

IAEA-TECDOC-1611

Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Abril de 2009

IAEA-TECDOC-1611

***Estudios de Hidrología Isotópica
en América Latina 2006***



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Abril de 2009

La Sección encargada de la elaboración de esta publicación en el OIEA fue:

Sección de Hidrología Isotópica
Organismo Internacional de Energía Atómica
Wagramer Strasse 5
P.O. Box 100
A-1400 Vienna, Austria

ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA ISOTÓPICA EN AMÉRICA LATINA 2006

OIEA, VIENA, 2009

ISBN 978-92-0-301509-7

ISSN 1011-4289

© OIEA, 2009

Empreso por el OIEA en Austria

Abril de 2009

PREFACIO

Los países de América Latina son considerados, a excepción de algunas zonas en Perú, México y algunas islas del Caribe, territorios con abundantes recursos hídricos, ya que su disponibilidad de agua per cápita estimada supera los diez mil metros cúbicos al año. Sin embargo, en los últimos años se han estado presentando con mayor frecuencia y con creciente severidad, graves problemas de acceso a agua potable en todos los países de la región. Estos problemas son el resultado de un cúmulo de factores, que van desde la desigualdad en la distribución de la precipitación, la heterogeneidad espacial en la ocurrencia de acuíferos y otras fuentes hídricas, el desarrollo de grandes concentraciones humanas y núcleos industriales y agrícolas en regiones deficitarias en agua, y la contaminación de ríos, lagos y acuíferos. Por estas razones, los gobiernos de los países de América Latina han incrementado en las últimas décadas su preocupación por definir y poner en práctica políticas dirigidas a conocer mejor sus recursos, prevenir el deterioro de las fuentes de agua y optimizar su uso.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en el marco de su misión de promover el uso pacífico de las técnicas nucleares, auspicia proyectos tanto de carácter nacional como regional de investigación aplicada en el campo de los recursos hídricos en los países en vía de desarrollo. En estos proyectos se llevan a cabo estudios que conllevan el uso de técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas, dirigidos a evaluar los recursos hídricos en algunas zonas de interés, especialmente aquellas donde son más evidentes los problemas de acceso al agua, tanto en cantidad como en calidad. El proyecto RLA/8/031, llevado a cabo en once áreas de estudio en siete países de América Latina entre los años 2001 y 2005, es un ejemplo del esfuerzo conjunto entre el Organismo y los países ejecutores de tales proyectos por profundizar en el conocimiento del estado actual de fuentes hídricas claves para el desarrollo de importantes núcleos humanos.

El presente documento recoge los resultados más importantes obtenidos mediante la aplicación de herramientas hidroquímicas e isotópicas para la evaluación de once acuíferos en Colombia, Chile, Costa Rica, Ecuador, Nicaragua, Perú y Uruguay, en el marco del proyecto de Cooperación Técnica RLA/8/031. En el proyecto han participado tanto contrapartes técnicas con experiencia en el uso de las herramientas hidrogeoquímicas e isotópicas, como instituciones con responsabilidad a nivel nacional o local en la gestión de los recursos hídricos.

Se espera que la divulgación de los resultados logrados en este proyecto promueva, entre las entidades responsables del manejo de las fuentes hídricas en América Latina y en otros países, un mayor interés por llevar a cabo estudios dirigidos a conocer mejor y comprender la naturaleza de sus acuíferos. Asimismo confiamos que la información aportada por estos estudios permita poner en práctica las medidas necesarias para asegurar la disponibilidad de agua de buena calidad a las futuras generaciones. Esta publicación también refleja el interés creciente de los países de la región en el uso de estas técnicas para mejorar la evaluación de sus recursos hídricos, la consolidación de varios grupos con la experiencia necesaria para completar los estudios hidrológicos, así como la disponibilidad de expertos en estas disciplinas y laboratorios de hidrología isotópica capaces de realizar los análisis necesarios en América Latina.

NOTA EDITORIAL

Las denominaciones concretas de países o territorios empleadas en esta publicación no implican juicio alguno por parte del editor, el OIEA, sobre la condición jurídica de dichos países o territorios, de sus autoridades e instituciones, ni del trazado de sus fronteras.

La mención de nombres de determinadas empresas o productos (se indiquen o no como registrados) no implica ninguna intención de violar derechos de propiedad ni debe interpretarse como una aprobación o recomendación por parte del OIEA.

INDICE

Resumen de los resultados técnicos y científicos.....	1
Summary of the technical and scientific results.....	7
Plan de manejo integral del agua subterránea: Modelo hidrogeológico conceptual preliminar del acuífero de Pereira, Colombia	11
<i>D.L. Otálvaro, G.F. Arias, M.E. Vélez, J.O. García, P. de la Rosa, J.D. Taupin, M.C. Vargas Quintero</i>	
Estudio hidrogeológico con énfasis en hidroquímica del acuífero Morroa (Colombia).....	29
<i>H.M. Herrera, M.C. Vargas Quintero, J.D. Taupin</i>	
Estudio hidrogeológico con énfasis en hidroquímica de los acuíferos de la zona sur del departamento del Valle del Cauca (Colombia)	47
<i>G. Medina Morales, G. Paez Ortigón, M.C. Vargas Quintero, J.D. Taupin</i>	
Exploración de las aguas subterráneas en Maicao (Colombia) mediante técnicas hidroquímicas e isotópicas.....	67
<i>L.E. Toro, J. Calderón, J.D. Taupin, M.C. Vargas Quintero</i>	
Utilización de isótopos estables en la precipitación para determinar zonas de recarga del acuífero Barva, Costa Rica.....	83
<i>J. Reynolds-Vargas, J. Fraile</i>	
Aquifer recharge and contamination determination using environmental isotopes: Santiago basin, Chile: A study case	97
<i>S. Iriarte, M. Atenas, E. Aguirre, C. Tore</i>	
Estudio hidrogeológico y modelación del acuífero Centro-Norte de Quito.....	113
<i>V. Parreño, E. Pazmiño, T. Muñoz, C. Altamirano, G. Conlago, O. Yán</i>	
Estudio del acuífero aluvial del Valle de Estelí, Nicaragua.....	127
<i>D. Corrales Perez, V. Delgado Quezada</i>	
Hidrología isotópica para optimizar la gestión de los recursos hídricos en el norte de Perú: El acuífero Alto Piura – Perú	153
<i>I. Benavent, W. Castillo, M. Farías de Reyes, A.M. Chávez, C. Távara, E. Calderón, J.C. Alcas, M.S. Dunin-Borkowski</i>	
Caracterización del acuífero de Zarumilla – Perú, Ecuador.....	175
<i>J. Otiniano, J. Torres, W. Salas, F. Astudillo, M. Leiva, C. Sanz, J. Luna, J. Herbozo, D. Alemán, J. Carrillo</i>	
Gestión sostenible del acuífero Raigón, Uruguay	195
<i>M. Postiglione, L. Batista, D. Costa, R. Chao, J. Gorfain, J. Ledesma, F. Pérez, A. Sordo, D. Vignale, R. Carrión, E. Masa, S. Pena, M. Stapff, J. Bico, R. Caristo, P. Decoud, M. Teresa Roma, R. Guerequiz, J. Montaña, E. Peel</i>	
Lista de participantes.....	219

PROYECTO RLA/8/031

MANEJO INTEGRADO Y SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN AMÉRICA LATINA

RESUMEN DE LOS RESULTADOS TÉCNICOS Y CIENTÍFICOS

INTRODUCCIÓN

Las políticas de explotación de las aguas subterráneas como complemento de los recursos hídricos superficiales están frecuentemente basadas en planificaciones de corto plazo y pueden no ser sostenibles en el tiempo. El manejo sostenible de las aguas subterráneas tiene como objetivo usar el agua del subsuelo de tal manera que se alcance un estado de equilibrio, tanto en cantidad como en calidad del recurso hídrico. Esta forma de gestión permite preservar esos recursos para futuras generaciones.

Las técnicas convencionales e isotópicas permiten obtener información sobre los parámetros hidrogeológicos más importantes, tales como la zona y las tasas de recarga y descarga, estimación del volumen almacenado de agua subterránea, relaciones hídricas entre acuíferos y aguas superficiales, dirección y velocidad de los flujos subterráneos, etc. que permiten establecer modelos matemáticos de flujo. El modelo es una herramienta indispensable para el manejo sostenible del recurso hídrico. El objetivo del proyecto de cooperación técnica del OIEA ha sido contribuir al mejoramiento del conocimiento hidrogeológico mediante la utilización de las técnicas isotópicas y convencionales con el fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos subterráneos en unos países de América Latina. Se presenta aquí un breve resumen de los resultados técnicos obtenidos durante los cuatro años del proyecto regional.

ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS NACIONALES

1) Manejo integrado de cuatro acuíferos de Colombia

Colombia participó en el Proyecto Regional RLA/8/031 con el Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas (PPIAS). El PPIAS contó con la asesoría técnica y la coordinación nacional del Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS y tuvo como entidades ejecutoras a las Corporaciones Autónomas Regionales, CARDER, CARSUCRE, CORPOGUAJIRA y CVC.

a) Pereira, Risaralda

La zona estudiada por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) tiene una extensión de unos 890 km². La principal unidad geológica que almacena y transporta agua subterránea es la formación Pereira, de edad Terciario-Cuaternario. Esta formación está afectada por numerosas fallas y presenta aguas hidroquímicamente uniformes. Los resultados de ¹⁸O y ²H confirman la presencia de aguas derivadas de una fuente de recarga con características homogéneas, situada probablemente a una altura inferior a los 2000 metros. Los resultados de los análisis de ¹⁴C y ³H indican que el tiempo de residencia de estas aguas es inferior a unos 50 años. Este rápida recarga y flujo del agua subterránea hace que el acuífero sea vulnerable a la contaminación.

b) Morroa, Sucre

La Corporación Autónoma Regional de Sucre, CARSUCRE, ha realizado el estudio del acuífero Morroa, que se extiende sobre unos 100 km² y está ubicado al norte de Colombia, en el Departamento

de Sucre. El agua subterránea es la única fuente de abastecimiento de la región, caracterizada por un clima de bosque seco tropical. El acuífero multi-capa está constituido por areniscas y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas. El flujo regional del acuífero fue modificado por la explotación intensiva de los últimos 50 años. La mayoría de los puntos de ^{14}C medidos indican una edad aparente del agua entre 800 y 5000 años, confirmando los valores bajos de recarga obtenidos con el balance hídrico. La datación de las aguas subterráneas puso de manifiesto la ausencia de una recarga importante en la actualidad y por tanto, la necesidad de regular el suministro de agua.

c) Cali, Valle del Cauca

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, está ejecutando un plan de manejo de aguas subterráneas con instrumentos de gestión que garanticen la sostenibilidad del agua subterránea. El área de estudio, ubicada al sur occidente de Colombia, tiene como drenaje principal el río Cauca. En la zona existe un único acuífero constituido por dos niveles, cada uno de ellos con diferentes niveles hidráulicos y calidad del agua. Aproximadamente, el 95% de los pozos extraen agua del nivel más somero. Las técnicas isotópicas pusieron de manifiesto que ambos niveles comparte la zona de recarga y el diferente tiempo de residencia del agua subterránea de cada uno de ellos. Sin embargo este patrón de flujo se traduce en la existencia de diversas facies químicas en la zona. El nivel somero se recarga de forma rápida a través de fallas y contiene agua de buena calidad, mientras que el nivel profundo presenta concentraciones elevadas del ión cloruro. La recarga se produce en la zona montañosa a través de fallas y abanicos aluviales, y no en el cauce del río en la zona baja y llana, como se creía previamente. El acuífero profundo sólo se utiliza para el abastecimiento en explotaciones extensivas.

d) Maicao, La Guajira

Maicao es un municipio ubicado al norte de Colombia que depende en gran medida del recurso hídrico subterráneo para el abastecimiento doméstico de agua a la comunidad. El carácter costero de Maicao, la condición climática semiárida de la región, y el predominio de arcillas y limos en dos de los tres acuíferos presentes en la zona, hace que la disponibilidad de agua dulce, tanto superficial como subterránea sea escasa. Lo anterior, sumado al balance negativo entre oferta y demanda de agua, hace evidente la necesidad de establecer políticas coherentes para el manejo racional de las fuentes hídricas. En este acuífero se encontraron dos tipos de aguas subterráneas. El primero corresponde a aguas de baja salinidad y recarga reciente (menos de 50 años), localizadas en el acuífero Cretácico y en parte del acuífero Cuaternario adyacente al río Carraipía, que es el principal cuerpo de agua superficial de la zona. El segundo tipo presenta contenidos isotópicos de ^{18}O y ^2H más negativos que el primer grupo y sus aguas son más antiguas (más de 7000 años). Estas aguas se encuentran en el acuífero Terciario y en los sectores norte y central del acuífero Cuaternario. Los análisis químicos e isotópicos muestran que la recarga del acuífero Cuaternario, el más utilizado por los habitantes de la zona de Maicao, es muy baja y por tanto susceptible a periodos de escasez de recursos si no se llevan cabo medidas dirigidas a un uso racional de este valioso recurso. La autoridad nacional de Medio Ambiente en la región, CORPOGUAJIRA, dispone ahora de los argumentos técnicos para iniciar un trabajo en el ámbito social con los usuarios del agua subterránea.

2) El acuífero Barva, Costa Rica

El acuífero Barva ocupa 118 km^2 y se encuentra en la región montañosa del Valle Central de Costa Rica. Se trata de un acuífero confinado utilizado para el abastecimiento de unas 500 000 personas. Su explotación se realiza a través de más de 1000 pozos y 300 manantiales. El uso de isótopos estables (^{18}O , ^2H), junto con métodos hidrológicos convencionales, permitió definir las zonas de recarga y las características del flujo subterráneo. La recarga de las aguas subterráneas se produce fundamentalmente durante las épocas lluviosas y tiene lugar sobre todo el acuífero. La recarga de la parte más profunda del acuífero, ocurre principalmente en la zona alta del acuífero. La recarga es un proceso rápido sobre una gran parte del acuífero, presentando, por tanto, gran vulnerabilidad a la contaminación de sus aguas. Por tanto, es necesario llevar a cabo un programa de protección ya que el suelo y las formaciones geológicas de superficie no constituyen una barrera de protección eficiente

para las aguas subterráneas profundas. Es evidente que la gestión de las aguas subterráneas del Valle Central de Costa Rica no es correcta. Los resultados obtenidos durante la ejecución de este estudio se están diseminando y se espera que sirvan como base para la toma de decisiones políticas y administrativas en relación con la gestión de los recursos hídricos.

3) Acuífero de Santiago, Chile

El uso del acuífero de Santiago ha estado ligado principalmente al abastecimiento urbano de agua potable e industrial. Los recurrentes períodos de sequía en este sector del país y la creciente expansión de la ciudad hacen prever un continuo incremento de la explotación de aguas subterráneas. El proyecto ha permitido la integración de distintas instituciones públicas, privadas y académicas: Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), Comisión Nacional de Energía Atómica (CCHEN), Dirección General de Aguas (DGA), Aguas Andinas y la Universidad de Chile. Las diferencias geográficas y geológicas de las zonas de recarga han permitido utilizar los isótopos estables ^{18}O y ^2H del agua y de los iones sulfatos disueltos en agua (^{34}S y ^{18}O) para diferenciar las fuentes de recarga. El uso de las técnicas isotópicas fue clave para determinar que una gran proporción de la recarga deriva de las redes de abastecimiento y alcantarillado. Esta recarga urbana produce variaciones en los niveles piezométricos y en las direcciones de flujo del agua subterránea, así como en su calidad. Los datos químicos e isotópicos mostraron que el ión sulfato en los pozos someros procede de la disolución de evaporitas marinas presentes en la cuenca del río Maipú. Mediante los isótopos del ión nitrato (^{15}N y ^{18}O) se verificó que el nitrato deriva de fuentes animales, posiblemente a través de la red de saneamiento. La interacción entre las aguas superficiales y los mecanismos de recarga fue estudiada mediante el isótopo ^{13}C , mientras que la datación de las aguas más profundas se llevó a cabo mediante ^{14}C . El nivel de conocimiento adquirido con el desarrollo del proyecto ha permitido identificar amenazas a la sostenibilidad en el uso del recurso subterráneo bajo diferentes escenarios de explotación. La integración entre las instituciones participantes ha permitido proponer soluciones concertadas utilizando las herramientas generadas en el proyecto.

4) Acuífero de Quito, Ecuador

La Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable, EMAAPQ seleccionó para el estudio el acuífero de Quito, considerado como una importante reserva estratégica para el municipio y que actualmente presenta problemas de elevación del nivel piezométrico, generados desde que se inició el abastecimiento con agua superficial. La zona de recarga del acuífero se encuentra a una altitud de unos 3300 m, que corresponde a las pendientes del volcán Pichincha. Los datos de tritio mostraron la existencia de dos tipos de circulación de las aguas subterráneas. Se detectó la existencia de un componente de aguas subterráneas con circulación rápida (tiempo de residencia inferior a 20 años), y otras aguas con edades superiores a los 50 años. El componente de circulación rápida posiblemente fluye a través de fallas geológicas. Asimismo, se sospecha que las fugas de la red de abastecimiento contribuyen notablemente a la recarga de los niveles someros del acuífero de Quito. EMAAPQ, la compañía local encargada de la gestión de las aguas subterráneas, extrae unos $200 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ para abastecimiento de las comunidades urbanas, y los planes prevén alcanzar la cifra de $600 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Los logros alcanzados en el acuífero de Quito han motivado a la EMAAPQ para iniciar nuevos estudios semejantes en los valles aledaños a la ciudad y que pretenden resolver los problemas de abastecimiento que puedan surgir como consecuencia de la expansión urbana.

5) Acuífero aluvial del Valle de Estelí, Nicaragua.

El Valle de Estelí tiene una población de 115 000 habitantes, y de los cuales, el 80% de la población depende del agua subterránea para consumo. El acuífero local ocupa un área de 71.62 km^2 y es en términos generales de tipo libre, aunque localmente puede estar semiconfinado o confinado. Las aguas subterráneas de este acuífero se consideran aptas para riego. No se han observado diferencias en la composición química e isotópica de las aguas subterráneas entre las estaciones seca y lluviosa, implicando que el río local alimenta las aguas subterráneas y que no se identifica en el acuífero la señal isotópica de la precipitación local. Los datos de ^{18}O , ^2H y tritio en las aguas subterráneas

sugieren que el acuífero aluvial de Estelí se alimenta también de un acuífero regional recargado en la parte alta del Valle. Estos resultados han ayudado a definir un plan de gestión de las aguas subterráneas para la parte alta del Valle de Estelí

6) Acuífero del Alto Piura, Perú

Con una extensión aproximada de 600 km², el alto Piura es una región agrícola con dos núcleos urbanos de tamaño medio con una población total de 280 000 habitantes. Las aguas superficiales se utilizan de forma intensiva para usos agrícolas. El acuífero se tipifica como semi-confinado. Los estudios hidrogeoquímicos realizados han permitido identificar una composición bicarbonatada calcico-magnésica de la mayor parte de las aguas subterráneas de este acuífero, con evolución a un tipo clorurada sodico-potásica en el sector Suroeste. La información aportada por los isótopos llevó a modificar el modelo conceptual del flujo del acuífero. Se identificó la existencia de una recarga lateral de carácter regional.

7) Acuífero binacional Zarumilla, Ecuador y Perú

El estudio de este acuífero se llevó a cabo bajo la coordinación del Proyecto Binacional Puyango Tumbes en Perú y la Subcomisión Ecuatoriana-PREDESUR; el ámbito de estudio corresponde a la zona norte de Perú y sur del Ecuador, donde el conocimiento de las aguas subterráneas era casi inexistente. Los logros del proyecto incluyen *i)* conformación de un equipo de trabajo bilateral Perú-Ecuador y multisectorial, *ii)* recopilación y sistematización de información hidrogeológica básica, *iii)* establecimiento del primer mapa geológico integrado y el mapa hidrogeológico preliminar, *vi)* el uso de técnicas isotópicas confirmó la conexión hidráulica entre el río y el acuífero somero, así como el hecho de que el acuífero Neógeno profundo está desconectado del acuífero somero, *v)* la zona de recarga del acuífero profundo se localiza a cotas relativamente bajas, contrariamente a lo asumido hasta la realización de este estudio, y *vi)* el proyecto contribuyó a crear conciencia sobre la problemática del recurso hídrico subterráneo y la necesidad de fomentar y aplicar políticas para asegurar la sostenibilidad del recurso.

