

Estudio hidrogeoquímico e isotópico en los acuíferos de la zona de Maicao, Colombia

HYDROGEOCHEMICAL AND ISOTOPIC STUDY OF THE MAICAO RESERVOIR, COLOMBIA

JEAN DENIS **Taupin**¹

LUIS EDUARDO **Toro**²

MARÍA CONSUELO **Vargas**³

RESUMEN

En los acuíferos de la zona de Maicao (Colombia) se realizó un estudio combinado de hidrogeología e hidrogeoquímica (química e isotopía deuterio, oxígeno-18, tritio, carbono-13 y carbono-14). En el área de estudio afloran tres acuíferos: acuífero Cretácico (calizas) al sur de la Falla de Oca, Acuífero Terciario (sedimentos semi-consolidados de ambiente marino) y Acuífero Cuaternario (sedimentos no consolidados de origen continental y de transición), ubicados al norte de la misma falla (altura entre 40 y 600 msnm). El acuífero Cuaternario, de tipo libre, suprayace al acuífero Terciario, que tiene un comportamiento confinado. El flujo regional en el acuífero cuaternario va de sur a norte. El área de estudio tiene una extensión de 650 kilómetros cuadrados, condiciones climáticas semiáridas, temperatura media de 27 °C y precipitación media anual de 350 mm al norte, y 1200 mm al sur (de septiembre a noviembre). En el área de estudio se diferencian química e isotópicamente dos tipos de agua subterránea: el primero es de baja mineralización y edad reciente (menos de 50 años); corresponde al Acuífero Cretácico y a una franja del Acuífero Cuaternario adyacente al río Carraipía, principal cuerpo de agua superficial del área de estudio. El segundo tipo es de moderada mineralización, de edad antigua (más de 7900 años), isotópicamente empobrecido (endeuterio y oxígeno-18) con respecto al primer grupo; es representativo del acuífero Terciario y del sector central y norte del acuífero Cuaternario. Los resultados muestran que la recarga del acuífero Cuaternario, el más utilizado por la población de Maicao, es baja y, por tanto, susceptible de agotamiento si no se toman medidas oportunas para el uso racional de este recurso.

Palabras clave

Colombia, semiárida, acuífero, hidrogeoquímica, datación.

ABSTRACT

A combined hydrogeological study using hydrochemistry and environmental isotopes (deuterium, oxygen 18, tritium, carbon 13, and radiocarbon) has been completed in the region of Maicao (Colombia). The study area encompasses 650 km² and includes three aquifers: the Cretaceous Aquifer (limestones), south of the Oca fault, the Tertiary Aquifer (semi-consolidated marine sediments) and the Quaternary Aquifer (unconsolidated sediments of continental and marine origins). Both the Quaternary and Tertiary aquifers are located just to the north of the same fault (elevation between 40 and 600 m above sea level). The Quaternary Aquifer is an unconfined aquifer underlain by the Mongui Formation (a confined Tertiary Aquifer). Its regional groundwater flow is northward. The climatic conditions are semiarid, with an average temperature of 27 °C, annual average precipitation of 350 mm in the north and 1200 mm in the south (September to November). Two types of groundwater have been found in Maicao: the first, low salinity and young (less than 50 years), is located in the Cretaceous Aquifer and in the sector of the Quaternary Aquifer adjacent to the Carraipia River (main superficial water body in the project area), the second, moderately mineralized, isotopically depleted with respect to the first group and older (more than 7900 years), is located in the Tertiary Aquifer and in the central and northern sectors of the Quaternary Aquifer. Results of this study show that the recharge of the Quaternary Aquifer which is the aquifer most extensively used by the inhabitants of Maicao is slow and is, therefore, susceptible to depletion if no measures are taken to insure rational use.

Key words

Colombia, semiarid, groundwater, hydrogeochemical, dating.

Artículo recibido el 19 de diciembre de 2008. Aprobado el 30 de diciembre de 2008.

IRD, 300 av. Jeanbrau, Montpellier (Francia), taupin@msem.univ-montp2.fr

CORPOGUAJIRA, Rihacha (Colombia), ledtoro@yahoo.com

INGEOMINAS, Bogotá (Colombia), vargasquin@yahoo.es

Introducción

La Corporación Autónoma Regional de La Guajira (Corpoguajira) realizó un estudio combinado de Hidrogeología tradicional, hidrogeoquímica e hidrología isotópica (isótopos ambientales deuterio, oxígeno-18, tritio, carbono-13 y carbono-14) en el municipio de Maicao, departamento de La Guajira, Colombia, con la asistencia de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y la coordinación nacional del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). Este estudio fue parte del proyecto regional RLA/08/031 titulado Proyecto de Manejo Integrado y Sostenible de Recursos Hídricos Subterráneos en América Latina, el cual se desarrolló en siete países de Latinoamérica.

El municipio de Maicao ocupa parte de la denominada Media Guajira. Su población estimada es 3000 habitantes, 80% de la cual está asentada en el área urbana (Consultores del Caribe, 2002, p. 63). Esta región se caracteriza por su alto índice de aridez. Rasgos comunes son la escasez de cuerpos superficiales de agua y la dificultad continua en el servicio de agua potable (Jousma & Serrano, 1980, p. 41; Mesa et ál., 1997 & Poveda, 2004). La red de acueducto no satisface totalmente las necesidades de agua de la población, de ahí la proliferación de pozos privados en la zona urbana, la mayoría de ellos perforados sin seguir un estricto control técnico.

Corpoguajira ha llevado a cabo la formulación e implementación del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas del municipio de Maicao con el fin de encontrar fuentes alternas de agua potable y mitigar los impactos sobre el recurso hídrico subterráneo, ocasionados por su explotación inapropiada. Este artículo muestra los avances en el conocimiento, la dinámica y la naturaleza de los diferentes acuíferos presentes en el municipio de Maicao, obtenidos durante el proyecto RLA/08/031, que aportan las bases técnicas adecuadas para que la Corporación implemente el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas e inicie la modelación numérica de los acuíferos de Maicao.

