la Tierra* 17, pp. 97- 108.
- Betancur, T., Palacio, P., Palacio, C., *Hydrochemistry, isotopic hydrology and the hydrological conceptual model in the Bajo Cauca (Colombia).* En prensa.

- Clark, I., Fritz, P., 1999. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, New York.
- Custodio, E., 2002. Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones (Traducción al español). Wook Editores, Madrid.
- Custodio, E., Llamas, M., 1996. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. Barcelona.
- Custodio, E., 1999. Aspectos hidrológicos de los humedales que dependen del agua subterránea. 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana, pp. 20-26.
- Glynn, P., Plumer, L., 2005. Geochemistry and the understanding of groundwater systems. Hydrogeology journal 13, pp. 263- 287
- Honslow, A., 1995. Water Quality Data, Analysis and Interpretation. Lewis Publishers. New York.
- Palacio, P., Betancur, T., 2007. Identificación de fuentes y zonas de recarga a un sistema acuífero a partir de isótopos estables del agua. Gestión y Ambiente 10, pp. 167- 181.
- Universidad de Antioquia y OIEA, 2007. Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca antioqueño. Segundo informe de avances. Medellín. 17 P.
- Universidad de Antioquia y Corantioquia, 2006. Validación del modelo hidrogeológico de la territorial Panzenú usando técnicas isotópicas. Informe final del convenio interinstitucional 5878. Medellín.