8) Acuífero Raigón, Uruguay

El sistema acuífero Raigón está ubicado al sur del Departamento de San José y abarca una superficie de unos 1 800 km². Este acuífero está considerado como un recurso estratégico para el país ya que de él depende el abastecimiento a la población, riego, industria y el abrevado de ganado. Un conjunto de siete instituciones públicas participaron en el proyecto. El acuífero se considera ahora de tipo multi-capas. Mediante la aplicación de técnicas convencionales e isotópicas se avanzó en los objetivos específicos del proyecto por lo que actualmente se dispone de un modelo conceptual consolidado. Se ha confirmado que el acuífero está compuesto de varias capas con comportamiento hidráulico diferente. Se determinó que un máximo del 20% del agua extraída por la formación Chuy procede del acuífero Raigón y que la recarga es más importante en las zonas donde la formación Libertad es más potente. La precipitación sobre la zona representa la principal forma de recarga. Los resultados de los análisis de ¹⁵N en el nitrato disuelto confirmaron que su origen se debe fundamentalmente a animales. Se dispone de la caracterización hidrogeoquímica de sus aguas, de los usos efectivos, y de un mapa de vulnerabilidad. La modelación numérica que se está efectuando, permitirá predecir las alteraciones que ocurrirán en el sistema por los diferentes procesos de explotación.

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El proyecto regional RLA/8/031 iniciado en el 2001 y concluido en 2005 facilitó el estudio de once acuíferos de la región, aplicando de forma integrada tecnologías isotópicas y herramientas hidrogeológicas convencionales. El proyecto ha conducido a una mejora importante del conocimiento sobre la dinámica y el funcionamiento de los sistemas acuíferos y ha ayudado a definir las prioridades del trabajo futuro para garantizar una gestión de sus recursos. Dicho conocimiento técnico contempló la elaboración y revisión de modelos hidrogeológicos conceptuales sobre los que se desarrollarán modelos matemáticos como herramientas de gestión del recurso. El proyecto también ha contribuido a

capacitar técnicos en los siete países participantes, a mejorar el conocimiento hidrogeológico y a fortalecer las instituciones involucradas en el conocimiento y gestión de los recursos hídricos subterráneos.

Tras la conclusión de este proyecto una buena parte de las contrapartes sigue involucrada en la realización de estudios hidrogeológicos y en algunos casos, se han reclutado nuevos profesionales en temas hidrogeológicos para llevar a cabo este tipo de estudios. Algunos de estos proyectos se realizan en el marco de los proyectos de Cooperación Técnica del OIEA, mientras que otros se financian con recursos propios.

INTEGRATED AND SUSTAINABLE MANAGEMENT OF GROUNDWATER RESOURCES IN LATIN AMERICA

PROJECT RLA/8/041

SUMMARY OF THE TECHNICAL AND SCIENTIFIC RESULTS

INTRODUCTION

Policies for the exploitation of groundwater as a complement to surface water resources are frequently based on short term planning and may not be sustainable over time. The objective of sustainable groundwater management is to use groundwater in conjunction with surface waters in such a way that a state of equilibrium is reached in terms of both quantity and quality of water. This type of management allows these underground resources to be preserved for future generations.

Conventional and isotope techniques allow information to be obtained on the most important hydrogeological parameters such as identification and evaluation of recharge and discharge area and rates, the available volume of groundwater to be estimated, hydrological interconnections between aquifers and surface waters, direction and velocity of groundwater flows, etc., which allow mathematical flow models to be established and validated. Mathematical models are indispensable tools for sustainable water resource management. The objective of the IAEA technical cooperation project RLA/8/031 was to contribute to improve the hydrogeological understanding of the aquifers through the use of isotopic and conventional techniques, with the final aim of improving groundwater resource management in several countries in Latin America. The present paper briefly summarizes the technical results obtained during the four years of the regional project.

NATIONAL HYDROGEOLOGICAL STUDIES

1) Integrated management of four aquifers in Colombia

Colombia participated in regional project RLA/8/031 through the PPIAS (Integrated Groundwater Protection Project). Technical advice and national coordination for the PPIAS were provided by the Colombian Institute of Geology and Mining (INGEOMINAS), and its executing bodies were the regional autonomous corporations CARDER, CARSUCRE, CORPOGUAJIRA and CVC.

a) Pereira, Risaralda

The area studied by the Risaralda Regional Autonomous Corporation (CARDER) extends over some 89 km². The principal geological unit storing and transporting groundwater is the Tertiary-Quaternary Pereira formation. This formation has numerous faults and presents a hydrochemically uniform type of water. The ¹⁸O and ²H results show that the aquifer contains homogeneous water with recharge probably at an altitude below 2000 m. The results of the ¹⁴C and ³H analyses indicate that the residence time of this water is less than about 50 years. This rapid recharge and flow of groundwater indicates the vulnerability of the aquifer to pollution.

b) Morroa, Sucre

The Sucre Regional Autonomous Corporation (CARSUCRE) has conducted a study of the Morroa aquifer, which is some 100 km² in extent and is located in the north of Colombia, in the Department of Sucre. Groundwater is the only source of supply in this region characterized by a tropical dry forest climate. The multilayer aquifer consists of poorly consolidated sandstones and conglomerates with intercalated claystone bands. The regional flow of the aquifer has been altered by the intensive exploitation of the last 50 years. Most of the ¹⁴C points measured show an apparent age of the water

between 800 and 5000 years, confirming the low recharge values obtained from the water balance. The dating of groundwater revealed the absence of significant recharge at present conditions, and thus the need to regulate the water supply.

c) Cali, Valle del Cauca

The Valle del Cauca Regional Autonomous Corporation (CVC) is implementing a plan to manage groundwater using management tools that will ensure its sustainable use. The area of the study, located in the south-west of Colombia, is drained principally by the river Cauca. There is only one aquifer in the area, consisting of two layers, each with a different hydraulic level and water quality. Approximately 95% of the wells extract water from the shallower layer. Isotopic techniques have shown that both levels share the recharge zone and that the residence time of groundwater in each unit is different. This flow pattern is reflected by the existence of different chemical facies in the area. The shallow level is recharged rapidly through faults and contains water of good quality, whereas the deeper level has higher chloride concentrations. Recharge takes place in the mountainous zone through faults and alluvial fans, not in the riverbed in the low and flat area as previously believed. The deep aquifer is only used to supply large institutional or private users. The project contributed to improving the knowledge of the groundwater dynamics and helped identify priorities in future activities related to the management of the area's water resources.

d) Maicao, La Guajira

Maicao is a municipality located in the north of Colombia which depends to a great extent on groundwater resources for the community's domestic water supply. The coastal location of Maicao, under semi-arid climate conditions, and the predominance of clays and mudstones in two of the three aquifers existing in the area lead to the fact that fresh surface waters and groundwaters being scarce. This, together with the negative water balance between recharge and demand, highlights the need to establish coherent policies for the rational management of water sources. This aquifer comprises two types of groundwater. The first consists of water of low salinity recently recharged (less than 50 years) and located in the Cretaceous aquifer and in part of the Quaternary aquifer adjacent to the river Charapilla, which is the main source of surface water in the area. The second type has more negative isotopic contents of ^{18}O and ^2H than the first group, and its groundwater is older (recharged more than 7000 years ago). Those old groundwater are found in the Tertiary aquifer and in the northern and central sectors of the Quaternary aquifer. Chemical and isotopic analyses show that the recharge of the Quaternary aquifer, the most heavily exploited by the inhabitants of the Maicao area, is very low and thus there is a danger of shortages unless measures are taken to ensure the rational use of this valuable resource. The water availability paradigm used prior to this study on the availability of groundwater in the area has changed dramatically, and as a result CORPOGUAJIRA is exploring new sites from which to satisfy the demand for water supplies.

2) Barva aquifer, Costa Rica

The Barva aquifer occupies 118 km² and is located in the mountainous region of Costa Rica's Central Valley. It is a confined aquifer used to supply about 500 000 people. It is exploited through over 1000 wells and 300 springs. The use of stable isotopes (^{18}O , ^2H), together with conventional hydrological methods, has made it possible to delineate the recharge zones and the characteristics of the groundwater flow. Groundwater recharge takes place mainly during rainy periods and over the whole aquifer. The recharge of the deepest part of the aquifer occurs principally in the high elevation part of the aquifer. Recharge is a rapid process over much of the aquifer, thus making it highly vulnerable to contamination. It is therefore necessary to implement a protection programme, as the soil and surface geological formations do not constitute an effective protective barrier for the deep groundwater. The decisions taken today do not guarantee the population access to water of good quality in the next years. The results obtained in this study are being disseminated, and it is hoped that they will serve as a basis for taking political and administrative decisions in relation to water resource management.

3) Santiago aquifer, Chile

The Santiago aquifer has been mainly used to supplying the city with potable and industrial water. The recurrent periods of drought in this part of the country and the growing expansion of the city will probably lead to a continuous increase in the exploitation of groundwater. The project has brought together various public, private and academic institutions: the National Geology and Mining Service (SERNAGEOMIN), the Sanitary Services Superintendence (SISS), the National Commission for the Environment (CONAMA), the National Atomic Energy Commission (CCHEN), the General Water Directorate (DGA), Aguas Andinas and the University of Chile. The geographical and geological differences of the recharge zones have made it possible to use the stable isotopes ^{18}O and ^2H in water and sulphate ions dissolved in water (^{34}S and ^{18}O) to distinguish the sources of recharge. The use of isotope techniques was a key element to determining that a large proportion of the recharge derives from the water supply and sewer networks. This urban recharge produces variations in piezometric levels and in the directions of groundwater flow, as well as in groundwater quality. The chemical and isotopic data show that sulphate ions in shallow wells derive from dissolved marine evaporites present in the Maipú river basin. Nitrate ion isotopes (^{15}N and ^{18}O) were used to verify that the nitrate derives from animal sources, possibly through the sanitation network. The interaction between surface water and the recharge mechanisms was studied using the isotope ^{13}C , whereas deeper water was dated using ^{14}C . The level of knowledge acquired in the project has enabled threats to the sustainability of the underground resources in different exploitation scenarios to be identified. The collaboration of the participating institutions will make it possible to propose coordinated solutions using the tools generated by the project.

4) Quito aquifer, Ecuador

The Metropolitan Sewage and Drinking Water Company (EMAAPQ) chose for its study the Quito aquifer, which is considered an important strategic reserve for the city and which is currently presenting problems of rising piezometric levels that have been produced since supply with surface water started. The aquifer's recharge zone is at an altitude of about 3300 m in the slopes of the Pichincha volcano. The tritium data demonstrate the existence of two types of groundwater circulation. There is one groundwater component with rapid circulation (residence time less than 20 years) and another with water older than 50 years. The rapid-circulation component may flow through geological faults. Moreover, it is suspected that leaks from the supply network contribute significantly to the recharge of the shallow levels of the Quito aquifer. EMAAPQ, the local company in charge of groundwater, extracts some $200 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ to supply urban communities, and with current plans it is hoped to achieve $600 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. The results achieved with the Quito aquifer have prompted EMAAPQ to launch further similar studies in the valleys around the city aimed at solving supply problems that may arise as a result of urban expansion.

5) Alluvial aquifer of the Estelí Valley, Nicaragua

The Estelí Valley has a population of 115 000 inhabitants, 80% of whom depend on groundwater for consumption. The local aquifer occupies an area of 71.62 km^2 under generally phreatic or locally semi-confined or artesian conditions. The groundwater in this aquifer is considered suitable for irrigation. No differences have been observed in the chemical and isotopic composition of the groundwater between the dry and rainy seasons, suggesting that the local river feeds the groundwater and that the isotopic signal of the local precipitation cannot be identified in the aquifer. The ^{18}O , ^2H and tritium data from the groundwater suggest that the Estelí alluvial aquifer is also fed from a regional aquifer recharged in the high part of the Valley. These results have helped draw up a groundwater management plan for the higher part of the Estelí Valley.

6) Alto Piura aquifer, Peru

With an area of approximately 600 km^2 , Alto Piura is an agricultural region with two medium-sized urban centres and a total population of 280 000. The surface water is used intensively for agricultural purposes. The aquifer is classified as semi-confined. The hydrogeochemical studies carried out have made it possible to establish a calcium-magnesium bicarbonate composition of most of the

groundwater, mainly towards the NE side of the basin, with sodium-potassium chlorides substituted on the SW side. The information provided by isotopes has led to a modification of the conceptual model of the aquifer's flow. The existence of a regional lateral recharge has been revealed. Also, isotopic characterization of the water (^{18}O , ^2H and ^3H) has made it possible to identify the recharge sources and to modify the established conceptual model. The presence of considerable lateral recharge has been determined.

7) Zarumilla binational aquifer, Ecuador and Peru

The study of this aquifer was carried out with coordination by the Puyango Tumbes Binational Project in Peru and the Ecuadorian Sub-Commission–PREDESUR; in scope, the study covered the north of Peru and the south of Ecuador, where knowledge about the groundwater was virtually non-existent. The achievements of the project include: (i) establishment of a bilateral and multisectoral working team; (ii) collection and systematization of basic information; (iii) preparation of the first integrated geological map and the preliminary hydrogeological map; (iv) use of isotopic techniques to confirm the hydraulic connection between the river and the shallow aquifer, as well as the fact that the deep Neogene aquifer is unconnected to the shallow aquifer; (v) the recharge area of the deep aquifer is at a relatively low altitude, contrary to what was assumed before this study was conducted; and (vi) the project contributed towards creating awareness of the groundwater resource issue and the need to promote and apply policies for the sustainability of the resource.

8) Raigón aquifer, Uruguay

The Raigón aquifer system is located in the Department of San José and occupies an area of some 1800 km². This aquifer is considered a strategic resource for the country, as supplies to the population, irrigation, industry and livestock depend on it. A group of seven public institutions participated in the project. The aquifer is now considered to be of the multilayer type. Using conventional and isotopic techniques, progress was made with the specific objectives of the project so that a consolidated conceptual model is now available. It has been confirmed that the aquifer consists of various layers differing in hydraulic behaviour. It has been determined that a maximum of 20% of the water extracted through the Chuy formation comes from the Raigón aquifer and that the recharge is greater in areas where the Libertad formation is thicker. Precipitation onto the area is the main mode of recharge. The results of the analysis of ^{15}N in dissolved nitrate have confirmed that it is largely of animal origin.

A hydrogeochemical characterization of its water and its effective use and a vulnerability map are available. The numerical modelling which is being done will make it possible to predict the changes that will occur in the system as a result of different exploitation processes.

CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

The regional project RLA/8/031, started in 2001 and concluded in 2005, contributed to the study of 11 aquifers in the region through the integrated application of isotopic and conventional techniques. It greatly improved knowledge of the dynamics and functioning of the aquifer systems and helped to define priorities for future work. This technical knowledge has allowed the establishment of conceptual hydrogeological models on the basis of which mathematical models will be developed as resource management tools. The project also contributed to training technicians in the seven participating countries, to improving hydrogeological knowledge and to strengthening the institutions involved in the study and management of groundwater resources.

Plan de Manejo Integral del Agua Subterránea

Modelo Hidrogeológico Conceptual Preliminar del

Acuífero de Pereira, Colombia

**D.L. Otálvaro^a, G.F. Arias^a, M.E. Vélez^a, J.O. García^a,
P. De La Rosa^a, J.D. Taupin^b, M.C. Vargas^c**

^aSubdirección de Gestión Ambiental Territorial, Corporación Autónoma Regional de Risaralda, CARDER, Pereira, Risaralda, Colombia

^bInstitut de Recherche pour le Développement (IRD), Quito

^cInstituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS, Bogotá, Colombia

Resumen. El acuífero principal en la zona de estudio, la formación Pereira, está integrado por dos niveles; el superior formado por cenizas volcánicas, es aprovechado principalmente mediante aljibes de hasta 30m, y el inferior, formado por flujos volcánico-clásticos. Este último nivel presenta espesores, en algunos sitios, superiores a 300 m, y es aprovechado por pozos con una profundidad de 40 a 240 m. La dirección del flujo en los dos niveles es Este-Oeste, con bifurcación al NW y SW, coincidente con los drenajes superficiales. El acuífero está limitado al Sur por los sedimentos Terciarios del Sinclinal de Miravalles, y al N-NE por las rocas Cretácicas ígneas y metamórficas. Existe una homogeneidad química de tipo bicarbonatado-sódico-magnésico principalmente, con una conductividad menor que 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La composición isotópica del agua subterránea muestra también una homogeneidad (entre -9.5‰ y -10.5‰ para ^{18}O), sin una distribución geográfica particular. Los isótopos radioactivos (^{14}C , ^3H) indican un tiempo de residencia inferior a 50 años. La composición isotópica ponderada del agua lluvia, entre marzo de 2003 y diciembre de 2004, muestra una relación con la altura en las cinco estaciones ubicadas entre 930 y 3950 msnm, entre -10.4 y -14 ‰ en ^{18}O , pudiéndose concluir que la zona de recarga coincide con la zona del acuífero hasta una altura de 1500 msnm.

Abstract. The main aquifer unit in the study area, the Pereira Formation, consists of two layers. The upper layer, composed of volcanic ash, is mainly exploited through dug wells till 30 m depth. The lower layer is composed of volcanoclastic flows, with a thickness up to 300 m and abstraction is made by wells ranging in depth from 40 to 240 m. The main groundwater flow direction for both layers is East-to-West, branching into NW and SW directions, corresponding to the surface drainage. The borders of the aquifer are, to the south the Tertiary sediments of Miravalles Syncline and to the north and northeast the Cretaceous igneous and metamorphic rocks. Chemical homogeneity of groundwater was identified in the study. Groundwater is mainly of sodium-magnesium bicarbonate type with very low conductivity ($<300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). The groundwater isotopic composition indicates also a great homogeneity (-9.5‰ to -10.5‰ for $\delta^{18}\text{O}$) without any specific geographical distribution. Radioactive isotopes (^{14}C , ^3H) indicate a residence time lower than 50 years. Isotope content of rainfall for the period 2003-2004, measured at five stations located between 930 and 3950 m.a.s.l., indicates an isotope range from -10.4‰ to -14‰ (for $\delta^{18}\text{O}$). With these results, it was possible to conclude that the recharge zone is coincident with the aquifer outcrop, up to an altitude of 1500 m.

1. Introducción

El proyecto para la formulación del “Plan de Manejo Integral de las Aguas Subterráneas en Pereira, PPMIASP” ha sido desarrollado por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda, CARDER, desde el año 2001, con el apoyo técnico y logístico del Gobierno Británico, el Organismo

Internacional de Energía Atómica, OIEA, y entidades nacionales como INGEOMINAS, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el IDEAM.

En la región, el uso no planificado del agua subterránea se ha ido incrementando en las zonas de expansión urbana, debido principalmente al empobrecimiento de la calidad de las aguas superficiales de las partes bajas de las cuencas, convertidas muchas veces en agentes receptores de residuos líquidos y sólidos. De esta manera, algunas regiones como Tribunas-Cerritos-Puerto Caldas, han optado por el agua subterránea como una importante fuente de abastecimiento doméstico.

Con este panorama, CARDER a través de este proyecto, se ha propuesto adquirir las herramientas técnicas, sociales y administrativas que le permitan gestionar el uso racional y sostenible de las aguas subterráneas, propendiendo por garantizar a generaciones actuales y futuras su conservación en términos de calidad y cantidad.

La Corporación CARDER, cumpliendo con su misión de contribuir a la mejora de la calidad de vida de la población Risaraldense mediante la conservación y recuperación del Medio Ambiente, ha emprendido el proyecto PPMIASP, con los siguientes objetivos:

- Formulación del plan de manejo, basado en el conocimiento del funcionamiento del acuífero del acuífero.
- Implementación de un modelo matemático en el área de mayor utilización del recurso, zona rural de Cerritos.
- Desarrollo de estrategias para la participación de los actores relacionados con el recurso hídrico subterráneo en el desarrollo e implementación del plan de manejo.
- Ajuste e implementación de los instrumentos administrativos para gestión y control del recurso.

2. Marco general del estudio

2.1. Localización

Este proyecto se desarrolla en la denominada zona cafetera colombiana, en el centro occidente del país, sobre los Andes Colombianos (Cordillera Central). Involucra los municipios de Pereira, Dosquebradas y parte de Santa Rosa y de Marsella, Departamento de Risaralda, cubriendo un área de 890 km². Esta zona está comprendida entre el Río Cauca al oeste con alturas comprendidas entre 950 msnm y el Parque Natural de los Nevados al este, con 4500 msnm (ver Figura 1.)

La climatología es de Tipo Bosque Húmedo Pre-montano, con una temperatura promedio anual de 22°C y una precipitación bimodal con dos estaciones húmedas (marzo-junio; septiembre-noviembre) y dos estaciones secas (diciembre-febrero y julio-agosto) y una media anual de 2300 mm/año.