El área de estudio tiene una extensión de 650 kilómetros cuadrados, ubicados entre los meridia-

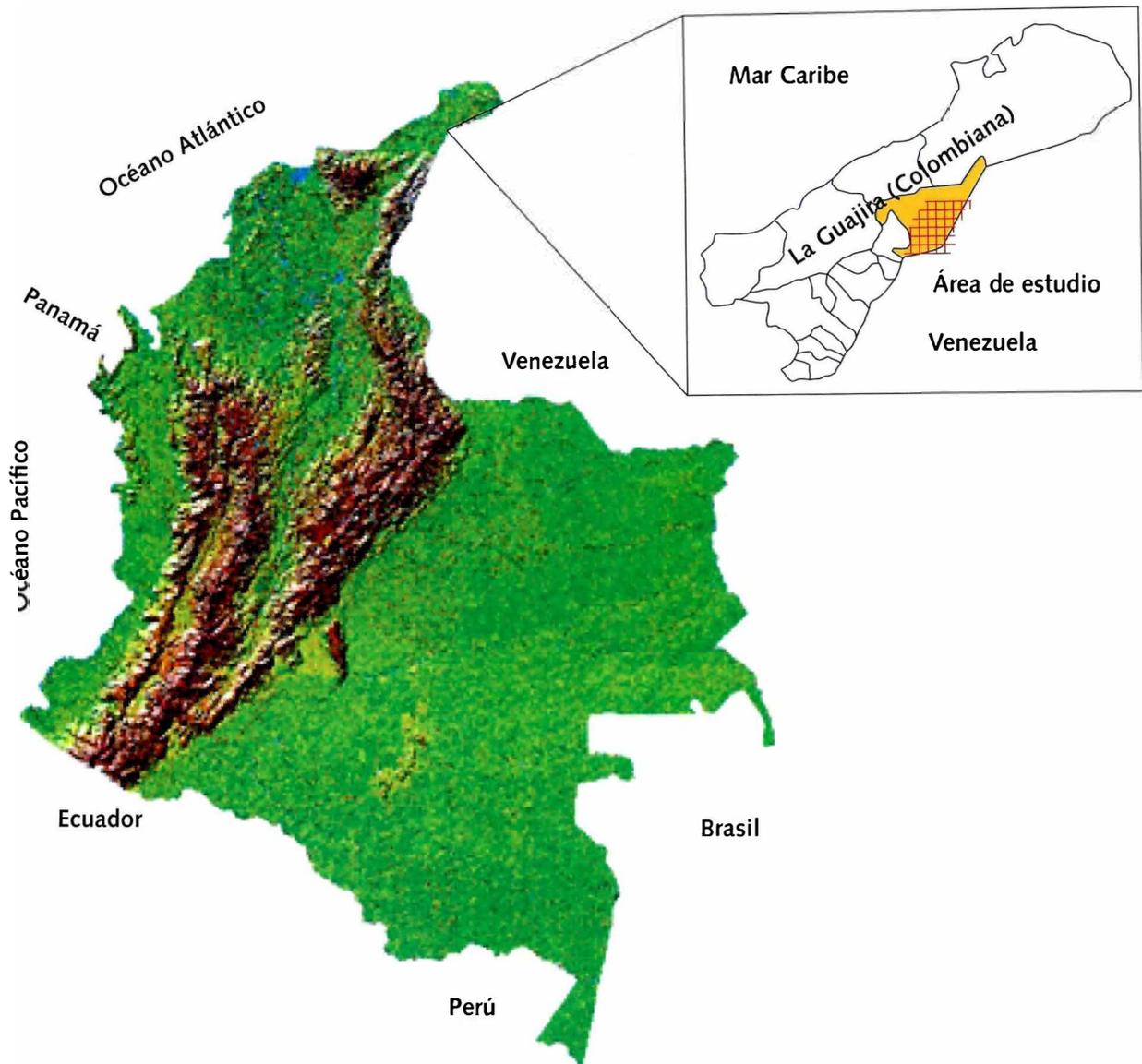
nos 72°05' W y 72°25' W, y los paralelos 11°09' N y 11°25' N (figura 1). Su superficie es predominantemente plana (cotas entre 20 y 120 msnm) y está conformada sobre todo por depósitos de origen aluvial (llanuras, cauces, terrazas aluviales), sedimentos de litoral y, en menor proporción, por depósitos de dunas de edad cuaternaria (Bürgl, 1960, 1961). Hacia el sur aparecen pequeñas colinas redondeadas, compuestas por rocas terciarias de origen marino. El municipio de Maicao limita al sur con la serranía de Perijá, la cual presenta una disposición este-oeste y cotas que superan los 600 msnm. Justo al norte de la serranía de Perijá, un sistema de falla (Falla de Oca) de dirección regional E-O corta la zona de estudio (Bürgl, 1967). En el área de estudio, la serranía de Perijá está constituida por rocas calcáreas de edad Cretácica (figura 2). La principal fuente de la escorrentía superficial es el río Carraipía que tiene un régimen intermitente, con un periodo de estiaje entre los meses de febrero y agosto.

El clima es semiárido y los vientos predominantes vienen del nororiente, procedentes del golfo de Venezuela. El régimen de precipitación es bimodal, con periodos de lluvia comprendidos entre abril y junio, y de agosto a diciembre. La temperatura media es 27 °C. La humedad relativa media es 76%, y la evapotranspiración estimada varía de 1600 mm/año en el pie de monte de la serranía de Perijá a 1800 mm/año en inmediaciones de la localidad de Paraguachón.

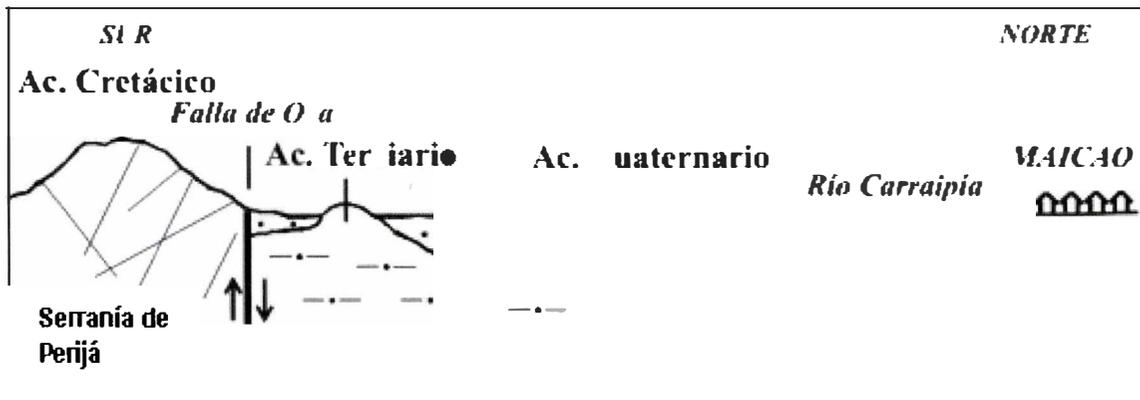
Hidrogeología

En el área de estudio afloran tres unidades hidrogeológicas: Grupo Calcáreo, Formación Monguí y Sedimentos Cuaternarios (figura 2).

Grupo Calcáreo (Ksc) de edad cretácica, conformado por calizas masivas, muy fracturadas, que constituyen la serranía de Perijá (Wokittel, 1957; Radelli, 1962, Ujueta & Llinas, 1990). La transmisividad del acuífero varía entre 292 y 1172 $m^2 \cdot d^{-1}$, y el coeficiente de almacenamiento es del orden de 5×10^{-3} (INGEOMINAS, 1999, p. 21). El agua presenta una conductividad inferior a 700 $\mu S \cdot cm^{-1}$.



► Figura 1. Ubicación geográfica y corte esquemático del área de estudio (Maicao, Colombia)



► Figura 2. Corte esquemático del área de estudio (Maicao, Colombia).

Formación Monguí (Tpm) de edad Terciaria, conformada por sedimentos de origen marino (Thomas & Mac Donald, 1976, pp. 207-216). En el área de estudio aflora como pequeñas colinas justo al norte de la Falla de Oca. En el sector oriental, la secuencia de capas es predominantemente arcillosa, mientras que en el extremo occidental aparecen niveles arenosos y conglomeráticos intercalados con arcillas (Álvarez, 1994, p. 18 & Toro, 2003, 2004). En su zona de recarga (al suroeste de la zona de estudio), el agua subterránea presenta conductivida-

des eléctricas menores a $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y el acuífero es de tipo libre, con trasmisividades del orden de $53 \text{ m}^2\cdot\text{d}^{-1}$. Al norte del área de estudio (zona urbana), el acuífero es de tipo confinado y las conductividades eléctricas del agua se sitúan por encima de $3000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. El flujo regional para esta unidad hidrogeológica va de sur a norte.

Sedimentos recientes no consolidados (Q), conformados por depósitos de llanura aluvial, de cauce aluvial y dunas, reposan en forma concordante sobre la Formación Monguí (Bürgl, 1960 & Hu-