Geomorfológicamente se diferencian tres unidades asociadas a la litología y a las formaciones superficiales. Unidad A: caracterizada por un relieve ondulado en forma de abanico aluvial de cimas amplias redondeadas y laderas cortas de pendiente más fuerte; Unidad B: está localizada en la parte oeste del área, presenta una geomorfología relativamente suave con colinas pequeñas un poco afiladas, y la Unidad C representa las zonas más bajas del área conformadas por aluviones heterométricos de los ríos Cauca y Otún. Al norte de la zona, hay dos relieves aproximadamente de 2000 msnm.

Entre los accidentes orográficos que limitan el área se destacan los nevados del Quindío y Santa Isabel, situados en los límites con los departamentos de Quindío y Tolima respectivamente. El sistema hidrográfico lo comprenden los ríos Cauca, Barbas, La Vieja, Otún y Consota y las Quebradas Cestillal y el Piñal.



FIG. 1. Localización del área de estudio.

La población actual de la zona metropolitana (Pereira, Dosquebradas, La Virginia), de la cual hace parte la zona de estudio, es de aproximadamente 520.000 habitantes. En la ciudad de Pereira, capital del Departamento, la industria manufacturera concentra más del 60% de la producción. El cultivo de café ha sido tradicional en el sector gracias a la vocación de los suelos, siendo Pereira el primer municipio productor de Colombia, además, de ser el mayor productor de caña de azúcar industrial panelera de Risaralda, seguido del plátano, yuca, piña y cacao [1].

Las variadas condiciones geográficas del área, la proyectan como un polo de atracción turística, por su ubicación estratégica en el denominado “Triángulo de Oro” entre las ciudades de Medellín, Bogotá y Cali, por su riqueza hídrica, su agradable clima, acceso al Parque Nacional Natural de Los Nevados, a fuentes hidrotermales y por la abundancia de senderos ecológicos, entre otros.

2.2. Geología

La zona de estudio presenta una alta complejidad geológica y estructural, debido no sólo a los procesos que dieron origen a las unidades aflorantes, sino también a la gran red de fallas, algunas con actividad reciente, que generan bloques hundidos y levantados, basculamientos e interrupciones de unidades y que deben influenciar la circulación del agua subterránea. Las unidades aflorantes en el área tienen edades desde el Paleozoico hasta el Cuaternario reciente (Figura 2).

Las rocas más antiguas corresponden al Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central (Pes), compuesto principalmente por esquistos verdes y grafitos con alto grado de metamorfismo, que afloran en una pequeña franja aledaña al Río Otún.

Las unidades Cretácicas corresponden a las formaciones, Quebradagrande (Kvc), constituida por dos secuencias, rocas volcánicas básicas (Kvc) y rocas sedimentarias (Ksc), que afloran en un pequeño cuerpo al Este del casco urbano de Pereira. La Formación Barroso (Kvb), se refiere a un complejo volcánico lávico y volcanoclástico, de composición básica que aflora al norte de la zona de estudio y al Sur del casco urbano de Pereira con una geofoma de pico alargado. El Stock Gabróico de Pereira (Kgp) aflora al Este de Dosquebradas y Pereira, y el Complejo Arquía (Kiea) que está compuesto por esquistos verdes y sericíticos aflorando al norte de Dosquebradas.

sur de la zona de estudio y con los depósitos fluviolacustres de Dosquebradas, acuífero captado por al menos 12 pozos industriales, con profundidades de hasta 220 m [5]. Esta interdigitación entre los acuíferos locales y el principal, formación Pereira, hace suponer una interconexión hidráulica de los mismos.

La formación Pereira, ocupa la zona central y oeste del área de estudio con alturas comprendidas entre 950 y 1500 msnm, correspondiente a la unidad geomorfológica A. Esta formación se extiende al Sur, fuera del área, hacia el departamento del Quindío.

Este acuífero se caracteriza por una alta heterogeneidad lateral y vertical. La geoelectrica muestra tres niveles en la formación, suelo arcilloso y arenoso seco (0 a 6-8 m), ceniza volcánica en matriz limo-arenosa, parcialmente saturadas, con profundidades de hasta 35 m (a veces mas de 120 m), y flujos de escombros, flujos piroclásticos, conglomerados, arena en matriz arcillo-arenosa, saturadas con profundidades 15 a 200 (hasta 280 m). Sin embargo, con los estudios existentes no se puede hacer una correlación lateral de los mismos para toda la zona [6].

El basamento del acuífero esta conformado por dos tipos de unidades, al N-NE por rocas ígneas y metamórficas del Cretácico (Kvc, Kvb, Kiea, Kgp), que conforman relieves escarpados, y que se encuentran muy fracturadas a nivel superficial. Estas rocas en profundidad están afectadas por el sistema de fallamiento, generando bloques hundidos y levantados que condicionan en gran medida la geometría del acuífero. En las zonas aledañas al municipio de Pereira fue definida su profundidad en un rango de 50 a 190 m, aumentando progresivamente de Este a Oeste y de Sur al Noroeste de 60 a 113 m [7]. Al Suroeste el basamento lo constituye la formación Terciaria Cauca Superior (TOC) que conforma el Sinclinal de Miravalles. Para esta formación, que no presenta un contraste de resistividades con la formación Pereira, sólo se conocen datos parciales sobre su profundidad (130 m en el sector de Cerritos). El contacto entre estos dos tipos de basamento no ha sido definido con los estudios realizados a la fecha; sin embargo, se espera tener un mejor conocimiento de la geometría del acuífero con la integración de métodos geofísicos a realizarse en el segundo semestre de 2005.

Para el acuífero formación Pereira, se ha trabajado la hipótesis de su conformación por dos capas productivas en contacto directo, con base en la diferencia de niveles de agua subterránea, muy marcada en ciertas zonas como Tribunias y en la parte central de Cerritos. Esta hipótesis se apoya además en la geología y geoelectrica, que muestran en dichos sectores los mayores espesores del miembro superior de la formación Pereira (entre 25 y 35 m), mientras en el resto del área se alcanza en general espesores inferiores a 20 m. Este nivel es captado principalmente por aljibes y por algunos pozos someros que parecen captar una mezcla de los niveles superior e inferior. El nivel inferior conformado por flujos volcano-clásticos principalmente, es captado por pozos con profundidades que varían entre 40 y 240 m, es de carácter semiconfinado a confinado, con capacidades específicas entre 0.02 y 0.49 $L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ y de transmisividad hasta de 330 $m^2 \cdot d^{-1}$.

El acuífero en conjunto es captado por más de 100 pozos (en uso) y por cerca de 600 aljibes, distribuidos principalmente en Cerritos y Puerto Caldas (Figura 3).

Con los niveles estáticos de pozos georreferenciados [8] y los de la campaña de medición de CARDER del mismo año, se construyó un mapa parcial de superficies piezométricas para el nivel inferior del acuífero de Pereira (Figura 4). El mapa muestra un sistema de flujo regional de E-W con bifurcación NW –SW coincidente con la red de drenaje superficial. La zona de descarga natural está asociada a los ríos Cauca y Barbas, que son la línea base de las aguas superficiales del área.

La tendencia regional del flujo para el nivel superior (aljibes) es similar a la encontrada en pozos aunque se aprecia mayor influencia de la red de drenaje superficial, que en la zona de estudio genera gran disección del terreno.

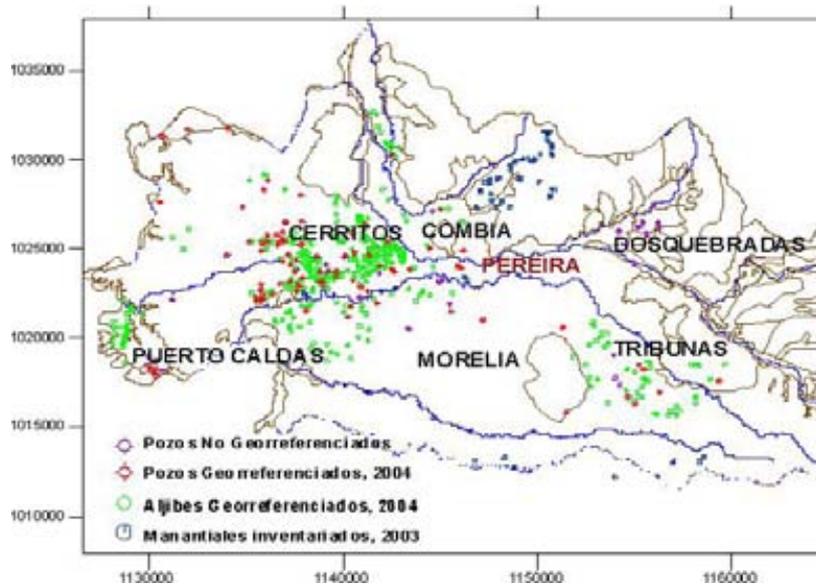


FIG. 3. Estado de explotación actual del acuífero formación Pereira.

Como se muestra en la Figura 4, mapa de superficies piezométricas para el nivel inferior del acuífero de Pereira, aún quedan zonas con poco cubrimiento como el sector de Dosquebradas, Morelia, Combia, situación que se espera mejorar con la implementación de la red de monitoreo redefinida y con la construcción de algunos piezómetros en la zona.

Los mecanismos de recarga del acuífero están relacionados principalmente con la precipitación directa sobre el nivel superior de la formación Pereira, como lo confirmarán los datos isotópicos (ver próximo capítulo), debiéndose presentar goteo hacia en nivel inferior. Otros mecanismo de recarga, aún no comprobados, deben ser trazos de fallas o zonas de contactos con los macizos rocosos, para el nivel inferior.

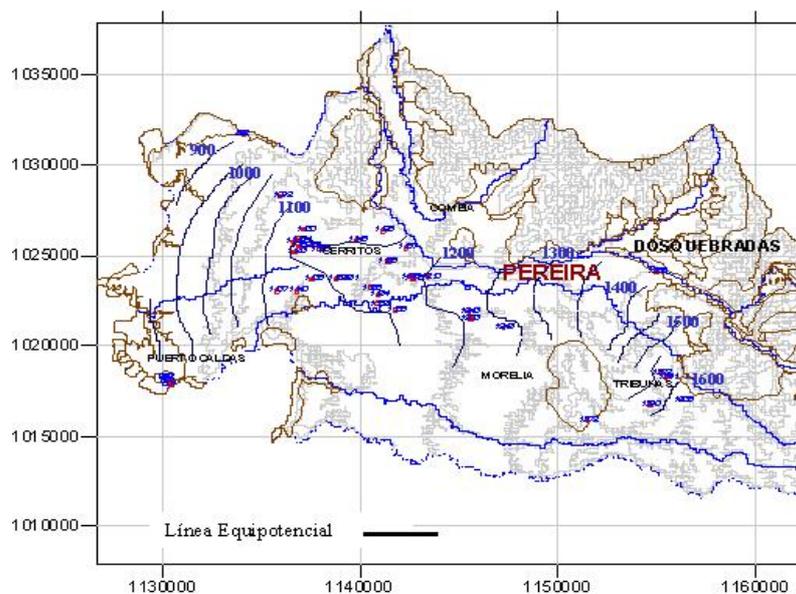


FIG. 4. Flujo regional del agua subterránea, nivel inferior de la formación Pereira

3. Enfoque metodológico

Paralelamente al proceso de construcción del modelo hidrogeológico conceptual a través de los estudios interdisciplinarios de hidrogeología clásica, como geología, geofísica, hidráulica e hidroquímica, se emplearon técnicas isotópicas. Específicamente se realizaron análisis de isótopos estables ^{18}O y ^2H e isótopos radioactivos ^{14}C y ^3H de aguas subterráneas, superficiales y lluvias, con el objetivo de delimitar la altura de recarga del acuífero, diferenciar mecanismos de recarga para las dos capas acuíferas de la formación Pereira y apoyar la hipótesis sobre la continuidad hidráulica entre los acuíferos de la zona.

En el desarrollo del proyecto, fue capacitado el personal de la Corporación en diferentes ramas de la hidrogeología de interés para el estudio, en el muestreo para análisis de isótopos estables y radioactivos. Fueron construidas estaciones de muestreo para aguas de lluvia, como en el caso de La Pastora y La Nevera, y se contó permanentemente con la asesoría técnica del OIEA en la interpretación de los datos obtenidos.

3.1. Hidroquímica

CARDER, dentro del Programa de Monitoreo de Calidad del Agua Subterránea ha muestreado de forma regular 53 pozos, de los cuales cerca de 40 poseen entre 18 y 25 registros fisicoquímicos, y los 13 restantes entre 1 y 3 registros. En 1997 el muestreo tuvo intensidad mensual y en los años sucesivos, fue de 3 veces al año. En todos los casos fueron determinados los iones mayoritarios de las muestras y parámetros como: acidez total ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCO_3), alcalinidad total, carbonácea y bicarbonácea ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCO_3), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y sólidos totales ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) [9].

Sin embargo, después de realizar un chequeo de cerca de 400 análisis de pozos, mediante balance iónico, se encontró que solamente 10% de las muestras quedaban en el rango de error analítico aceptable. Por lo tanto se decidió no proseguir con la interpretación hidrogeoquímica de los datos.

Para establecer el tipo de agua, se emplearon sólo los análisis que cumplieron con balance iónico cercano al 10%, encontrando que en general los pozos profundos contienen agua de tipo magnésica - sódica - bicarbonatada (Mg-Na-HCO_3) y algunos (escaso número), del tipo Sódica-Magnésica-Cálcica-Bicarbonatada (Na-Mg-Ca-HCO_3) como es el caso del pozo del Colegio La Salle, en el sector de cerritos. La conductividad es débil, entre 100 y 300 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Figura 5).

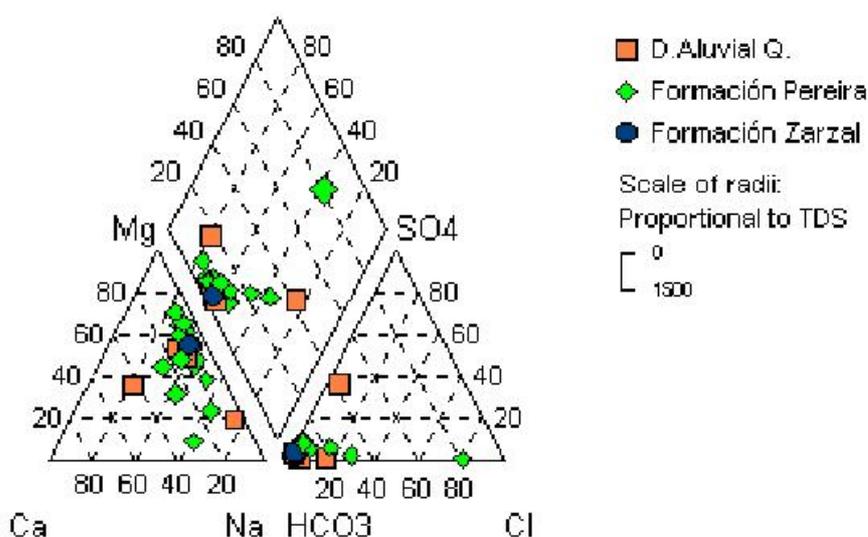


FIG. 5. Clasificación hidroquímica de las aguas subterráneas.

Se detectó igualmente una anomalía química en Na^+ y Cl^- y conductividad $<1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en 2 pozos cerca del Club Campestre Internacional, que parece estar relacionada con una mezcla de agua de otro origen, aunque aún es objeto de investigación [10].

Aunque se tienen muy pocos análisis para la formación Zarzal, se observa que la repartición iónica es la misma que para la formación Pereira, de tipo bicarbonatada - magnésica - sódica. La variabilidad química de las aguas de los aluviones del Cuaternario parece mayor pero no se diferencia de las otras formaciones. La química de la formación Pereira y su variación parece relacionada con la variedad de tipo de rocas alrededor, pero esta afirmación debe ser investigada con mayor detalle.

La conductividad del agua subterránea aumenta progresivamente de Este a Oeste, dando un elemento adicional para plantear un enriquecimiento de iones en sentido de flujo e interconexión hidráulica entre el acuífero formación Pereira con conductividades inferiores a $300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y los acuíferos locales, ubicados en el límite oeste del área, la formación Zarzal, con conductividades comprendidas entre 355 y $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y los aluviones del Cuaternario, con $550 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

3.2. Isotopía

Fueron realizadas 2 campañas de toma de muestras para análisis isotópicos en 2002 y 2003. La selección de los puntos en cada campaña obedeció a los resultados parciales encontrados en las campañas anteriores. De esta forma, en la primera campaña, el muestreo fue más general y se tomaron 52 puntos para medición de ^{18}O y ^2H , correspondientes a aguas subterránea de la formación Pereira con un cubrimiento areal uniforme (18 muestras), a los acuíferos locales Zarzal (2) y depósitos aluviales (5), manantiales (3), aguas lluvias (11 estaciones, distribuidas entre 930 y 4000 msnm) y aguas superficiales (11). Adicionalmente, se tomaron 10 puntos para análisis de ^{14}C distribuidos en los 3 acuíferos. Durante la segunda campaña, las muestras de agua subterránea se centraron en la formación Pereira (11), aguas superficiales (5) y las estaciones pluviométricas se redujeron a 6, distribuidas entre los 930 y 3950 msnm (período de marzo a diciembre de 2003). Además se obtuvo muestras de precipitación en las 6 estaciones de enero 2004 a marzo 2005.

En las Tablas 1, 2 y 3 se presentan los datos generales, parámetros físico-químicos y resultados de los análisis isotópicos de aguas subterráneas, aguas superficiales y lluvias.

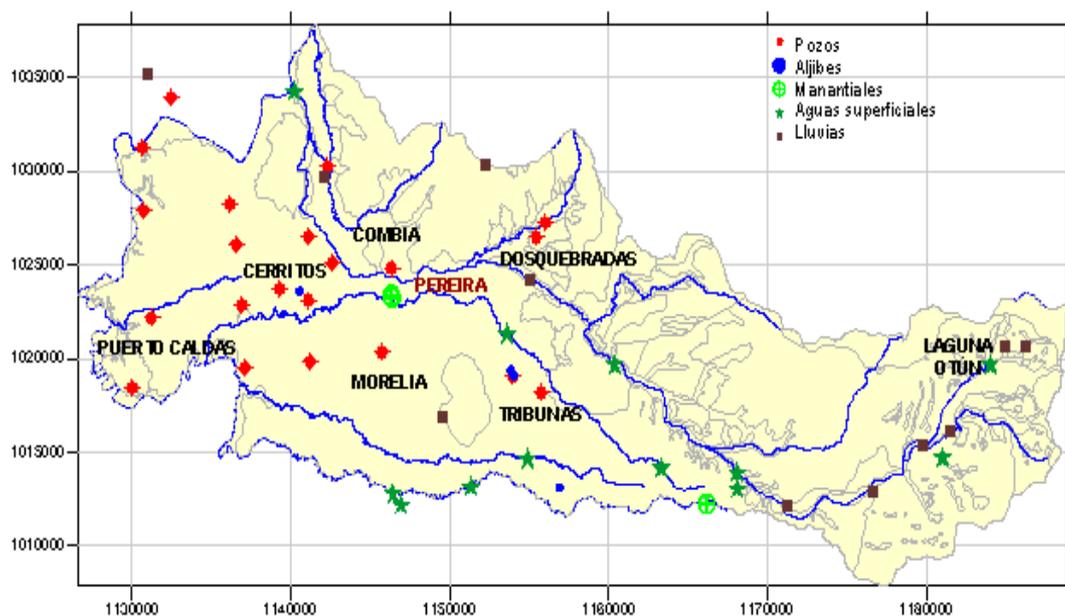


FIG. 6. Red de muestreo isotópico inicial.