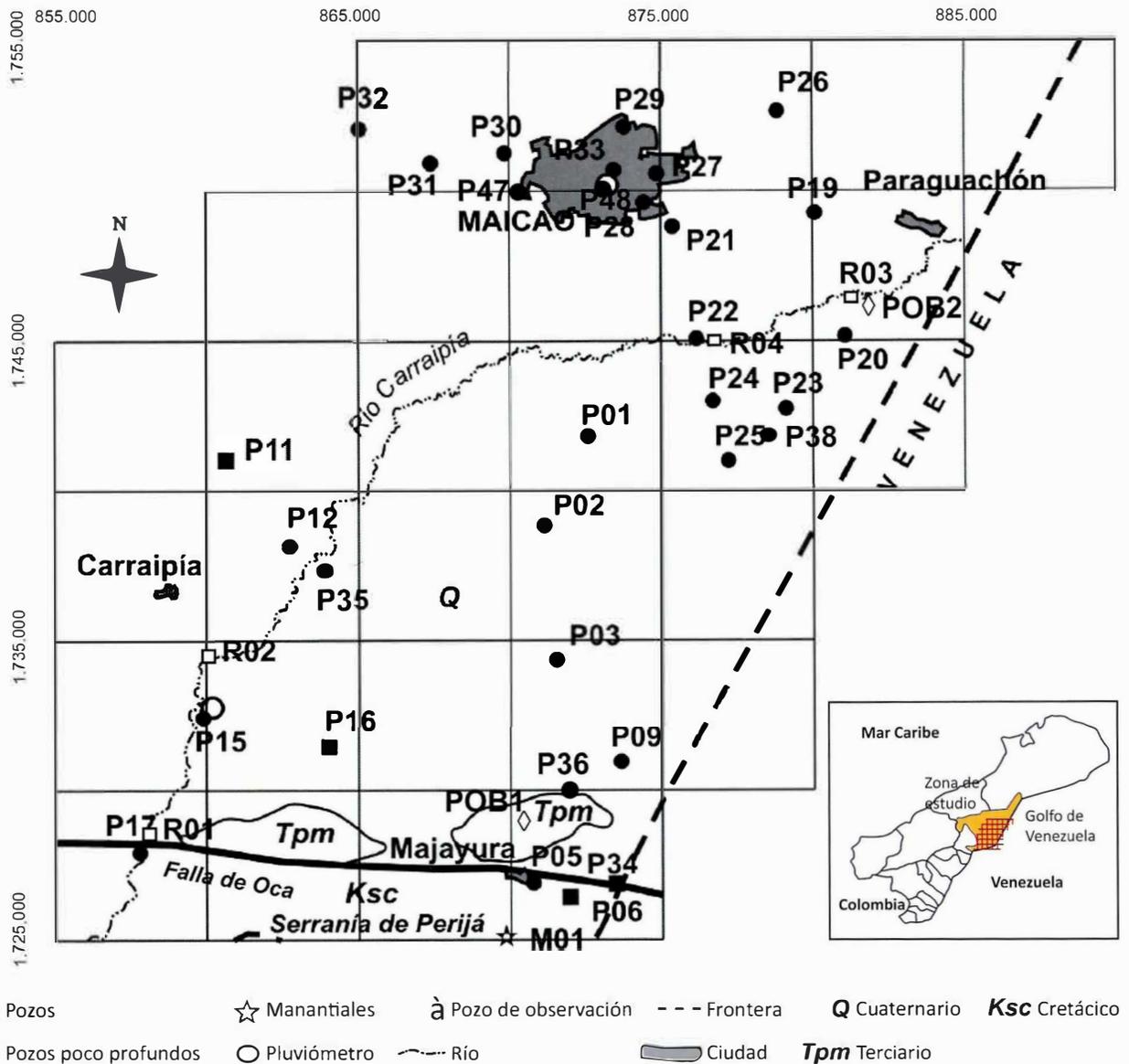


Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo (Maicao, Colombia).

guett Granados, 1988). El tamaño de los granos va de arcillas a gravas, pero generalmente predominan los sedimentos finos. El espesor promedio de estos sedimentos en el área de estudio está estimado en 60 metros. Constituye el acuífero más explotado, pues el 90% de las 300 captaciones existentes en el municipio están sobre esta unidad hidrogeológica. Su condición hidráulica en términos generales es libre a semiconfinado, y las transmisividades se ubican en el rango de 1 a 500 $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$. El flujo regional para esta unidad hidrogeológica va de suroccidente a nororiente (Huguett Granados, 1988).

Metodología

Se diseñó una red de muestreo conformada en su totalidad por treinta y cinco puntos de agua subterránea correspondientes a las tres unidades hidrogeológicas así: tres pozos, un aljibe (pozo de gran diámetro y poca profundidad excavado a mano) y un manantial de la unidad hidrogeológica del Cretácico, tres pozos de la unidad Terciaria y veintidós pozos y tres aljibes de la unidad Cuaternaria. En el 2004 fueron perforados dos pozos de observación, POB1 (zona sur, afloramiento unidad Terciaria) y POB2 (este de Maicao en la unidad Cuaternaria). Entre 2002 y 2004 se tomaron muestras de agua de treinta y un pozos, de un manantial, del agua del acueducto y del río Carraipía para análisis físico-químico (figura 3). Las determinaciones físico-químicas fueron: pH, conductividad eléctrica y temperatura (medidos en el campo) y los iones mayoritarios (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), nitritos, hierro total y fosfatos (analizados en el laboratorio). La alcalinidad fue medida dentro de las dos horas siguientes al muestreo. Las muestras fueron refrigeradas con el fin de evitar pérdidas de CO_2 .

A las muestras de treinta y tres puntos de agua subterránea se hizo análisis de deuterio y oxígeno-18. Dichos análisis también fueron practicados en muestras compuestas (mensuales) de agua de lluvia, recolectadas en dos pluviómetros localizados en Maicao (tanque de acueducto) y Carraipía (colegio agrícola). Estas muestras representan la com-

posición isotópica teórica de la recarga entre octubre de 2002 y septiembre de 2004. A las muestras de dieciséis puntos de muestreo (tres del acuífero Cretácico, tres del Terciario y diez del Cuaternario) se les analizó tritio o carbono-13 y carbono-14. Las determinaciones de radiocarbono se hicieron por el método tradicional de centelleo líquido. Todas las determinaciones isotópicas fueron auspiciadas por la Agencia Internacional de Energía Atómica.

Resultados y discusiones

La distribución de la conductividad en el acuífero Cuaternario (figura 4) muestra los valores más débiles ($< 1000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) cerca de la Falla de Oca y alrededor del río Carraipía. Los valores más elevados están ubicados al noreste de la zona de estudio, lo que corresponde a la dirección del flujo del acuífero hacia el mar (figura 4).

Como se observa en el diagrama Piper y en la relación conductividad eléctrica vs O-18 (figuras 5 y 6), en la zona de estudio predominan dos tipos de agua: el primero (tipo A) corresponde a aguas bicarbonatadas cálcicas de baja mineralización (conductividades eléctricas menores a $800 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$), con un componente importante de aguas recientes (presencia de tritio y actividad de radiocarbono cercano o superior a 100% de actividad de carbono moderno –pmc). Este tipo de agua se halla en el acuífero Cretácico y en los pozos del acuífero Cuaternario, situados en zonas adyacentes al río Carraipía. Las muestras tomadas en el río tienen similares características químicas. El segundo tipo de agua (B) es clorurada sódica, de moderada mineralización con conductividad eléctrica mayor a $1000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (figuras 5 y 6) y de edad antigua (ausencia de tritio y actividad de radiocarbono menor a 35 pmc). Esta agua se encuentra en la Formación Monguí en la zona norte del área de estudio, y en los pozos del acuífero Cuaternario situados en zonas alejadas al río Carraipía, especialmente en el sector nororiente del área de estudio.

Con base en los valores obtenidos para el carbono-13 (entre -12 y -18% PDB), se observa que la disolución de carbono “muerto” no ha sido signifi-

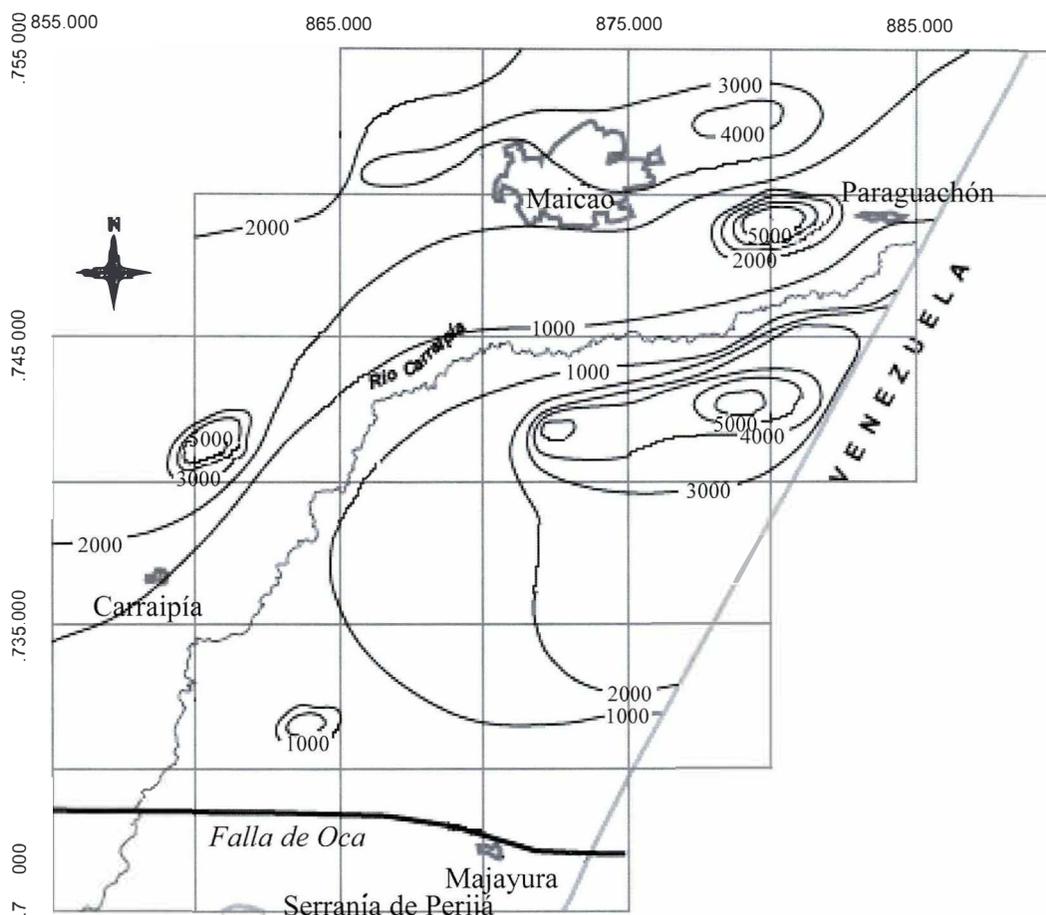


Figura 4. Conductividad en el acuífero Cuaternario (Maicao, Colombia).

cativa en las muestras datadas y, por tanto, se estima que las actividades inferiores a 35 pmc corresponden a aguas de más de 7900 años de antigüedad. Estas aguas están isotópicamente empobrecidas en deuterio y oxígeno-18 (figuras 6 y 7) con respecto al agua reciente. Para las aguas antiguas, las concentraciones están en el rango $-4,3\text{‰}$ a $-4,8\text{‰}$ para el oxígeno-18, y $-25,0\text{‰}$ a $-29,8\text{‰}$ para el deuterio, y el exceso de deuterio se encuentra entre $6,8\text{‰}$ y $11,3\text{‰}$, siendo su valor promedio $9,2\text{‰}$, con una desviación estándar de $\pm 1,1\text{‰}$. Para las aguas recientes, las concentraciones están entre $-4,2\text{‰}$ y $-3,5\text{‰}$ para el oxígeno-18, y entre $-22,2\text{‰}$ y $-18,7\text{‰}$ para el deuterio. El exceso de deuterio fluctúa entre $9,2\text{‰}$ y $12,3\text{‰}$; su valor promedio es $10,3\text{‰}$, con una desviación estándar de $\pm 1,1\text{‰}$. La marca isotópica de las muestras de agua del grupo

A y B es similar al del agua de lluvia, lo cual indica que aparentemente existen pocos cambios desde el punto de vista climatológico con respecto a las diferentes edades de infiltración.

La muestra del pozo P16 tiene un valor de conductividad más elevado ($2800 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) en comparación con los valores de otros pozos ($1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) de la zona centro-oeste; igualmente, los valores de isótopos estables marcan evaporación relacionada con su poca profundidad (8 m).

Cabe destacar los bajos valores de nitratos y nitritos encontrados en las muestras de los pozos ubicados en el casco urbano de Maicao ($\text{NO}_3^- < 1,7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ como NO_3^- , $\text{NO}_2^- < 0,02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ como NO_2^-). El nivel freático de dicha zona se ubica en los 35 metros de profundidad. Si se tiene en cuenta que las especies nitrogenadas en el agua subterrá-