TABLA 1. DATOS FÍSICO-QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Nombre sitio	Cota (m)	Fecha	C.E $\mu\text{S/cm}$	T	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰	^{14}C pCM	ERR	^{13}C ‰	^3H UT	ERR
Pozos Primera Campaña Formación Pereira												
Suzuki Motor	1217	29-Oct-01	205	24.2	6.4	-10.24	-74.40	95.8	0.48	-2.77		
La Marta	1150	29-Oct-01	210	26.7	6.37	-10.03	-72.48					
Marruecos	1120	29-Oct-01	180	25.9	6.11	-9.83	-72.53					
Colegio de La Salle	1210	31-Oct-01	340	23.5	7.63	-10.29	-72.85					
Santa María	1900	13-Nov-01	220	24	6.05	-9.63	-68.90					
Cipango	1619	14-Nov-01	175	21.5	7.5	-10.39	-72.99					
Sierra Morena	1560	14-Nov-01	125	22	6.48	-10.47	-75.34					
Granja El Pilamo	1100	22-Jan-02	160	23.6	6.46	-10.43	-75.28	94.6	0.46	-4.57	2.60	0.40
Motel Céfito	1631	23-Jan-02	137	21.2	6.43	-10.10	-73.21	91.2	0.46	-8.31	1.50	0.60
Club Campestre Internac.	1220	24-Jan-02	1009	22.7	7.68	-10.42	-75.36	52.5	0.3	-13.3	0.00	0.60
Finca Alabama	1330	25-Jan-02				-10.10	-70.86					
ISA	1172	07-Feb-02	229	26.5	6.64	-10.72	-77.65	83.3	0.42	-14.4	0.40	0.40
Villas de Toledo	1326	07-Feb-02	357	22.2	6.42	-10.26	-74.62	91.3	0.46	-12.5	1.60	0.60
Acued. Cerritos	1205	20-May-02	397	24.6	6.78	-10.40	-75.92					
Pozos Formación Zarzal												
Finca Sotará	1000	24-Jan-02	324	24.3	6.73	-10.71	-77.82	91.5	0.45	-7.85	0.00	0.40
Finca Santana	994	24-Jan-02	405	24.6	6.69	-10.69	-78.13	68.00	0.36	-12.1	0.00	0.60
Pozos Depósitos Fluvioacustre de Desquebradas												
La Rosa	1520	30-Oct-01	225	22.5	6.86	-10.42	-73.89					
C. Papeles de Rda.	--	30-Oct-01	260	22	7.54	-10.45	-72.86					
Pozos Aluviones del Cuaternario												
Hacienda Jaibaná	1189	06-Nov-01	395	27	6.94	-10.55	-76.10					
Acueducto Virginia	950	23-Jan-02	647	27.6	6.62	-9.75	-70.20					
Alen + Pro S.A	960	24-Jan-02	402	26.4	6.8	-10.57	-78.44	88.8	0.47	-5.1	0.30	0.40
Pozos Segunda Campaña Fm Pereira												
Granja El Pilamo	1100	29-Oct-03	159	25.4	7.08	-9.8	-70.2					
Suzuki	1217	30-Oct-03	200	24.3	6.72	-10.2	-72.9					
Finca Alabama	1330	18-Nov-03	151	24	6	-10.5	-73.6					
La Marta	1150	20-Nov-03	179	25	6	-9.88	-70.5					
Aljibes Primera Campaña												
Finca El Tigre	1110	13-Nov-01	435	24	7.83	-9.87	-69.58					
Finca Guayacanes	1589	05-Feb-02	44	21.1	5.31	-9.69	-68.72	55.9	0.33	-7.65	2.10	0.60
Santa Bárbara	1290	06-Feb-02	166	22.8	6.01	-10.04	-72.53					
La Graciela	1757	06-Feb-02	57	20.3	5.77	-9.94	-69.04					
Aljibes Segunda Campaña												
Finca El Tigre	1110	31-Oct-03	320	24.6	7.03	-9.55	-68.2					
Finca	1175	31-Oct-03	138	24.2	6.8	-10.1	-73.1					
Hacienda		31-Oct-03	169	23.9	6.3	-9.94	-71.1					
Trapiche/Gavilanes		31-Oct-03	160	26.9	7.2	-9.47	-73.5					
Finca Guayacanes	1589	20-Nov-03	42	22	5.2	-9.74	-67.3					
Finca El Cipres		27-Nov-03	52	23	5.5	-10.1	-69.6					
Finca Villa Maria		27-Nov-03	99	24	5.8	-9.68	-67.6					
Manantiales primera campaña												
Manantial No.2.		17-Sep-02	46	16.7	6.81	-9.99	-69.43					

Nombre sitio	Cota (m)	Fecha	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	T	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰	^{14}C pCM	ERR	^{13}C ‰	^3H UT	ERR
Manantial La Mielita		10-Sep-02	269	21.7	6.28	-9.81	-71.33					
Manantial Belmonte		10-Sep-02	210	21.3	6.14	-7.60	-56.79					

TABLA 2. DATOS FÍSICO-QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE AGUAS SUPERFICIALES

Nombre sitio	Cota	Fecha	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	T	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰
Aguas superficiales Primera Campaña							
Laguna del Otún. El mosquito		06-Sep-02	92	11.1	7.11	-13.41	-99.09
Río Otún. El Bosque		06-Sep-02	77	12.7		-13.06	-96.41
Río Otún. La Pastora		06-Sep-02	280	13.4	6.6	-13.20	-95.87
Río Otún. Puente antes de río Barbo		10-Sep-02	286	16.1	7.63	-12.74	-92.08
Río Otún. La Bananera		10-Sep-02	218	18.4	7.56	-11.91	-84.61
Río Otún. Estación Pereira		24-Sep-02	176	23.2	7.1	-10.44	-73.47
Río Consota. El Manzano		26-Sep-02	28	16.7	7.8	-10.03	-69.54
Río Consota. La Curva		25-Sep-02	90	19.5	7.7	-9.37	-64.80
Río Cestillal. Yarumal		27-Sep-02	41	19.7	7.6	-10.06	-70.52
Río Cestillal. Sucre		25-Sep-02	75	20.1	7.27	-9.48	-66.51
Río Barbas. San Carlos		26-Sep-02	59	19.7	7.8	-10.23	-71.94
Río Barbas. Bocatoma		17-Sep-02	39	15.2	7.06	-10.14	-70.49
Aguas superficiales Segunda Campaña							
Lago Suzuki Motor		30-Oct-03	40	26.2	7.01	-12.14	-88.9
Río Otun. Estacion Pereira	900	18-Dec-03	130	22	7.94	-10.87	-75.5
Río Otun despues Egoya	1263	18-Dec-03	153	20	7.68	-11.13	-77.2
Río Otun. Puente antes de río Barbo	1800	18-Dec-03	150	14	8	-12.55	-89.6
Río Otun. La Pastora	2690	18-Dec-03	183	12	7.8	-13.2	-95.1
Río Otun. El Bosque	3700	17-Dec-03	55	12.5	7.1	-13.15	-96.1

TABLA 3. DATOS FÍSICO-QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE LLUVIA

Nombre del sitio	Cota	Fecha	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	T	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰	Precipitación mm
Lluvias Primera Campaña								
Ingenio Risaralda	930	31-Oct-02	16	28.3	6.94	-12.77	-94.12	
Granja El Pilamo		31-Oct-02	11	24.2	7.5	-9.78	-71.05	
Granja La Catalina		31-Oct-02	11	23.1	7.5	-11.51	-83.21	
Planta de tratamiento	1450	12-Nov-02	9	21.2	6.92	-15.36	-113.24	
Las Hortensias		12-Nov-02	7	18.1	5.54	-13.45	-97.02	
El Cedral	2100	02-Nov-02	7	19	7.33	-12.43	-91.57	
La Pastora	2700	02-Nov-02	21	14.9	6.88	-13.73	-99.54	
Finca La Nevera	3200	07-Nov-02	61	11	6.68	-14.39	-106.03	
El Bosque		07-Nov-02	50	10.2	6.81	-13.39	-98.90	
La Laguna		08-Nov-02	45	10	6.9			
	3950					-11.40	-81.24	

Nombre del sitio	Cota	Fecha	C.E. μS/cm	T	pH	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	Precipitación mm
Santa Isabel		08-Nov-02	24	6.1	6.96	-14.51	-105.01	
Lluvias Segunda Campaña								
Ingenio Risaralda	930	01-Oct-02	13	20.4	6.88	-8.14	-56.2	137.00
Ingenio Risaralda		04-Apr-03	15	30.5	7.22	-4.5	-22.5	167.89
Ingenio Risaralda		06-May-03	13	28.2	6.92	-8.95	-62.8	261.23
Ingenio Risaralda		30-May-03	13	27	6.26	-11.86	-86	136.95
Ingenio Risaralda		18-Jul-03	12	27.1	5.45	-14.6	-108.8	281.52
Ingenio Risaralda		03-Sep-03	25	29.4	5.22	-10.26	-72.6	114.67
Ingenio Risaralda		30-Sep-03	48	26	4.98	-10.3	-73.9	91.30
Ingenio Risaralda		14-Nov-03	11	25.9	5.62	-13.1	-96.3	309.42
Ingenio Risaralda		05-Dec-03	13	17	6.46	-13.06	-95.3	202.39
Ingenio Risaralda		31-Dec-03	20	25	5.58	-7.86	-56.6	91.81
Planta de tratamiento	1450	04-Oct-02	9	21.2	6.92	-8.53	-58.2	267.00
Planta de tratamiento		20-Nov-02	18	22.8	7.54	-9.88	-69.3	74.00
Planta de tratamiento		04-Apr-03	17	20.6	5.98	-4.18	-20.9	231.30
Planta de tratamiento		08-May-03	8	21	7.53	-11.94	-87.1	238.40
Planta de tratamiento		30-May-03	28	22.1	7.12	-13.21	-96.6	153.69
Planta de tratamiento		18-Jul-03	11	21.4	7.21	-13.95	-102.5	187.68
Planta de tratamiento		08-Sep-03	10	22	5.67	-9.56	-64.6	110.57
Planta de tratamiento		30-Sep-03	41	21	4.77	-10.39	-70.7	120.72
Planta de tratamiento		14-Nov-03	15	22.5	5.31	-15.72	-116.2	226.23
Planta de tratamiento		05-Dec-03	9	23	7.07	-14.63	-103.4	169.90
Planta de tratamiento		31-Dec-03	28	23	5.47	-8.37	-57.2	65.94
El Cedral	2100	27-Mar-03	15	14.5	7.94	-5.77	-34.1	352.53
El Cedral		08-May-03	32	16.7	7.2	-7.89	-50.9	125.79
El Cedral		30-May-03	45	16.7	7.2	-11.52	-81.9	72.53
El Cedral		22-Jul-03	11	16	5.96	-14.55	-104.9	269.60
El Cedral		08-Sep-03	22	16	4.22	-9.05	-59.9	95.36
El Cedral		30-Sep-03	25	16.6	5.91	-12.49	-85.9	131.37
El Cedral		30-Oct-03	21	13.3	5.78	-15.66	-112.9	515.86
El Cedral		02-Dec-03	11	19	7.61	-15.05	-109.7	370.28
El Cedral		29-Dec-03	8	17	7.45	-8.99	-60.7	217.00
La Pastora	2700	30-Sep-02	49	16.9	6.5	-10.94	-80.7	87.00
La Pastora		27-Mar-03	29	16.3	7.07	-6.56	-39.7	170.43
La Pastora		08-May-03	34	15.4	7.15	-13.88	-99.8	289.13
La Pastora		30-May-03	35	16.5	8.46	-13.14	-94.9	106.52
La Pastora		22-Jul-03	23	16.1	6.31	-15.21	-110.7	142.53
La Pastora		08-Sep-03	55	7.4	6.86	-9.5	-63.5	118.18
La Pastora		30-Sep-03	19	15.6	6.57	-11.15	-76.2	48.18
La Pastora		30-Oct-03	25	15.2	6.74	-16.2	-117.1	248.55
La Pastora		02-Dec-03	13	17	7.47	-15.25	-110.4	235.86
La Pastora		29-Dec-03	30	16.5	7.21	-10.34	-71.6	84.37
Finca La Nevera	3200	31-Jul-03	3	8.4	7.44	-15.42	-112.3	23.07
Finca La Nevera		30-Oct-03	34	11.4	6.94	-15.81	-116.1	364.40
Laguna del Otun	3950	27-Mar-03	65	7.2	6.83	-7.93	-51.8	75.57
Laguna del Otun		31-Jul-03	64	8.8	8	-15.36	-113.4	516.37

Nombre del sitio	Cota	Fecha	C.E. μS/cm	T	pH	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	Precipitación mm
Laguna del Otun		30-Oct-03	54	8.5	7.09	-15.64	-114.4	368.46
Lluvias Tercera Campaña								
Ingenio Risaralda	930	28-Jan-04	32	25.5	5.14	-3.60	-16.90	63.65
Ingenio Risaralda		03-Mar-04	34	28.0	4.72	-3.13	-15.90	114.13
Ingenio Risaralda		01-Apr-04	27	28.3	5.89	-5.45	-31.00	82.96
Ingenio Risaralda		30-Apr-04	30	26.0	5.45	-6.78	-44.50	151.40
Ingenio Risaralda		02-Jun-04	24	25.8	5.84	-14.67	-110.10	285.18
Ingenio Risaralda		02-Jul-04	49	27.2	4	-10.77	-78.80	27.22
Ingenio Risaralda		02-Aug-04	32	28.5	5.97	-10.80	-73.30	173.50
Ingenio Risaralda		30-Aug-04	20	28.1	6.13	-6.63	-43.20	71.52
Ingenio Risaralda		19-Oct-04	17	25.4	4.41	-11.27	-78.30	278.98
Ingenio Risaralda		18-Nov-04	33	25.4	6.17	-12.82	-95.40	116.66
Ingenio Risaralda		17-Dec-04	15	24.1	5.61	-9.59	-66.30	236.63
Planta de tratamiento	1450	28-Jan-04	12	22.0	7.44	-5.78	-37.60	213.55
Planta de tratamiento		03-Mar-04	79	20.7	7.34	-7.26	-45.40	208.98
Planta de tratamiento		01-Apr-04	18	21.6	5	-4.31	-20.90	60.14
Planta de tratamiento		30-Apr-04	15	21.7	4.41	-4.41	-22.20	255.10
Planta de tratamiento		02-Jun-04	72	21.3	7.37	-14.70	-110.30	54.96
Planta de tratamiento		02-Jul-04	21	21.4	7.24	-9.65	-68.40	32.14
Planta de tratamiento		02-Aug-04	11	20.4	7.67	-10.21	-73.10	97.08
Planta de tratamiento		30-Aug-04	67	22.6	6.89	-6.38	-41.80	62.90
Planta de tratamiento		19-Oct-04	27	20.3	5.19	-10.62	-71.50	296.23
Planta de tratamiento		18-Nov-04	24	21.2	5.93	-11.42	-76.50	131.63
Planta de tratamiento		16-Dec-04	15	20.4	5.9	-9.90	-61.70	179.05
El Cedral	2100	01-Mar-04	13	16.5	6.15	-5.77	-30.80	198.33
El Cedral		02-Apr-04	39	15.7	4.86	-4.35	-21.10	142.60
El Cedral		30-Apr-04	18	16.3	6.71	-6.36	-38.00	172.14
El Cedral		03-Jun-04	7	15.2	5.3	-16.15	-120.40	194.40
El Cedral		19-Jul-04	14	16.2	4.66	-11.12	-77.90	124.44
El Cedral		14-Oct-04	10	14.7	4.86	-12.13	-84.70	429.53
El Cedral		18-Nov-04	9	16.1	4.47	-12.72	-91.10	525.00
El Cedral		16-Dec-04	32	14.2	4.74	-10.34	-69.90	76.08
La Pastora	2700	29-Jan-04	18	14	6.28	-6.34	-36.80	62.89
La Pastora		01-Mar-04	13	15.3	6.67	-6.33	-34.10	68.73
La Pastora		02-Apr-04	40	15.2	7.03	-3.66	-14.90	100.60
La Pastora		03-Jun-04	20	17	6.9	-14.36	-104.40	436.07
La Pastora		19-Jul-04	21	15	5.95	-11.70	-83.00	119.20
La Pastora		14-Oct-04	328	14.2	5.75	-15.51	-109.70	1093.11
La Pastora		18-Nov-04	33	14.8	5.48	-15.89	-116.40	1037.31
La Pastora		16-Dec-04	94	13.8	5.8	-10.35	-70.10	98.91
Finca La Nevera	3200	29-Jan-04	40	12	7.19	-7.32	-44.60	334.78
Finca La Nevera		03-Jun-04	48	11.4	7.05	-12.96	-92.40	558.96
Finca La Nevera		14-Oct-04	156	11.7	6.55	-10.59	-73.20	322.10
Finca La Nevera		16-Dec-04	43	9.6	6.54	-12.75	-91.50	588.40
Laguna del Otun	3950	29-Jan-04	20	8	7.07	-13.15	-92.60	415.94
Laguna del Otun		03-Jun-04	41	7.8	7.6	-16.05	-116.70	353.10

Nombre del sitio	Cota	Fecha	C.E. μS/cm	T	pH	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	Precipitación mm
Laguna del Otun		15-Oct-04	85	6.1	7.02	-11.16	-78.80	375.10
Laguna del Otun		16-Dec-04	32	6.6	6.51	-14.90	-101.20	537.68

3.2.1. Isótopos estables (²H, ¹⁸O)

3.2.1.1. Lluvia

Fueron evaluadas muestras de dos años (marzo 2003 hasta diciembre de 2004), pertenecientes a 6 estaciones pluviométricas, El Ingenio Risaralda, localizado al Noreste del área, con altura de 930 msnm, La Planta de Tratamiento a 1450 m, El Cedral a 2100m, La Pastora a 2700 m, La Nevera a 3200 m, y en la Laguna del Otún a 3950 msnm, localizada esta última cerca al límite Oeste del área de estudio.

Con las muestras de dos años se obtuvo una buena representación de la composición isotópica de la lluvia para definir una recarga teórica con la altura. Los valores de δ¹⁸O encontrados varían entre -3.2‰ y -16.2‰ vs SMOW y los de δ²H entre -16‰ y -117‰ vs SMOW. Como se observa en la figura 7, los puntos se localizan sobre la línea meteórica mundial con un exceso en deuterio comprendido entre 6‰ y 18‰, (media de 11.2‰).

Los resultados de análisis isotópicos muestran una clara relación con la altura y una variación en cinco estaciones ubicadas entre 930 y 3950 msnm, de -10.4‰ a -14‰ en δ¹⁸O (Figura 8a), con un gradiente altitudinal de -0.1‰/100 m. La estación La Nevera situada a 3200 msnm fue descartada del análisis debido a inconsistencias en los datos isotópicos.

3.2.1.2. Manantiales

Fueron tomadas 3 muestras de manantiales localizados cerca de los ríos Consota (2 muestras) y Barbas, con alturas de 1250, 1280 y 2133 msnm, respectivamente. Los valores obtenidos están entre -7.6‰ y -10.0‰ en δ¹⁸O y -57‰ y -71‰ en δ²H. El punto con una composición isotópica de -7.6‰ diverge fuertemente de los otros puntos, ya que a esta altura (1280 m), un punto relacionado con el acuífero, debería tener una composición entre -9‰ y -10‰ de ¹⁸O (Figura 7). Este último punto podría ser un error de medición.

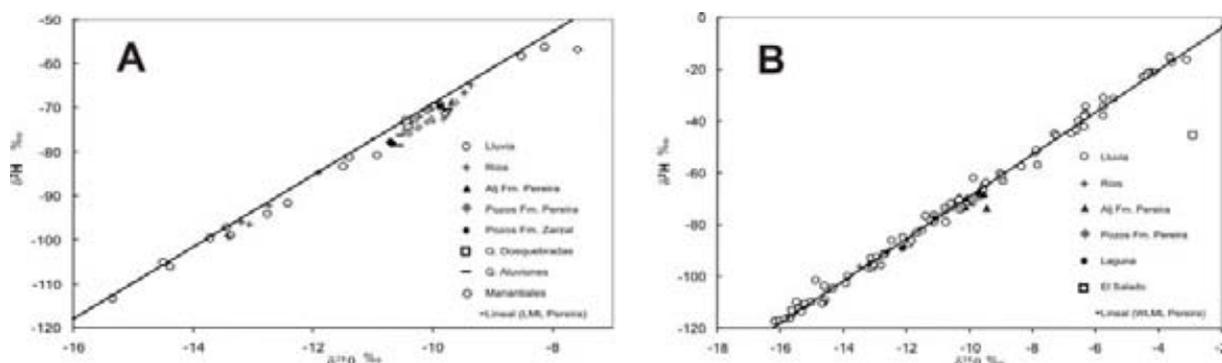


FIG. 7. Datos isótopos estables, primera (A) y segunda (B) campañas

3.2.1.3. Acuíferos

Los valores isotópicos de los acuíferos Pereira, Zarzal, aluviones del Cuaternario y depósitos fluviolacustres de Dosquebradas, están dentro de un mismo rango de composición isotópica, entre -9.5‰ y -10.7‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y -67‰ y -78‰ en $\delta^2\text{H}$. Los puntos están ubicados próximos a la línea meteórica local, con un exceso de deuterio inferior al observado para las lluvias.