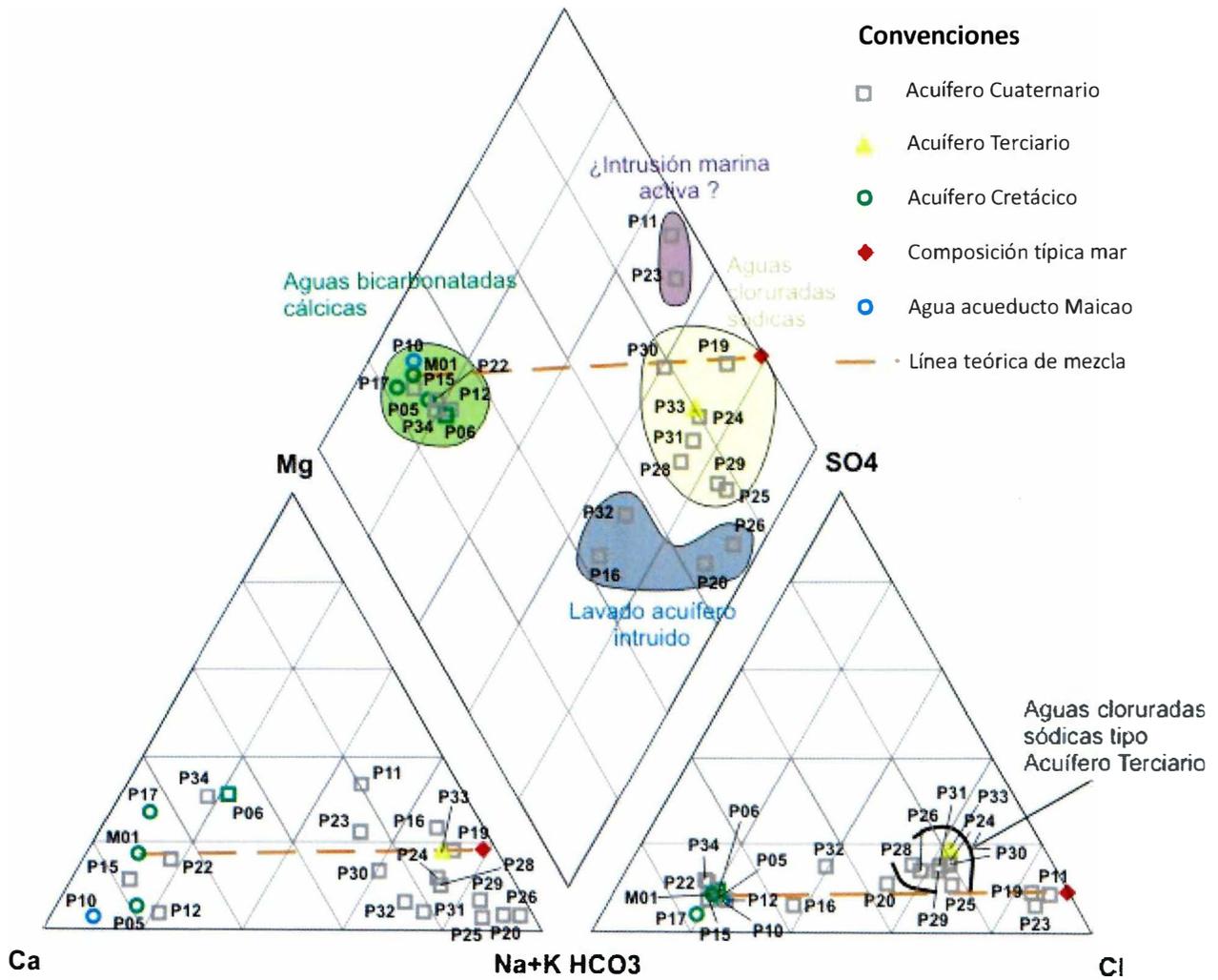


Figura 5. Caracterización química: acuíferos Cretácico, Terciario y Cuaternario (Maicao, Colombia).

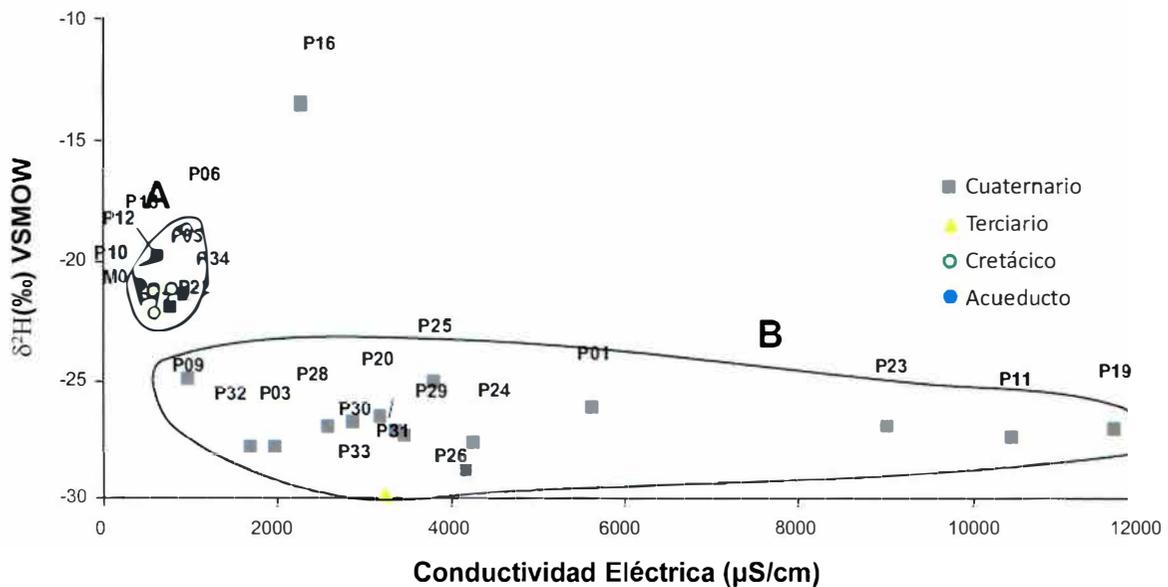


Figura 6. Conductividad vs. oxígeno-18 del agua subterránea en la zona de Maicao.

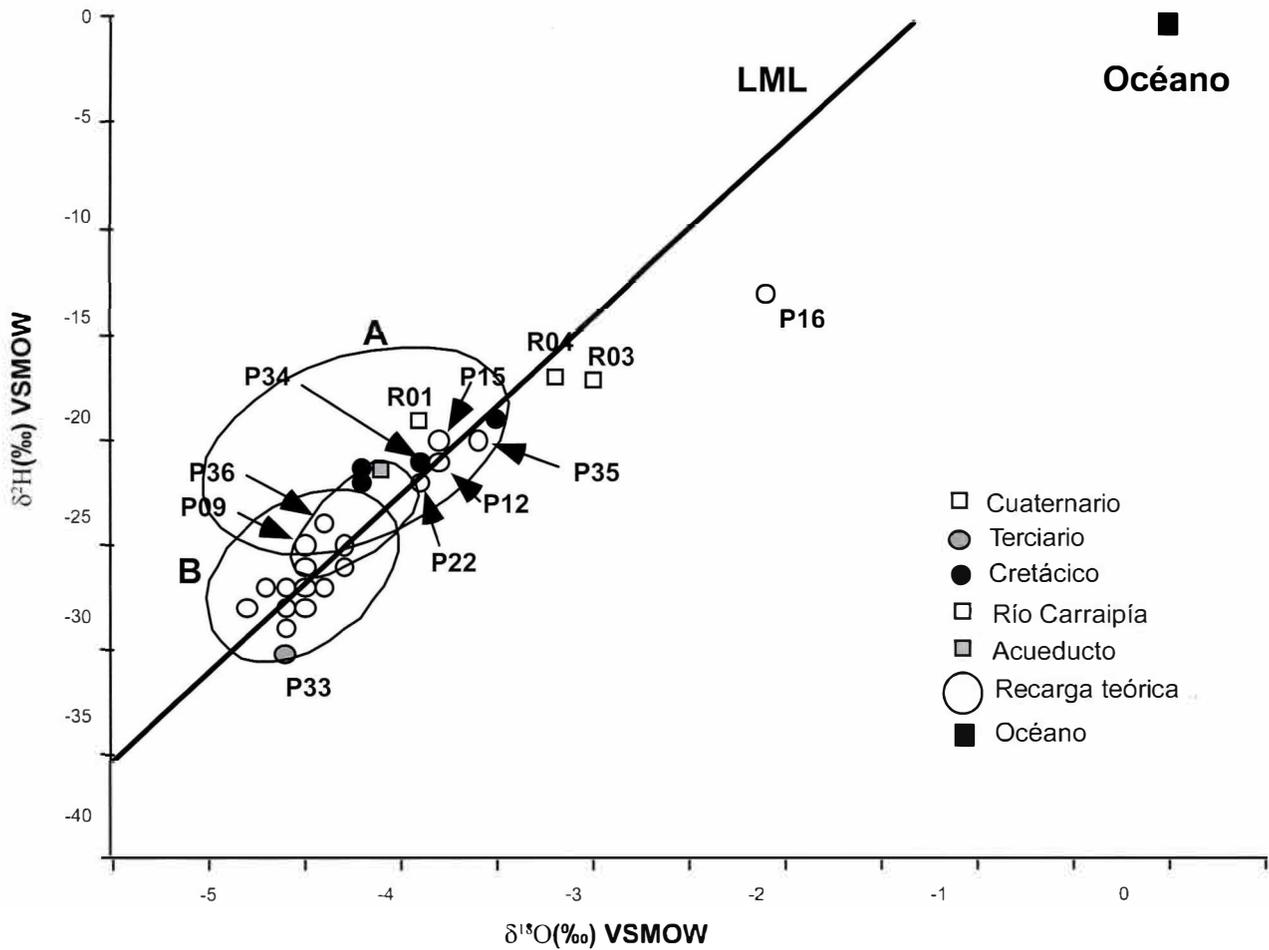


Figura 7. Resultados de los análisis isotópicos estables, Maicao (Colombia).

nea pueden servir como indicador de contaminación por aguas residuales domésticas, y que hasta 2003 el casco urbano de Maicao prácticamente carecía de cualquier red de alcantarillado, entonces se puede deducir que la conductividad hidráulica vertical de los sedimentos cuaternarios de la zona no saturada es muy baja.

La edad antigua del agua encontrada en pozos del acuífero Cuaternario, ubicados a solo tres kilómetros al norte de la Falla de Oca, sugiere la ausencia de un proceso de recarga del acuífero Cuaternario por medio de dicha falla. El predominio de arcillas plásticas en la Formación Monguí (litología del pozo de observación POB1), entre la Falla de Oca y el acuífero Cuaternario, en especial al sudeste del área de estudio, indica que esta for-

mación actúa como una barrera de flujo entre estos dos elementos.

Parece que la infiltración directa de agua de lluvia no representa un papel preponderante en la recarga del acuífero Cuaternario, ya sea debido a la escasez de lluvias, sobre todo al norte del área de estudio, o por el predominio de los granos finos en esta secuencia sedimentaria (litología de POB2). Los bajos valores de nitratos y nitritos a la altura del casco urbano de Maicao dan indicio de ello. Por consiguiente, el lecho del río Carraipía parece ser el único mecanismo importante de recarga para el acuífero Cuaternario. La información obtenida hasta ahora indica que la recarga de esta unidad hidrogeológica, la más utilizada por la población de Maicao, es baja y por tanto susceptible de un agota-

miento de aguas subterráneas si no se toman medidas que lleven al uso racional de este recurso.

El interés del acuífero Terciario para abastecimiento de agua de la comunidad de Maicao por ahora solo se centra en el sector suroeste del área de estudio, donde la Formación Monguí aflora, exhibiendo niveles de granulometría gruesa. Los afloramientos del sur-centro y sudeste del área de estudio son muy arcillosos y lo más probable es que allí la Formación Monguí se comporte como un acuitarado. La antigüedad (más de 7900 años) del agua de esta unidad hidrogeológica, a la altura del casco urbano de Maicao (veinte kilómetros al norte de los afloramientos de la Formación Monguí), indica un desplazamiento promedio del agua del orden de dos metros por año.