Para los dos capas acuíferas de la formación Pereira (aparentemente no conectadas en la parte baja del acuífero) se observa una ligera diferencia en la composición isotópica. En el caso de los aljibes (nivel superior) se nota un enriquecimiento en $\delta^{18}\text{O}$ con valores entre -9.5‰ y -10‰ , lo que según el gradiente isotópico de altitud de $-0.1\text{‰}/100\text{m}$, sugiere que la zona de recarga de este nivel debe coincidir con toda la zona de afloramiento del acuífero (desde 950 a 1500 msnm), mientras que para el nivel inferior, ligeramente más empobrecido (-9.6‰ a -10.7‰), la recarga debe estar asociada a las partes más altas del acuífero (posiblemente a alturas entre 1200 y 1500 msnm) o a las zonas de contacto con la formación Pereira y con los macizos rocosos (Figura 8b).

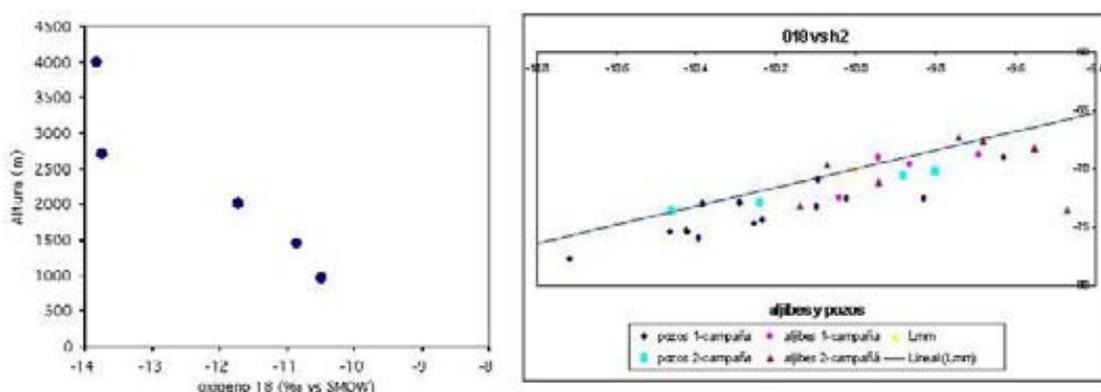


FIG. 8. a) Composición isotópica pondera de 5 estaciones de lluvia entre 930 y 3950 msnm. b) Relación ^{18}O vs. ^2H para aljibes (nivel superior) y pozos (nivel inferior) de la formación Pereira

3.2.1.4. Ríos y laguna Otún

Los valores isotópicos de las aguas superficiales presentan un mayor grado de dispersión que en el caso de acuíferos y menor que en el caso de las lluvias. Las variaciones están comprendidas entre -9.4‰ y -13.4‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y -65‰ y -99‰ en $\delta^2\text{H}$. Se puede explicar porqué los tributarios de un río son la lluvia y los acuíferos, entonces se debe tener una variación más ponderada de la composición isotópica. En estos puntos igualmente se nota una relación con la altura, aunque los valores no tienen representatividad temporal a mediano y largo plazo. Su variación isotópica depende evidentemente de la variación isotópica de la lluvia.

Los puntos están ubicados sobre la Línea Meteórica Mundial con un exceso de deuterio idéntico a las lluvias. El punto de la laguna fue interesante desde el inicio pues su valor isotópico es ponderado temporalmente, ya que los análisis de 1996 tenían una composición isotópica idéntica, próxima a -11.3‰ en $\delta^{18}\text{O}$. Por lo tanto, ya se podía intuir una altura media de infiltración entre 1000 y 2000 metros para una composición isotópica de -10‰ (media del acuífero), teniendo un gradiente posible de $0.1\text{‰}/100\text{m}$, que fue confirmado después (valor compatible en los Andes), ya que el punto representa la altura media de 4000 metros.

3.2.2. Isótopos radioactivos (^3H y ^{14}C) en las aguas subterráneas

Fueron realizados análisis de un punto del acuífero aluviones Cuaternario, dos puntos del acuífero Zarzal y siete del acuífero Pereira.

Tritio: No se detectó tritio en los 3 puntos de los acuíferos locales aluviones del Cuaternario y Zarzal, por lo que se les atribuye una edad superior a 50 años. De los 7 puntos del acuífero de Pereira, 5 tienen entre 1UT y 2.1UT, uno de ellos está en el límite de detección y el último punto no contiene tritio. Este punto corresponde a la anomalía química en Cl^- y Na^+ (Club Campestre Internacional). La presencia de tritio en la mayor parte de los puntos muestreados, indica que el agua de la formación Pereira tiene una componente de recarga reciente inferior a 50 años. Este hecho se verificó con la medida de carbono-14.

Carbono-14: Los resultados de carbono 14 parecen coherentes con los de tritio. El punto del acuífero de los aluviones del Cuaternario tiene una actividad de carbono-14 de 88.8% y los 2 puntos del acuífero de Zarzal entre 68pMC y 91.5pCM. Los 5 puntos del acuífero formación Pereira que presentan tritio, tienen valores de carbono 14 entre 91.2pMC y 95.8pCM, que muestran un componente de agua reciente (edad media con un modelo de decrecimiento sencillo entre 100 y 500 años). El punto al límite de detección del tritio está conforme con una actividad en ^{14}C de 83.3pCM. El punto de anomalía química (Club Campestre Internacional) presenta una actividad C-14 de 52.5pCM. En este punto se atribuía el incremento local de la conductividad y de las concentraciones de cloruros y sodio a la disolución local de sedimentos salados, lo que no debería influenciar la edad del agua. El ^{13}C de los bicarbonatos no muestra la posibilidad de mezcla con un carbono de origen mineral, por lo tanto, la única hipótesis válida hasta ahora para explicar los valores de ^{14}C de este punto es una mezcla con otra agua que estaría en contacto con el acuífero de la formación Pereira al nivel de una falla. Para clarificar este punto, aún se debe investigar la composición química de las aguas a una escala más regional.

El carbono-13 de los otros puntos de la formación Pereira está comprendido entre -14.3‰ y -2.8‰ vs PDB. Cuatro valores parecen lógicos con una hipótesis de carbono de origen biológico, gas del suelo a -20‰ (condición regional de cultivo de café - C_3). Pero en los pozos Granja el Pílamó y Suzuki, los valores están muy enriquecidos, con -4.6‰ y -2.8‰ respectivamente, más conformes con un gas del suelo a -12‰. La hipótesis de mezcla con un carbono de origen primario está a priori excluida en las condiciones ambientales que se tienen en la zona, rocas volcánicas y además el valor más enriquecido corresponde a una actividad en carbono-14 de 95.8pMC. Una visita de campo al pozo Granja El Pílamó indicó la presencia de una planta cultivada desde hace 14 años para la cría de gusano de seda y de un tipo de pasto. Los análisis taxonómicos realizados a ambos tipos de vegetación, indican que esta planta, conocida como Morera, pertenece a la especie *Morus Índica* de la variedad Camba-2 principalmente, clasificada taxonómicamente como de tipo C_3 . En el sitio existen otras variedades en menor número que se emplean como banco genético. El pasto sembrado en la zona en menor cantidad y hacia un costado del sitio de interés, corresponde al Pasto Estrella y al Pasto India, ambos clasificados como de tipo C_4 [9].

Para el segundo pozo (Susuki), que está ubicado cerca de una laguna, el nivel estático del agua está a tres metros de la superficie y el tipo de vegetación está constituido por hierba. Las condiciones parecen ideales para generar la presencia de gas en el suelo, del tipo C_4 (-10‰ a -12‰) y una contaminación de la laguna donde las condiciones del ciclo del carbono dependen directamente del CO_2 de la atmósfera (-7‰) [11].

Aunque no se tienen muchos puntos en los acuíferos Cuaternario y Zarzal, los resultados del tritio y ^{14}C muestran una diferencia entre el acuífero formación Pereira y los acuíferos de Zarzal y de los aluviones del Cuaternario. Para estos últimos, no se detectó tritio y el ^{14}C está entre 68pCM y 91.5pCM, lo que indica una recarga actual nula a muy débil. Seis puntos del acuífero de Pereira tienen tritio entre 0.5UT y 2.1UT, con ^{14}C entre 83pCM y 95.8pCM, la presencia de tritio muestra que el agua tiene una componente reciente inferior a 50 años [11].

4. Conclusiones

Con la aplicación de técnicas isotópicas se han obtenido importantes datos sobre el funcionamiento del acuífero de Pereira. Contrario a planteamientos anteriores, donde se suponía una recarga substancial desde las zonas montañosas en contacto con la Formación Pereira, entre 2500 y 3500 msnm, se ha definido que la recarga ocurre en la zona de afloramiento del acuífero, ya que los valores medios del mismo están entre -9.5‰ y -10.5‰ en $\delta^{18}\text{O}$, que según el gradiente isotópico de -0.1‰/100 m, definido con dos años de mediciones en 6 estaciones pluviométricas, corresponden a alturas teóricas no mayores a 1500 msnm.

Se encontró un ligero enriquecimiento isotópico en los aljibes con relación a los de pozos, que conforme al planteamiento de la existencia de dos niveles acuíferos, indicaría una zona de recarga común, aunque para el nivel superior estaría entre los 950 a 1500 msnm y para el nivel inferior la recarga se debe presentar en una parte más alta del acuífero (1200 a 1500 msnm), posiblemente en el contacto con los macizos o el acuífero en su parte alta es más heterogénea y con conexión entre las dos capas.

A través del análisis de isótopos radioactivos (^{14}C y ^3H) se evidenció la alta dinámica del acuífero de Pereira, encontrando un componente de recarga inferior a 50 años, mientras que para tres puntos medidos en los acuíferos Zarzal y depósitos Aluviales, la ausencia de tritio y la actividad más baja en ^{14}C implica un proceso de recarga más antiguo, con una recarga actual nula a débil y probablemente sin recarga directa por la lluvia. Este hecho sumado a los datos geológicos que muestran una interdigitación entre estas unidades, al aumento en la conductividad eléctrica en el sentido del flujo subterráneo, refuerzan la idea de una conexión hidráulica entre los acuíferos y un envejecimiento del agua en el sentido del flujo subterráneo (Este-Oeste). El escaso número de análisis, no permite hacer generalizaciones para la totalidad de los acuíferos Zarzal y Cuaternario.

Existen dos puntos con anomalía química y en ^{14}C en el nivel inferior de la formación Pereira, en un área muy limitada. Estos puntos tienen conductividad alta, son del tipo químico clorurado-sódico, con ausencia de tritio y una actividad de 50pCM de ^{14}C . Con los estudios realizados, aún no se tiene una respuesta satisfactoria sobre el origen del agua. La composición de isótopos estables no se ve afectada y la hipótesis de mezcla con un agua de mar residual no es posible, ni una disolución local de sal porque no tendría consecuencia sobre la actividad en carbono-14. La región tiene una alta densidad de fallas y presencia de aguas termales, que podrían ser una repuesta posible, aunque hasta ahora no se ha encontrado una composición química idéntica a esta agua.

Con base en los resultados obtenidos, CARDER, ha avanzado en el conocimiento del acuífero, para definir el funcionamiento de las dos capas en términos de flujo de agua, el cálculo del potencial de reservas, la delimitación más precisa de las zonas de alimentación del acuífero y la búsqueda de respuestas al origen del agua en los sitios anómalos, tareas contempladas en el Plan Operativo 2005-2006. Igualmente, la alta dinámica evidenciada en el acuífero de Pereira, que puede traducirse en una mayor sensibilidad a afectarse por agentes contaminantes dispuestos en superficie, enfoca la gestión de la Corporación al ajuste e implementación de instrumentos técnicos, legales y administrativos, eficaces para la preservación la calidad de agua del acuífero.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto para la formulación del Plan de Manejo Integrado de las Aguas Subterráneas en Pereira se realizó gracias al apoyo técnico, donación de equipos y financiamiento de capacitación del personal de CARDER. por parte del OIEA, a la coordinación técnica del INGEOMINAS y al apoyo de entidades como el MAVDT, IDEAM y CARs participantes por Colombia en el proyecto regional RLA/8/031.

REFERENCIAS

- [1] DANE, Recuento de Viviendas, Hogares y Unidades Económicas - Pereira-Dosquebradas - La Virginia: Una Oportunidad para el Desarrollo Integral del Área Metropolitana Centro-Occidente, DANE, (2004),
http://200.110.101.8/Website/Recuento/Informe_final/Informe.pdf
- [2] CARDONA, F. y ORTIZ, M., Aspectos estratigráficos de las unidades del Plioceno - Holoceno entre Pereira y Cartago. Propuesta para la definición de la Formación Pereira. Tesis de Grado. Universidad de Caldas - CARDER. (1993).
- [3] ARIAS, G.F., Geología y Geomorfología, Plan de Manejo Integrado de Aguas Subterráneas, Informe Técnico, CARDER, Pereira, (2004), 52 pg.
- [4] GUZMÁN, J., FRANCO, G., y OCHOA, M., Evaluación Neotectónica. Plan de Acción Ambiental Pereira Centro Occidente. Proyecto para la Mitigación de Riesgo Sísmico, CARDER, (1998).
- [5] ARIAS, G.F., Evaluación Hidrogeológica para el Área de Dosquebradas-Risaralda, Tesis de Grado, Universidad de Caldas-CARDER, Manizales, (1993)
- [6] ARIAS, G.F., Geoeléctrica, Plan de Manejo Integrado de Aguas Subterráneas, Informe Técnico, CARDER, Pereira, (2004), 84 pg.
- [7] VALDES, E. y DURAN J.P., Reproceso de Información Gravimétrica en 170 puntos del Estudio Geofísico: Proyecto de Mitigación de Riesgo Sísmico de Pereira, CARDER, Pereira, 2004
- [8] GEOEX Ltda., Georreferenciación y Rotulación de Puntos de Agua Subterránea, Plan de Manejo Integral de Aguas Subterráneas en Pereira, CARDER, Pereira, (2004).
- [9] CARDER, Informes de avance del proyecto: Plan de Manejo Integrado del Agua Subterránea en Pereira, Proyecto RLA/8/031, OIEA, 2001-2004
- [10] VELEZ, M.E, ARIAS G.F, TAUPIN, J.D, VARGAS M.C, Primeros Resultados Hidrogeológicos e Hidrogeoquímicos del Acuífero de Pereira (Colombia). XXXIII IAH Congress y VII Congreso ALHSUD, Zacatecas, México, 11-15 Octubre de 2004.
- [11] TAUPIN, J.D., Informes de Misiones a Colombia, Manejo de los Recursos Subterráneos, Proyecto RLA/8/031, OIEA, 2002-2004.

Estudio Hidrogeológico con Énfasis en Hidrogeoquímica del Acuífero Morroa (Colombia)

H.M. Herrera^a, M.C. Vargas^b, J.D. Taupin^c

^a Corporación Autónoma Regional de Sucre, CARSUCRE,
Sincelejo, Sucre, Colombia

^b Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS,
Bogotá, Colombia

^c Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Quito, Ecuador

Resumen: El acuífero multicapa de Morroa está compuesto por areniscas y conglomerados parcialmente consolidados intercalados con niveles limosos, de edad pliocena. Constituye la principal fuente de abastecimiento en esta región, caracterizado por un clima seco tropical. El flujo regional en el acuífero es la dirección NW-SE, se ha modificado durante los últimos 50 años en los principales centros urbanos. En relación con la hidroquímica, se distinguen dos tipos de aguas, bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas, que es resultado de intercambio de Ca^{++} por Na^+ presente en las arcillas, ligado al tiempo de residencia del agua. Los isótopos estables del agua (^{18}O y ^2H) presentan uniformidad en todos los cuerpos de aguas subterráneas y son similares a la media ponderada de la composición isotópica de la precipitación en la zona de estudio. La mayoría de las muestras en las que se ha medido el ^{14}C muestra un tiempo de residencia del agua comprendido entre 800 y 5000 años, por lo que la posibilidad de recarga reciente está limitada a unas pocas zonas, lo que se confirma con la escasa tasa de infiltración obtenida mediante el método clásico de balance hídrico. Esto ha forzado la reconsideración de la estrategia actual de uso de este recurso.

Abstract. The multilayer aquifer of Morroa is composed of sandstone and partially consolidated conglomerates interbedded with silt layers of Pliocene age. This aquifer constitutes the main source of water supply in this region, characterized by a dry tropical climate. The regional flow of groundwater in this aquifer is NW-SE, modified by the intensive exploitation experimented during the last 50 years in the main urban centers. Regarding hydrogeochemistry, there are two types of groundwater, calcium bicarbonate and sodium bicarbonate, as a result of ion exchange processes, Ca^{++} by Na^+ present in clay minerals; linked to the residence time of groundwater. Stable isotope contents (^{18}O y ^2H) show great uniformity in the whole groundwater, and are similar to the weighted annual isotope composition of precipitation in the study area. The majority of water samples analyzed for ^{14}C shows a residence time of groundwater ranging from 800 to 5000 years; recent recharge is limited to few areas as confirmed by the low infiltration rate obtained with the classical measurement of water balance. This results force to re-evaluate the current strategy of water use.

1. Introducción

La principal fuente de abastecimiento de agua de los habitantes del departamento de Sucre es el agua subterránea, la cual es captada por medio de pozos profundos, pozos artesanos y manantiales. El acuífero de Morroa constituye la fuente de abastecimiento de agua potable más asequible para una población de aproximadamente 500.000 habitantes de las zonas urbanas y rurales de los Municipios de Ovejas, Los Palmitos, Morroa, Corozal, San Juan de Betulia, Sincelejo y Sampués.

A comienzos del año 2000 CARSUCRE identificó los dos principales problemas que tiene el acuífero Morroa: la sobreexplotación y el peligro de contaminación por actividades antrópicas. Lo primero se

determinó por el descenso continuo del nivel del agua en los pozos, el cual registró en el año 2001 una tasa de descenso de 4 m/año en la mayoría de los pozos y en el año 2003 de hasta 17 m/año, poniendo en serio peligro la sostenibilidad del recurso. Con respecto a la contaminación el acuífero, éste presenta una vulnerabilidad de media a alta y se han detectado varias fuentes potenciales de contaminación sobre la zona de recarga como: vertimientos de aguas residuales en algunos arroyos que atraviesan la zona de recarga (Arroyo Grande de Corozal y Arroyo Morroa); pozos abandonados sin sellar o inadecuadamente sellados, disposición inadecuada de residuos sólidos; desarrollo urbanístico en las zonas de recarga del acuífero (los cascos urbanos de los Municipios de Ovejas, Los Palmitos, Corozal, Morroa, Sincelejo y Sampués); estaciones de gasolina y cementerios; y actividades agrícolas y ganaderas.

Esta problemática se debió en parte al manejo no planificado de la explotación que se venía haciendo en el acuífero; actualmente CARSUCRE a través del Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas “PPIAS” y en concertación con los actores claves del proyecto han formulado el Plan de Manejo del Acuífero con el fin de garantizar la sostenibilidad de este recurso hídrico. Para lograr este objetivo la Corporación ha contado con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica “OIEA”, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial “MAVDT”, el Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS, el Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, la Gobernación de Sucre, la Universidad de Sucre y el Municipio de Morroa.

2. Generalidades

2.1 Localización del área de estudio

El Departamento de Sucre se encuentra localizado en la parte nor-occidental de Colombia, en la región de la Costa Caribe. El área de estudio está localizada en la parte central del Departamento y comprende los Municipios de Ovejas, Los Palmitos, Corozal, Morroa, Sincelejo y Sampués; tiene un área total de 1120 km², ubicada dentro de las coordenadas geográficas $Y_1=1'500.000$, $Y_2=1'540.000$, $X_1=846.000$ y $X_2=880.000$.

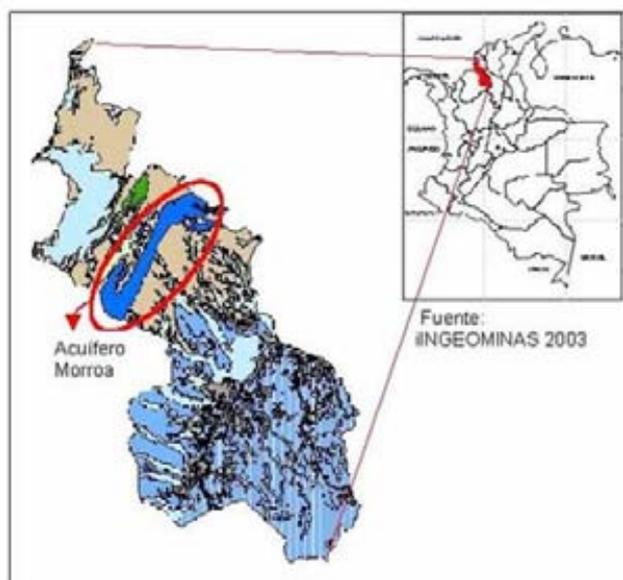


FIG. 1. Localización de la zona de estudio.