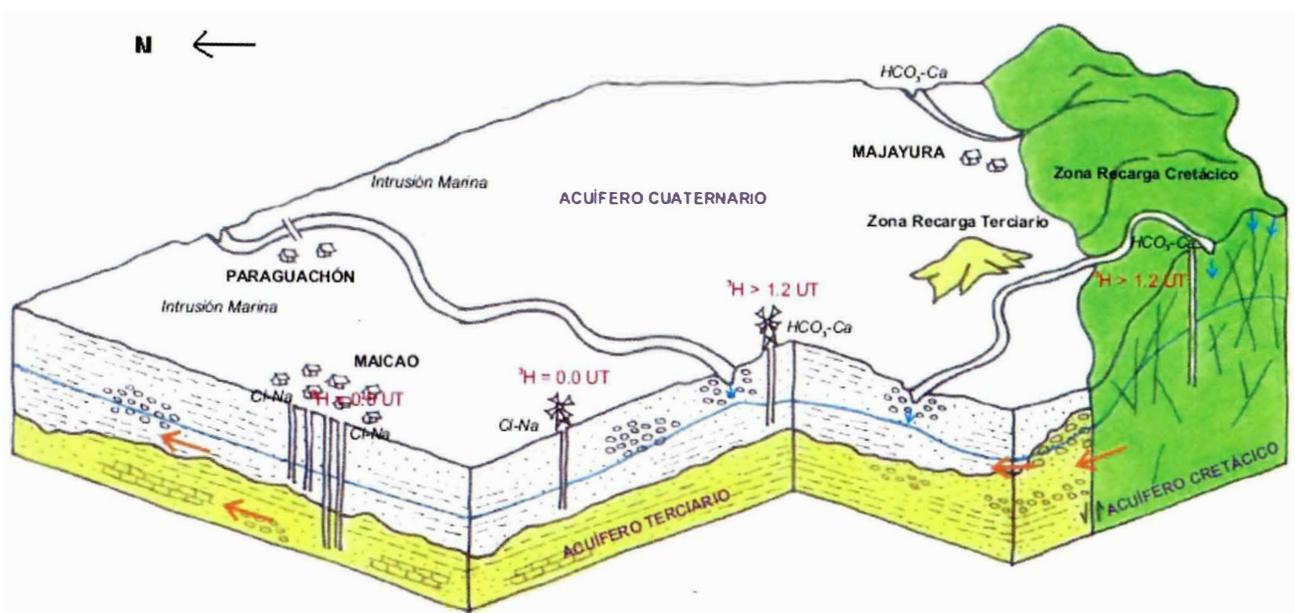
Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, que permitieron entender mejor el funcionamiento del sistema hidrogeológico del área, se puede proponer un modelo hidrogeológico conceptual (figura 8) que muestra una recarga reciente del acuífero Cretácico en la zona de afloramiento y la del acuífero Cuaternario

nario en una franja adyacente al cauce actual del río Carraipía, además de una recarga actual casi nula de la unidad Terciaria y del acuífero Cuaternario en los sectores alejados al río Carraipía. Lo anterior se debe tener en cuenta para efectos de la gestión y el manejo de aguas subterráneas. En la zona de Maicao hay agua subterránea reciente, es decir, su tiempo de renovación (edad) se puede contextualizar a la escala de una vida humana y, por tanto, su aprovechamiento puede responder a la tendencia conservacionista de encontrar un punto de equilibrio entre la recarga y lo que se desea extraer. Igualmente hay agua subterránea antigua con más de 7900 años de edad y su extracción siempre implicará una reducción de las reservas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Corporación Autónoma Regional de La Guajira (Corpoguajira), y ha contado con el auspicio y asesoría del Organismo Internacional de Energía Atómica, y con el apoyo del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). ▀



► Figura 8. Modelo conceptual de los acuíferos, Maicao (Colombia).

Referencias Bibliográficas

- Álvarez, O. (1994). *Análisis de los resultados de la perforación y construcción del pozo Carraipía 9*.
- Bürgl, H. (1960). Geología de la península de la Guajira. *Bol. Geol.*, 6, 129-168.
- Bürgl, H. (1961). Historia geológica de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exact. Fis. Nat.*, 11(43), 137-191.
- Bürgl, H. (1967). The orogenesis in the Andean system of Columbia. *Tectonophysics*, 4(4-6), 429-443.
- Consultores del Caribe Ltda. (2002). Plan de Ordenamiento Territorial, municipio de Maicao, La Guajira: Consolidado de los aspectos ambientales, parte II, p. 63.
- Huguett Granados, A. (1988). Resumen del Estudio Hidrogeológico de la Media y Baja Guajira. *Boletín Geológico*, 29(1), 45-83. Bogotá: INGEOMINAS.
- Ingeominas. (1999). Resultados de la ejecución de la prueba de bombeo en los pozos del acueducto de Maicao, departamento de La Guajira.
- Jousma, G. & Serrano, S. (1980). Investigación hidrológica de la Media y Baja Guajira. *Bol. Geol.*, 23(3).
- Mesa, O. J., Poveda, G. & Carvajal L. F. (1997). *Introducción al clima de Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exact. Fis. Nat.*, XXVIII(107), 202-220.
- Radelli, L. (1962). Acerca de la geología de la serranía de Perijá entre Codazzi y Villanueva (Magdalena-Guajira, Colombia). *Geología Colombiana*, 1, 23-P
- Thomas, D. & Mac Donald, W. (1976). Summary of Tertiary Stratigraphy and Structure, Guajira Peninsula. In Etayo-Serna and Cáceres-Girón (Eds.), *Primer Congreso Colombiano de Geología*.
- Toro, L. E. (2003). Informe preliminar perforación pozo de observación P37, corregimiento Majayura, Maicao. Informe Interno Corpoguajira.
- Toro, L. E. (2004). Estimación de la velocidad horizontal en pozos de observación en el municipio de Maicao. Primeros resultados. Documento interno de Corpoguajira.
- Ujueta, G. & Llinás, R. (1990). Reconocimiento geológico de la parte mas septentrional de la serranía de Perijá. *Geología Colombiana*, 17, 197-209.
- Wokittel, R. (1957). Bosquejo Geográfico y Geológico de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá. *Bol. Geol.*, 5(3), 29-49.