2.2. Hidrología

Hidrografía. La red hidrográfica del área de estudio está conformada por un sistema de corrientes superficiales temporales (sólo llevan agua en las épocas de lluvia). Las corrientes que tienen agua perenne, es porque llevan aguas residuales domésticas e industriales, como el Arroyo Grande de Corozal, el cual recibe las aguas negras de Los Municipios de Sincelejo, Corozal y Morroa; el Arroyo Caracolí, sobre el cual se vierten las aguas residuales del Municipio de Los Palmitos; el Arroyo Canoas, donde se vierten las aguas negras del Municipio de Sampués; y el Arroyo Mancomojan que lleva las aguas residuales del Municipio de Ovejas. Todos estos arroyos, atraviesan la zona de recarga del Acuífero Morroa.

Información hidroclimática. El clima es típico de una formación alternativamente húmeda y seca, con alternancia de bosques secundarios, pocos relictos de bosque primario, matorrales y dominantes áreas de pastizales. La temperatura promedio en la zona es de 28°C y la precipitación anual es de 1000-1200 mm. Según Holdridge, citado por De La Ossa (1998) [1]; se cataloga como bosque seco Tropical (bs-T), perteneciente al sistema Bioma Azonal de Tierras Bajas (Pedobioma de Sabanas), con formaciones climáticas de piso Isomegatérmico”.

Precipitación. La zona presenta una precipitación media de 1056 mm anuales, la cual se distribuye en forma irregular durante los meses del año. Se distinguen dos épocas climáticas en el año: una seca de diciembre a marzo y otra lluviosa de mayo a octubre, con un pequeño veranillo en junio y julio.

2.3. Demanda

Para determinar la demanda de agua de la población que se abastece del acuífero Morroa, se tomó como referencia las proyecciones de población realizadas por el DANE entre los años 1995 y 2005 y el censo de las comunidades rurales que se abastecen del acuífero Morroa, realizado por FINAGUAS en el año 2002. Con base en las proyecciones se determinó la demanda según lo exige “El reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico”[2].

De esta manera se obtiene que la demanda de agua total en todo el acuífero Morroa es $1340 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, mientras que la demanda de agua en el área crítica, conformada por el campo de pozos de Sincelejo, Corozal, Morra y San Juan de Betulia, es $1057 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ equivalentes a un 78.9% de la demanda total.

2.4. Oferta hídrica

El sector más crítico del acuífero Morroa se encuentra en la zona del campo de pozos de los acueductos de los municipios de Sincelejo, Corozal, Morroa y Betulia; Esta zona tiene un ancho promedio de 7 km. y se extiende desde el sur de los Palmitos hasta el norte el corregimiento de Don Alonso a lo largo de 19 km., ocupando una superficie de 131 km^2 aproximados.

Para calcular la oferta hídrica en este sector del acuífero Morroa se calcularon las reservas elásticas y de almacenamiento de cada una de los niveles acuíferos, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: Tanto los niveles acuíferos como el buzamiento que presentan cada uno son continuos y constates; debido a que los resultados isotópicos, de infiltración y permeabilidad y balances hídricos, indican una recarga muy baja ($7 \text{ a } 34 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$), se consideró una recarga nula; se toma como referencia el coeficiente de almacenamiento para cada capa, el calculado en los pozos que característicamente captan cada una estas; el espesor promedio de las capas permeables y la porosidad se tomó de los informes presentados por FINAGUAS y CARSUCRE (2001) [3]; no se tuvo en cuenta el posible goteo a partir de las capas semipermeables que separan los niveles acuíferos y el goteo desde la Formación Betulia suprayacente. Y se asumió una franja lateral de 3,5 km. hacia el este desde el afloramiento del nivel A; no obstante por obvias razones toda esta cantidad de agua almacenada no se puede extraer, por lo que se estima que el máximo nivel dinámico que se pueda alcanzar no debe sobrepasar los 200 metros para que la explotación del acuífero sea técnica, económica y ambientalmente posible. De esta manera se calcularon para esta zona, unas reservas totales de $3.286'260.188 \text{ m}^3$ y unas reservas explotables de $719'691.835 \text{ m}^3$ [4].

3. Geología del area de estudio

En el Departamento de Sucre afloran rocas sedimentarias y sedimentos no consolidados de origen marino, transicional y continental, con edades que van desde el Cretáceo Superior al Cuaternario. En la zona de estudio la principal Formación que aflora es la Formación Morroa la cual suprayace a la Formación Sincelejo Superior e infrayace a la Formación Betulia (Figura 2).

3.1. Formación sincelejo.

Aflora en la zona central y occidental del área de estudio, conformando un sistema de colinas alargadas en dirección noreste, de topografía abrupta, con pendientes muy fuertes y vertientes cortas; son comunes los caballetes. Esta formación se compone de dos conjuntos principales que son:

FORMACIÓN SINCELEJO INFERIOR (TPSI). En la parte occidental y norte se encuentra conformando los flancos de un pliegue anticlinal y en la parte central el núcleo del anticlinal de Sincelejo. “Litológicamente consta de un conjunto de areniscas arcillosas “sucias” con cemento arcilloso-calcáreo, capas conglomeráticas y un conjunto arcilloso”[5]

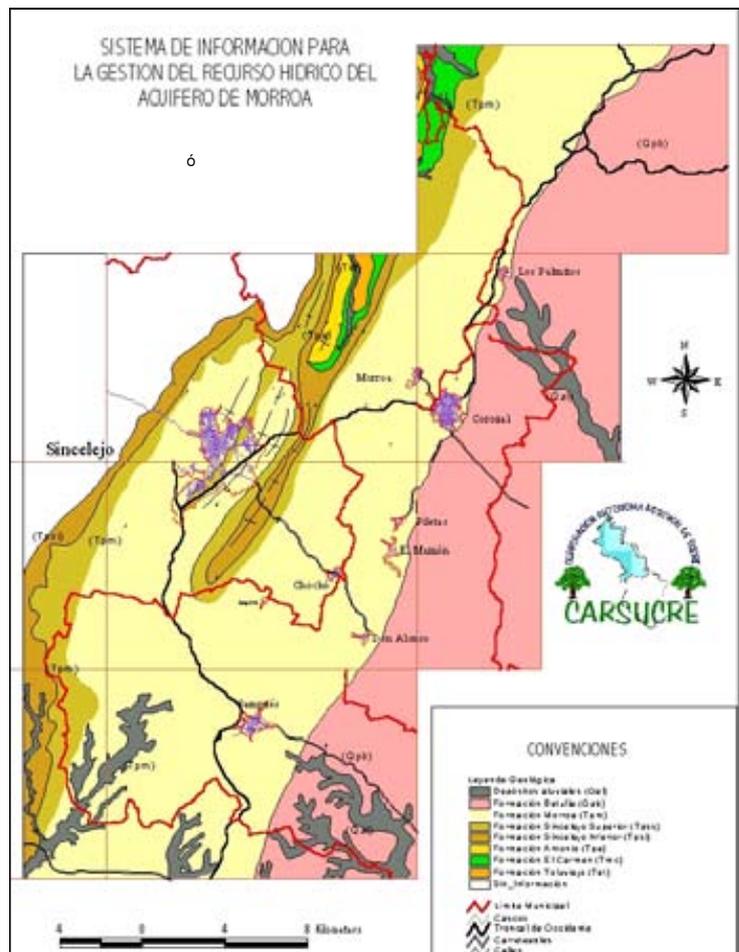


FIG. 2. Mapa geológico de la zona.

FORMACIÓN SINCELEJO SUPERIOR (TPSS). Está conformada “por una serie de areniscas micáceas de grano fino a medio, poco cementadas con cemento arcilloso, alternando con areniscas conglomeráticas compuestas por cantos de liditas y cuarzo, mejor cementados, donde el cemento calcáreo es dominante” [6].

Estructuralmente esta formación se encuentra suprayaciendo la Formación Sincelejo Inferior e infrayaciendo la Formación Morroa; conformando los flancos de los pliegues anticlinales y sinclinales que afectan a formaciones de origen marino más antiguas (Formaciones Toluviejo, Tet, y El Carmen, Tmc). Es muy característico el gran control estructural que presenta por lineamientos y fracturas. Al igual que la Formación Sincelejo Inferior es muy pobre en cuanto a producción de agua, la cual generalmente es de regular calidad físico-química.

Recientemente, Clavijo y Otros (citados por Barrera [7]), proponen dividir la Formación Sincelejo en un Miembro Inferior que incluye el Sincelejo Inferior y Superior de Kassem y un Miembro Superior que incluye la Formación Morroa.

A la Formación Sincelejo se le ha asignado con base en fauna, una edad Mioceno superior-Plioceno [8] y Plioceno Superior alto [9].

3.2. Formación morroa o miembro superior de sincelejo (TPM).

Aflora en toda la zona de estudio, formando una franja amplia y alargada que se extiende en dirección N 10° E, con un promedio de 3 km de ancho. Es sobre esta formación que se encuentran localizada las cabeceras municipales de Sincelejo, Corozal, Morroa, Los Palmitos, Ovejas y Sampués. Se caracteriza por presentar una topografía ondulada formada por un sistema de colinas bajas alargadas, de pendientes suaves a moderadas y vertientes cortas, alternando con valles pequeños poco profundos. Litológicamente esta formación está constituida principalmente por “capas de areniscas friables y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales”[10]. Estructuralmente se encuentra conformando un gran monoclinal con rumbo N 25° E y buzamientos variables desde 5° a 20° al SE. El buzamiento aumenta hacia la base, a medida que se acerca al contacto con la Formación Sincelejo Superior, a la cual suprayace aparentemente en forma discordante.

3.3. Formación betulia (Qpb)

Aflora en la parte oriental del área de estudio, y se encuentra suprayaciendo en aparente concordancia a la Formación Morroa. Se caracteriza por presentar colinas muy suaves de poca altura con topografía plana a ligeramente ondulada que descienden ligeramente hacia el sureste, morfología típica de las Sabanas de Sucre. Litológicamente está constituida por una secuencia monótona de arcillas abigarradas con intercalaciones de arcillas arenosas, arcillas con gravas y delgadas capas y lentes de arenas arcillosas. INGEOMINAS [8], ha propuesto subdividir la unidad en un conjunto arcilloso hacia la base y un conjunto arenoso hacia la parte superior.

3.4. Depósitos aluviales (Qal)

Se localizan a lado y lado de los principales arroyos de la zona; en general son de poco espesor y están formados por arenas sueltas, gravas, arcillas y limos, producto de la sedimentación detrítica de estas corrientes. El principal depósito aluvial es el de los Arroyo Corozal, Canoas (al sur) y Mancomoján (al norte), que atraviesa una parte de la zona de recarga del acuífero.

Se caracterizan por una serie de arenas mal gradadas, con intercalaciones de arcillas con espesores que varían entre 0 y 15 metros.

4. Hidrogeología

4.1 Generalidades

El acuífero de Morroa, es un acuífero complejo, continuo y de extensión regional, constituido por capas semiconfinadas y confinadas de areniscas y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas, producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces aluviales. Estructuralmente este acuífero se encuentra dispuesto en forma monoclinal con dirección general N 25° E y buzamientos entre 5° y 20° hacia el oriente (Figura 3). Tiene un espesor variable de hasta 500 m y se han calculado transmisividades entre $7.5 \text{ m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$ y $603 \text{ m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$ [8], conductividades hidráulicas entre $4 \text{ m} \cdot \text{día}^{-1}$ y $12 \text{ m} \cdot \text{día}^{-1}$ [4] y coeficientes de almacenamiento del orden de 1.1×10^{-3} y 1.1×10^{-4} .

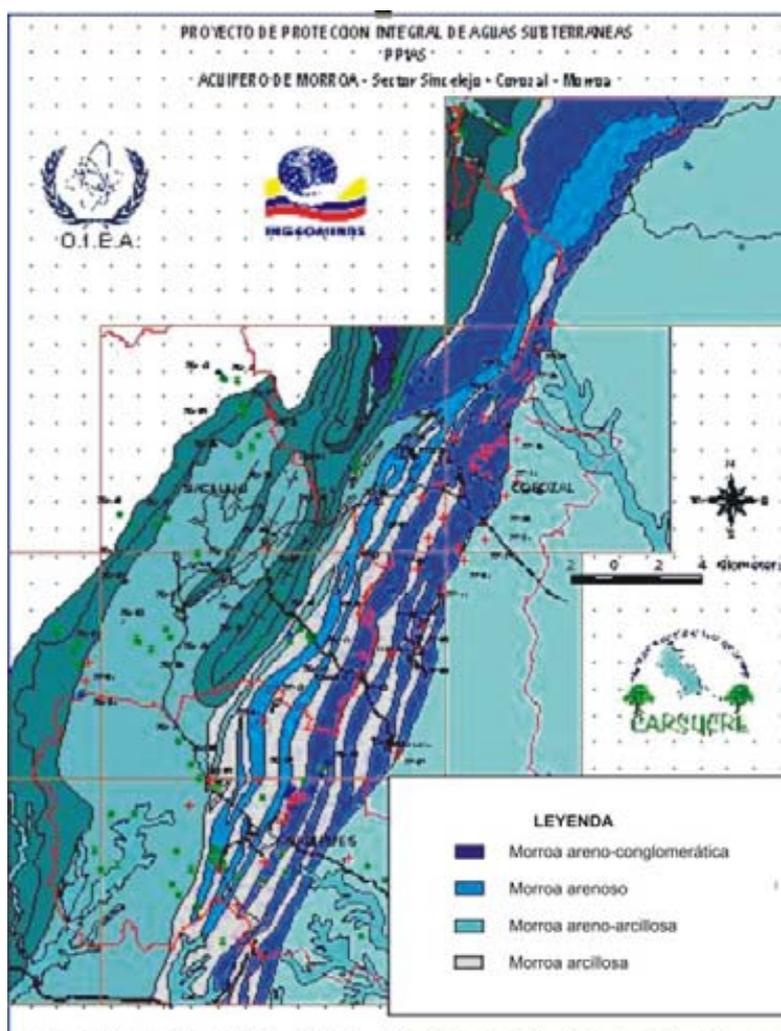


FIG. 3. Mapa hidrogeológico.

El agua de este acuífero es considerada apta para el consumo humano, de acuerdo a las normas establecidas por el Ministerio de Salud en el Decreto 1594/84 y se han clasificado como aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas [11]. Según los resultados de los estudios realizados por CARSUCRE [3], la explotación del acuífero de Morroa, en el sector de Sincelejo, Corozal y Morroa, es muy intensa y se ha concentrado en una zona específica (campo de pozo de Corozal). Actualmente en esta área, existen 37 pozos profundos activos, 7 inactivos y 36 abandonados con

profundidades entre 150 y 400 m, los cuales, extraen caudales entre 5 y 60 L·s⁻¹, para un caudal total de extracción de 650 L·s⁻¹, con un régimen de bombeo de 24 horas continuas. Los niveles estáticos se encuentran entre 50m y 85m de profundidad y los niveles de bombeo entre 80m y 120m. El descenso promedio de los niveles estáticos medidos dentro de los pozos está entre 4 m·año⁻¹ y 15 m·año⁻¹.

Teniendo en cuenta la descripción hidrogeológica de la Formación Morroa, realizada por el INSFOPAL [5], el estudio hidrogeológico realizado por el INGEOMINAS [11], las tesis de grado desarrolladas por estudiantes de la Universidad de Sucre, los estudios hidrogeológicos realizados por consultores particulares, FINAGUAS, la información de las perforaciones, se subdividió el Acuífero de Morroa en cuatro grupos principales: Morroa Areno-conglomerática: la conforman los niveles acuíferos A y B; Morroa Arenosa: corresponde con los niveles acuíferos C y D; Morroa Areno-arcillosa: constituida por los niveles E y F; Morroa Arcillosa: la conforman las capas y lentes de arcilla que separan los niveles acuíferos de la formación.

4.2. Balance hídrico

En el acuífero Morroa se han realizado varios balances hidrológicos sencillos, teniendo en cuenta la precipitación, la escorrentía y la evapotranspiración. De todos estos parámetros la precipitación es el que tiene más datos y de mayor confiabilidad. Aunque no se tienen mediciones directas de la escorrentía, se han hecho buenas aproximaciones teniendo en cuenta la topografía y el tipo de suelos. La evapotranspiración es el parámetro más difícil de calcular y en los balances presentados se ha determinado a partir de los datos de evaporación, humedad relativa, temperatura, velocidad del viento, de la estación del Aeropuerto de Corozal y aplicando diferentes fórmulas, como la de García López, Tornethwaitwaite y Turc.

El INSFOPAL [5], reporta para la cuenca del Arroyo Corozal en un área de 702 km², una infiltración eficaz de 34 mm. INGEOMINAS [8] hace el balance hídrico para varios tramos del acuífero Morroa y calcula una recarga para el sector de Chochó – Morroa – Corozal de 59.3 mm·año⁻¹. Para FINAGUAS [3] la recarga calculada a partir de un balance hidrológico sencillo es de 39.8 mm·año⁻¹.

Como resultado del trabajo realizado en el Taller sobre Recarga de Acuíferos, realizado en Cali en abril del 2003, se hizo una modelación para determinar la recarga del acuífero, utilizando el software HYDRUS-1D Versión 2.0. Para esta simulación se introdujeron datos diarios de precipitación y evaporación de 10 años, datos de la textura de los materiales encontrados en un apique y completados con los datos de la perforación de un piezómetro. Los resultados obtenidos indican que la recarga en el punto considerado durante los 10 años fue 70 mm/año. Rodríguez et al. [9], calcularon para once puntos sobre la zona de recarga del Acuífero de Morroa infiltraciones lentas a moderadamente rápidas. Generalmente los 20 primeros cm del suelo están muy compactos por mal manejo de la tierra con prácticas agrícolas y ganaderas inadecuadas.

Cuando se compara la cantidad de agua que se extrae actualmente en el acuífero con los datos de recarga calculados en la zona de Sincelejo, Corozal y Morroa, se evidencia claramente la intensa explotación a que está actualmente sometido el acuífero, lo que explica los descensos continuos en los pozos.

4.3. Red de monitoreo

Con la asesoría del Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear, INGEOMINAS y un experto del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, se diseñó la red de monitoreo para el acuífero de Morroa, con el fin de hacer seguimiento a los niveles del agua del acuífero y a la calidad del mismo.

Lo que se pretende con esta red de monitoreo es obtener una serie histórica de datos de niveles y de calidad del agua, que permitan conocer las variaciones temporales y espaciales de la calidad del agua y del flujo del agua dentro del acuífero, y así, poder definir las acciones que se deben implementar a corto, mediano y largo plazo, para evitar el deterioro del recurso, tanto en calidad como en cantidad.

Esta red de monitoreo está compuesta por 13 piezómetros, seis de los cuales eran pozos abandonados que CARSUCRE habilitó como piezómetros y los otros siete fueron construidos por CARSUCRE; cuarenta y tres pozos de producción, y un totalizador de aguas lluvias, ubicado en el aeropuerto de Corozal.

Los piezómetros se han localizado de forma estratégica, de tal manera que sirvan para monitorear el acuífero tanto en sentido E-W como N-S y determinar la relación entre aguas superficiales y las aguas subterráneas, comprobar la existencia de aporte de aguas residuales del arroyo Grande de La Sabana al acuífero Morroa; determinar si hay aporte de lixiviados que se generan en el basurero de Corozal, el cual se encuentra sobre la zona más permeable del acuífero Morroa. Tanto a los pozos como a los piezómetros se les ha tomado muestras para análisis físico – químicos, de metales y de isótopos como oxígeno-18, deuterio, tritio y algunos de carbono-14; al agua lluvia de la estación meteorológica de Corozal, se le hizo análisis de oxígeno-18 y deuterio cada mes durante un año, con el fin de elaborar la Línea Meteórica Local.

4.4. Monitoreo de niveles.

Para el monitoreo de los niveles, la red la conforman 44 puntos, de los cuales 13 son piezómetros y 31 son pozos de producción debidamente instrumentados. En la Figura 4 se presenta el mapa de isoniveles de todos los puntos, incluyendo pozos y piezómetros y el mapa de la superficie del agua, utilizando los niveles de los piezómetros solamente.

Variación espacial de los niveles: Como puede observarse la dirección general del flujo natural del acuífero (NW-SE) ha sido modificado localmente por los pozos de bombeo, sobre todo en la zona del campo de pozos de Sincelejo, Corozal y Morroa. Esto evidencia la explotación intensiva del acuífero en esta zona. En el mapa de isoniveles del Nivel acuífero A (Figura 4), los pozos de bombeo también generan modificaciones a las líneas de flujo. En este mapa es interesante observar la zona de recarga que hay alrededor del piezómetro 52-II-B-PZ-01, generada posiblemente por los sistemas de riego que hay en las fincas de los alrededores.

Variación temporal de los niveles: el monitoreo continuo de los niveles a los pozos de producción, ha permitido calcular las tasas de descenso para períodos continuos de explotación de los pozos, y evidencian claramente cuál es el sistema de explotación más adecuado. En la Figura 5 se presenta la variación de los niveles del pozo 52-II-A-PP-15, durante un año de monitoreo, calculándose una tasa de descenso de 4 m/año.

En el caso del pozo 44-IV-D-PP-16 (Figura 5), puede notarse que mientras el pozo ha sido explotado con un régimen de bombeo continuo, los descensos son considerables, llegándose a calcular tasas de descenso de 17.2m y 20m por año. Es importante señalar que desde que este pozo se está explotando cíclicamente, con un régimen de bombeo de 18 horas/día, no se presentan descensos considerables.

4.5. Parámetros hidrodinámicos del acuífero morroa.

Se realizó en el piezómetro 44-IV-D-PP-22 un ensayo de dilución con marcado de toda la columna y un ensayo de dilución puntual, utilizando como trazador NaCl (Figura 6).

El flujo horizontal tiene magnitud de hasta $1.63 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$, lo que indica la alta conductividad hidráulica de la franja de acuífero que lo alimenta. La presencia de flujos verticales se debe a los diferentes niveles acuíferos que alimentan al pozo, además indica que estos tienen diferente confinamiento.

En presencia de flujo vertical en un pozo, la velocidad de ascenso o descenso se ve afectada por los diferentes tramos de filtros que tenga el pozo, entre más tramos tenga este el valor calculado de velocidad va a ser menor debido a la pérdida de trazador que se da en cada tramo. En caso de entrada de un agente contaminante al acuífero se podrá estimar el desplazamiento de este utilizando las velocidades halladas en estos ensayos.

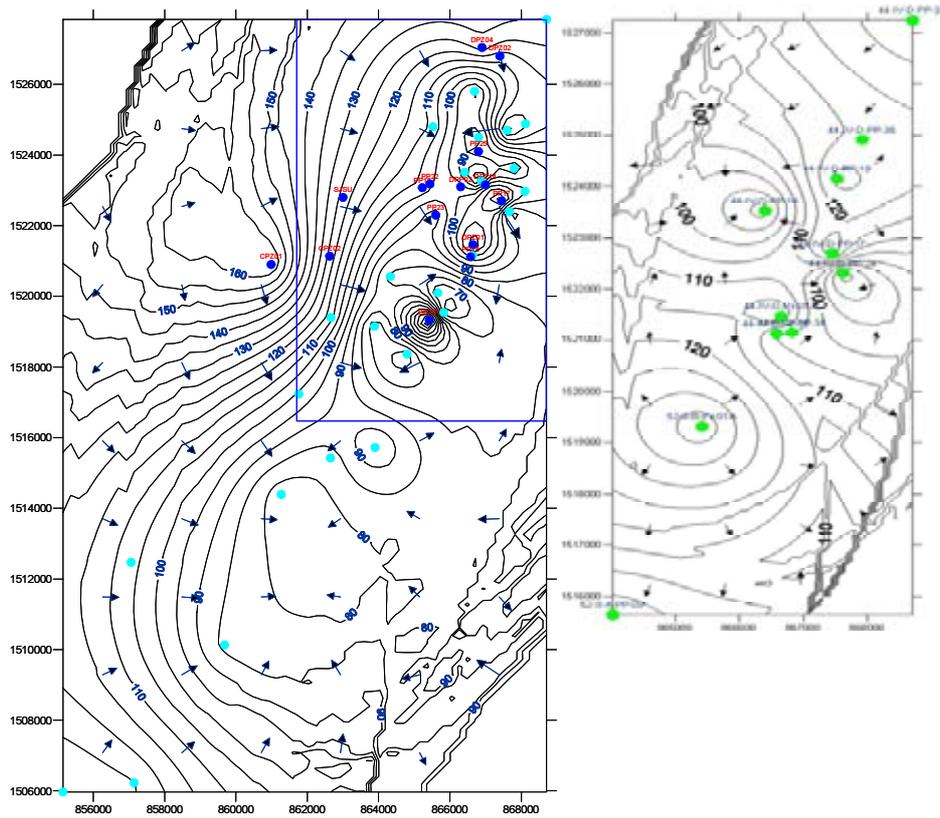


FIG. 4. Red de flujo del acuífero Morroa, en el campo de pozos del acueducto de Sincelejo y Coroza.

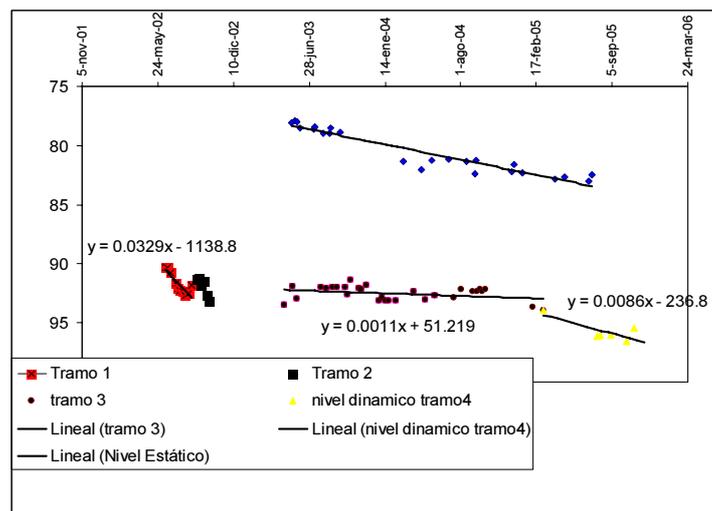


FIG. 5. Variación temporal de los niveles del agua en el pozo 44-IV-D-PP-16.

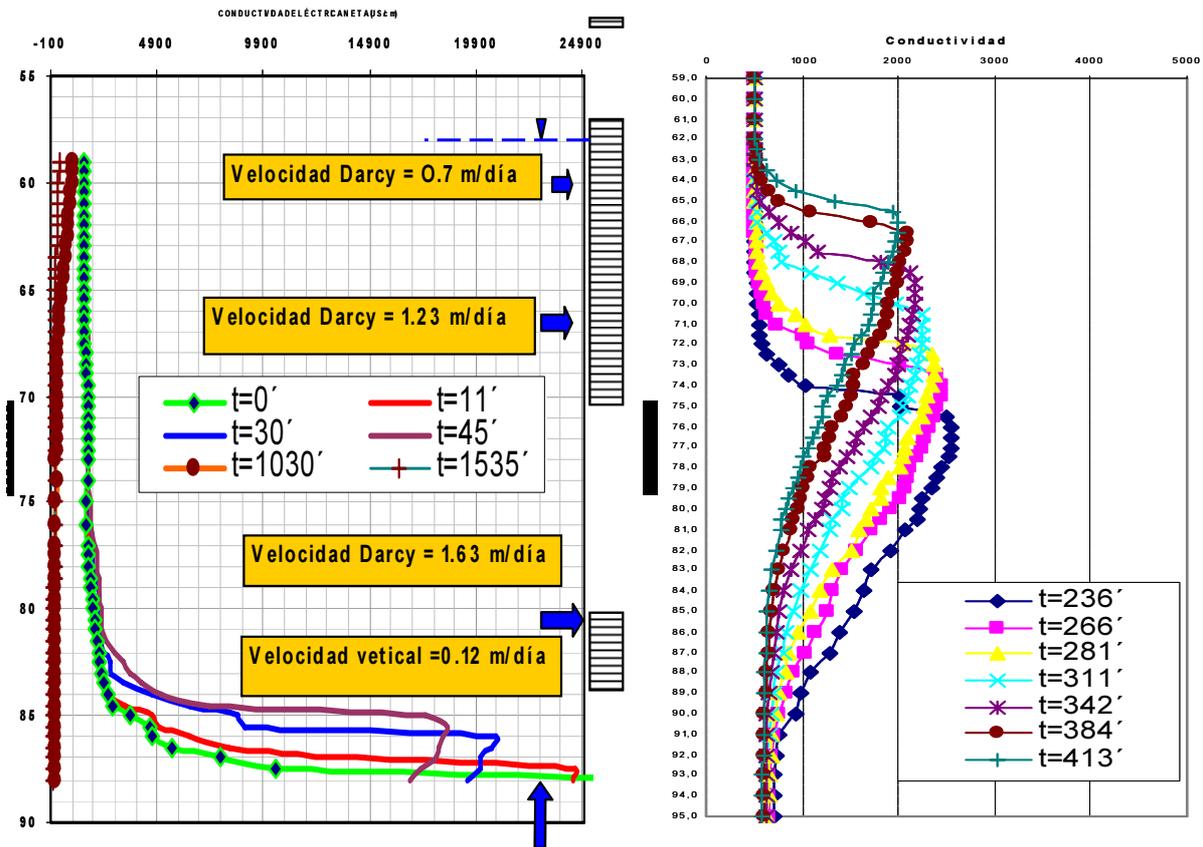


FIG. 6. Ensayo de dilución con marcado de toda la columna y de dilución puntual.

4.6. Monitoreo de la calidad del agua

Hasta el momento se han realizado dos campañas de monitoreo de calidad de agua en el acuífero Morroa, una a principios de abril del 2002 y otra en abril de 2003. En el capítulo siguiente se presentan los resultados y análisis de estos monitoreos.

5. Caracterización hidroquímica e isotópica

5.1. Hidroquímica

Los resultados de la primera campaña realizada en abril de 2002, muestran la existencia de dos grupos principales de agua, una bicarbonatada cálcica y otra bicarbonatada sódica. El proceso químico dominante en el acuífero es el intercambio iónico de Ca^{++} por Na^{+} (Figura 7). Es importante anotar que las aguas de la mayoría de los pozos de la zona de Corozal, Sincelejo y Morroa que captan aguas hasta los 120 m de profundidad son bicarbonatadas cálcicas y la de los pozos más profundos son bicarbonatadas sódicas. Sin embargo, esta relación no se cumple para los pozos de Ovejas (al norte), porque la granulometría es más gruesa con tiempo de residencia menores; ni para el sector de Sampués (al sur), debido probablemente a que se han alcanzado las condiciones de equilibrio.

5.2. Isótopos

La Línea Meteorica Local (LML) está cerca y paralela a la línea meteorica mundial de precipitación (Figura 8). La ecuación de la LML es: $\delta^{2}H = 8.3 * \delta^{18}O + 8.3$. Claramente puede observarse que existen dos grupos de agua, una que se encuentra sobre la línea meteorica local y otra que ha sufrido una ligera evaporación [15]. No se encontró ninguna relación entre $\delta^{18}O$ y la profundidad o la conductividad, esto se debe a que los pozos muestreados están captando niveles diferentes del acuífero, es decir que hay una mezcla de aguas.

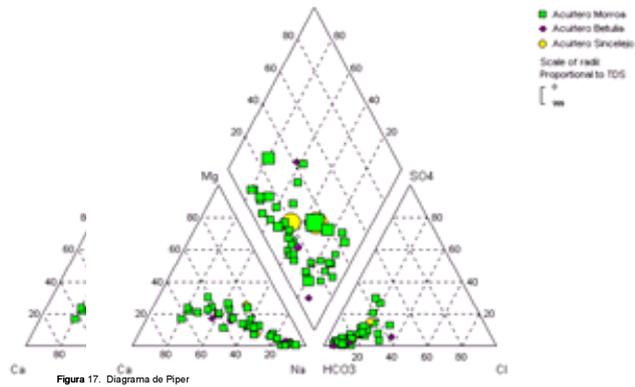


FIG. 7. Diagrama de Piper de las aguas subterráneas de la zona.

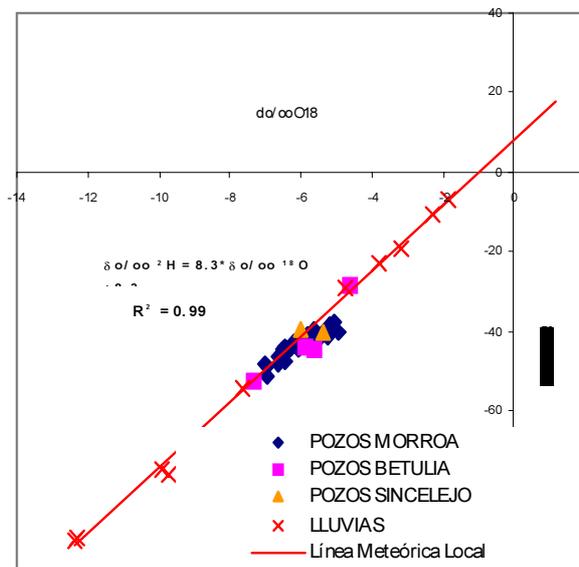


FIG.8. Composición isotópica de las aguas subterráneas del acuífero de Morroa.

Los valores de tritio entre 0.86UT y 1.67UT indican que las aguas del acuífero Morroa tienen una edad mayor de 50 años. Los resultados de ^{14}C muestran una actividad entre 51.9pCM y 87.7pCM utilizando un modelo sencillo sin mezcla de la ley de decrecimiento se determinó una edad entre 836 y 5168 años, esto indica que la recarga actual es casi inexistente; por lo tanto, se tiene que cambiar el sistema de explotación actual (bombeo continuo), y se debe implementar acciones que permitan garantizar la sostenibilidad del recurso, como obras de recarga artificial, entre otras. Como los valores de ^{13}C son relativamente negativos (entre -10.5% y -16.4%) se supone preliminarmente que no hay influencia de carbonatos de origen primario (Figura 9).

5.3. Hidroquímica e isotopía del nivel a

Debido a que los pozos muestreados en la primera campaña captan diferentes niveles acuíferos de Morroa, se programó un muestreo de aguas para análisis hidroquímico e isotópico solamente del nivel A (nivel que se encuentra en el techo del acuífero), para mejorar el modelo hidrogeológico del acuífero. Para tal fin se seleccionaron 16 pozos para análisis físico-químicos y 11 pozos para análisis isotópicos de ^2H , ^{18}O , ^{13}C y ^{14}C .

Química. La selección del muestreo se hizo para determinar las variaciones espaciales tanto en el sentido Norte – Sur, como Oriente - Occidente. Los pozos muestreados captan el acuífero desde 65 m hasta 390 m de profundidad. En la tabla 1 se presentan los resultados de los análisis físico-químicos.

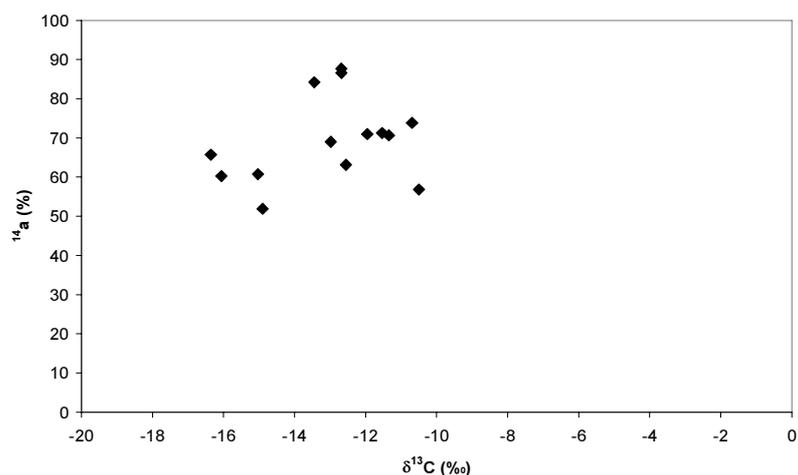


FIG. 9. Relación ^{14}C y ^{13}C .

TABLA 1. RESULTADOS FÍSICO-QUÍMICOS DEL NIVEL A DEL ACUÍFERO MORROA

CODIGO	LOCALIZACION	SENTIDO	X	Y	Profundidad Muestreo	Distancia Zona Recarga	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Fe (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	PO4 (mg/l)	CO3 (mg/l)	pH	TWA	Cond (umhos/cm)
52-II-B-Pz-01	Antiguo Basurero	N-S	854000	1513000	62	351.3	32	10.0	36	21.4	0.2	246	17.2	4.7	0.9	0.01	0	7.5	30.3	496
44-IV-D-Pz-17	Pz Finca La Rosita	E-O	867450	1522700	72	316.7	90	14.0	71	24.0	0.2	410	29.6	25.5	2.3	0.01	0	7.15	31	842
44-IV-D-PP-32	Quembor	N-S	868710	1527840	86	334	22	1.6	80	13.9	0.2	285	7.9	13.4	1.0	0.06	0	6.78	30.1	515
44-IV-D-Pz-14	Troncal en Corozal	E-O	866990	1523160	100	431.9	34	4.5	175	29.7	0.2	233	138	77.4	88.1	0.02	0	7.06	31.5	1252
52-II-A-PP-10	Pileta	N-S	863980	1516680	106	501	34	4.2	79	18.8	0.2	290	25.2	10.5	13.5	0.01	0	7.26	31.1	640
52-II-A-PP-09	Mamón	N-S	864700	1515720	108.6	383	30	10.0	40	17.6	0.2	223	13.8	7.3	0.5	0.01	0	7.55	28.5	457
44-IV-D-PP-16	Liceo	E-O	866800	1524100	141.5	691.1	56	2.5	20	4.2	0.2	163	10.6	3.6	0.6	0.01	0	7.94	30.1	326
44-IV-D-PP-34	Cartagena de Indias	N-S	866640	1521160	170	662.3	65	2.5	24	6.0	0.2	195	19.2	6.6	1.0	0.01	0	7.88	31.1	429
44-IV-D-PP-36	Carabineros	N-S	868120	1524880	229	1030.8	27	5.5	47	11.4	0.2	220	9.2	3.7	0.7	0.07	0	7.48	30.5	406
44-IV-D-PP-24	Corazón de Jesús	E-O	867670	1522400	231	869.6	85	2.5	16	1.9	0.2	163	31.6	17.8	0.5	0.02	0	8.2	30.8	452
44-IV-D-PP-28	Los Palmitos	N-S	869090	1528810	72		38	10.0	109	28.0	0.2	275	62.6	30.6	66.5	0.01	0	7.17	30.1	873
44-IV-D-PP-19	Corozal	N-S			105		42	10.0	48	16.0	0.2	282	9.4	5.0	0.5	0.01	0	7.07	30.7	525
52-II-B-PP-01	Finca La Cruz	N-S	860820	1506420	350		56	3.0	30	7.0	0.2	208	11.4	6.4	0.6	0.03	0	7.7	30.2	405
52-II-A-PP-07	Don Alonso	N-S	862970	1511030	85		62	12.0	76	26.0	0.2	297	66.9	8.9	27.4	0.01	0	7.44	29.6	827
44-IV-D-Pz-01	Cartagena de Indias	N-S	866640	1521160	65		137	13.5	55	27.5	0.2	411	92.3	40.7	4.0	0.01	0	7.37	29.4	1042
44-IV-C-Pz-01A	Bremen A				15		170	1.3	8.5	0.3	0.2	155	102	53.9	0.5	0.30	33.4	8.85	29	802
44-IV-C-Pz-01B	Bremen B				65		200	1.5	20	2.4	0.2	375	59.2	9.8	0.5	0.12	22.9	8.04	29.5	899
Arroyo Grande	Ay. Bremen						175	44.5	69	13.3	0.2	532	133	9.6	1.5	12.5	0	7.64	29.2	1505
Arroyo Grande	Salida Corozal-Betulia						165	41.0	61	14.1	0.2	528	135	12.0	1.9	10.2	0	7.77	31.6	1438
Lluvias	Agua lluvia Corozal Sep		867591	1524693			0.9	1.6	2.8	0.4	0.2	5.1	2.1	0.7	3.0	0.19	0	6.98		19.1

Interpretación de los datos según los diagramas de Stiff. En los diagramas de Stiff (Figura 10) se presentan las aguas muestreadas. Los pozos menos profundos y cercanos a la posible zona de recarga, se caracterizan por ser de tipo bicarbonatado cálcico mientras que los pozos más profundos tienen agua bicarbonatada sódica. Las aguas de los piezómetros 44-IV-D-PZ-14 y 44-IV-D-PZ-17, que son de tipo geoquímico diferente, están asociadas con una posible contaminación. Es muy clara la diferencia entre las aguas de los pozos, el arroyo Grande de Corozal y el agua lluvia, así como la de los pozos que tienen indicios de contaminación.

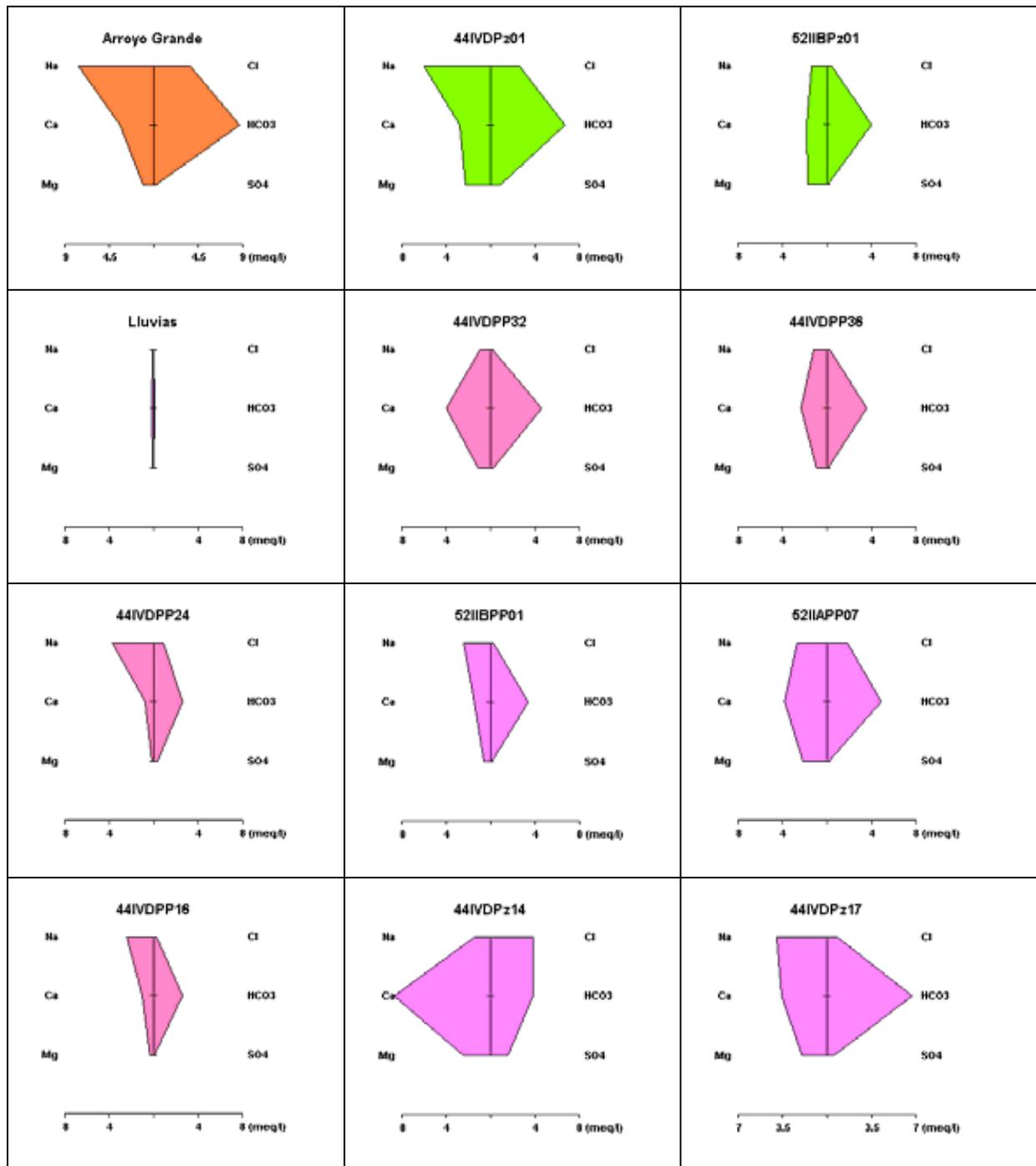


Figura 10. Diagrama de Stiff de las aguas subterráneas del acuífero Morroa, lluvias y arroyo Grande.

Interpretación de datos según diagrama de Piper.

En el diagrama de Piper (Figura 11) se observa que el proceso dominante es también el intercambio catiónico de Ca por Na, como es el comportamiento general de todo el acuífero. Pero las muestras que difieren de este comportamiento están afectadas por actividades antrópicas.

Variación espacial de la concentración de los cloruros ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Por las condiciones naturales del acuífero no deben presentarse concentraciones de cloruros relativamente altas; sin embargo, en el agua de algunos pozos se presentaron concentraciones hasta de $138 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Tabla 1 y Figura 12). Los pozos que tienen mayores concentraciones, se han explicado por contaminación local, asociada con fugas de alcantarillas y aguas residuales sin tratamiento.

En la Figura 13 claramente puede observarse que la CE se mantiene en el mismo rango a medida que se aleja de la zona de recarga del Acuífero de Morroa. Los piezómetros 14 y 17 presentan valores anómalos, posiblemente relacionados con la contaminación detectada y atribuida a saneamiento in situ y aguas residuales sin tratamiento.

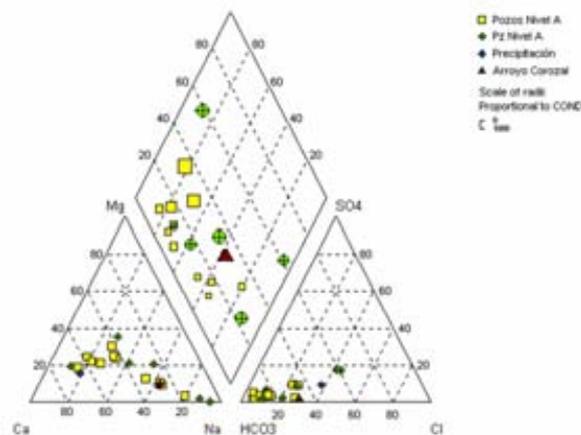


FIG. 11. Diagrama de Piper Nivel A del Acuífero Morroa.

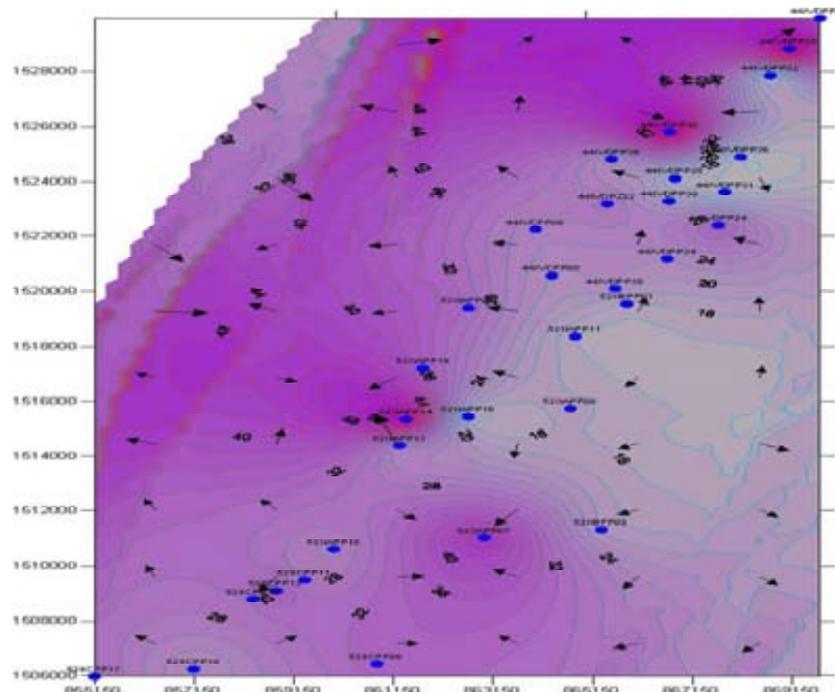


FIG.12. Mapa de isocloruros Acuífero Morroa.

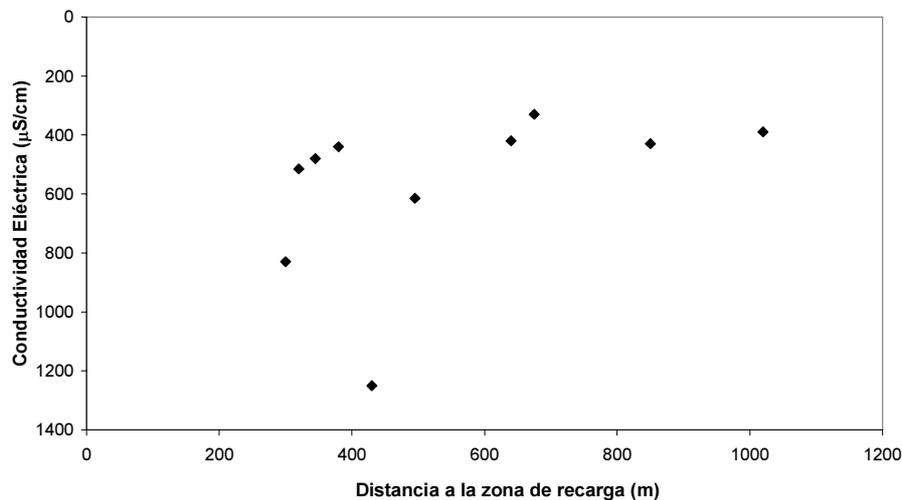


FIG. 13. Relación de conductividad eléctrica y distancia a zona de recarga.

RESULTADOS ISOTOPICOS NIVEL A

Análisis de los resultados isotópicos. La línea meteórica local se construyó con los resultados de los análisis isotópicos de la estación de Corozal, tomados desde marzo del 2002 hasta marzo del 2003 [16]. En un año se tiene una variación isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ entre -1.21‰ a -12.3‰ en la estación de Corozal. La LML está muy cerca y es paralela a la LMM. Sobre los 12 meses la composición ponderada de la lluvia en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ es de -6.14‰ y -41.14‰ para la estación de Corozal. En la Figura 14, se observa que la lluvia ponderada de Corozal, está sobre la LML y sobre la mayoría de los pozos; esto muestra que las condiciones climáticas cuando se infiltró el agua en el Nivel A tienen las mismas condiciones de lluvia actual. También se observa algunos puntos que sugieren una posible ligera evaporación y una relativa amplia variación isotópica de las aguas de los pozos están orientados en sentido N-S con los que están orientados en sentido E-W.

En la Fig. 15, se observa que no hay variación significativa de $\delta^{18}\text{O}$ con la distancia a la zona de recarga, la variación está entre -5‰ y -7‰ , lo que muestra que la composición de las aguas del nivel A del acuífero Morroa corresponden a un mismo tiempo climático.

Comparando las variaciones mensuales de $\delta^{18}\text{O}$ del agua lluvia de la estación de Corozal [16], con los valores mensuales de la precipitación y la temperatura en el período de marzo de 2002 a Marzo de 2003 (Figura 16), se puede concluir que hay una relación inversa. Durante los meses secos hay un efecto de enriquecimiento de $\delta^{18}\text{O}$ y durante los meses de mayor precipitación hay un empobrecimiento de $\delta^{18}\text{O}$.

6. Modelo hidrogeológico conceptual

Hasta el momento se tiene un modelo hidrogeológico conceptual del campo de pozos de Corozal y Sincelejo (Figura 17). En términos generales, la evapotranspiración es mucho más alta que la precipitación y la recarga directa, y ésta mucho menor que la escorrentía y que la extracción actual. Se supone entradas adicionales al acuífero, de aguas residuales y contaminadas a través de los cauces de los arroyos y de las capas permeables que afloran en la zona, de las capas suprayacentes semipermeables y a través de los pozos abandonados sin sellar o mal sellados. También se infiere una recarga por goteo desde las capas arcillosas y limosas del acuífero Morroa y de la Formación Betulia suprayacente.

Es muy probable que por la explotación intensiva del acuífero, se esté induciendo flujos o recargas desde los niveles inferiores, lo que explicaría las edades más antiguas encontradas (5 000 años).

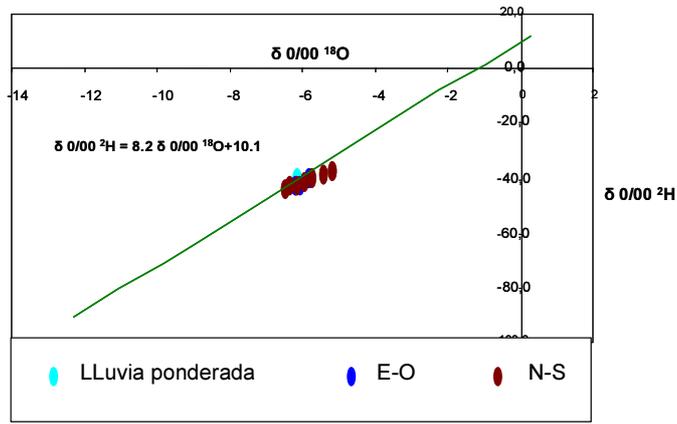


FIG. 14. Composición isotópica pozos nivel A del acuífero Morroa.

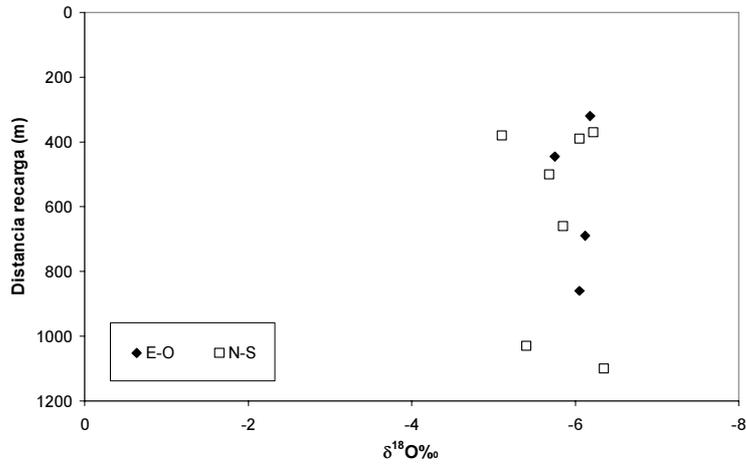


FIG. 15. Relación $\delta^{18}O$ frente a la distancia a la recarga del nivel A.

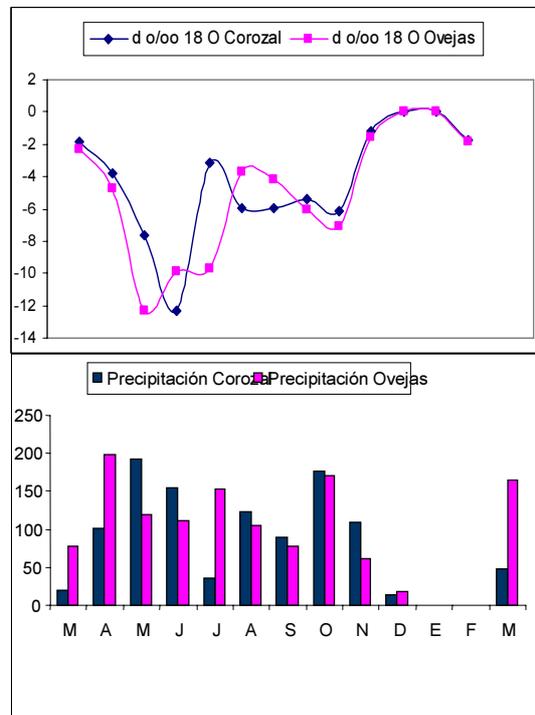


FIG. 16. Variación estacional de ^{18}O y precipitación desde Marzo de 2002 a Marzo de 2003 en Ovejas y Corozal.

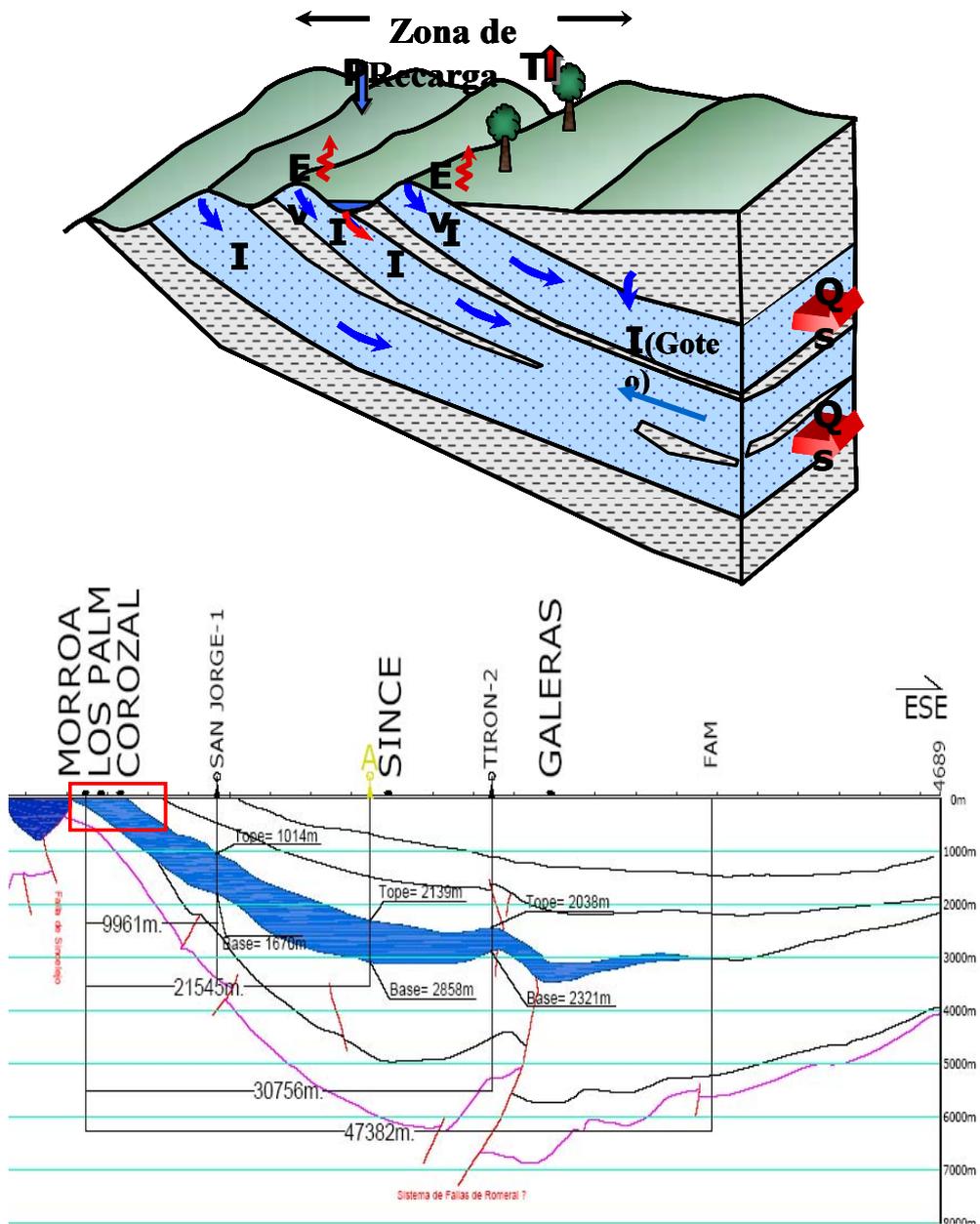


FIG. 17. Modelo hidrogeológico conceptual y modelo sísmico regional

AGRADECIMIENTOS

Queremo agradecerle principalmente a:

El Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, por su valioso apoyo en capacitación y donación de equipos. Así mismo a los expertos Internacionales del OIEA, Dra. Laurence Gourcy, Dr. Edmundo García Agudo, Jean Dennis Taupin y Luis Araguás, por sus invaluable aportes al proyecto.

El Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, MAVDT, por el apoyo económico al proyecto.

A la Dra. María Consuelo Vargas del Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS, por el permanente acompañamiento y asesoría en la parte técnica del proyecto.

A Elemilet Oyola y a Orlando de la Ossa, directores de la Corporación Autónoma de Sucre, CARSUCRE, por la voluntad política que tuvieron para que el proyecto se hiciera realidad.

A todos los compañeros del Grupo de Aguas por su incondicional apoyo en la realización de las actividades de campo y de oficina.

A todas las demás personas que de una u otra manera contribuyeron para que el PPIAS saliera adelante.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cárdenas y Garrido, 1997. “Determinación del Riesgo por Contaminación Acuífero Morroa en el Área Sincelejo, Corozal, Morroa”. Tesis de Grado para optar el título de Ingenieros Agrícolas. Universidad de Sucre, Sincelejo.
- [2] Ministerio de Desarrollo Económico, RAS 2000.
- [3] FINAGUAS, 2001. Sistema de Información para la Gestión del Acuífero de Morroa. Sincelejo.
- [4] Herrera, Pacheco y Villegas, 2003 “Caracterización Hidráulica del Acuífero Morroa a través de Pruebas de Bombeo”. Universidad de Sucre, Sincelejo.
- [5] Estudio Hidrogeológica del Flanco Nororiental de la Serranía de San Jacinto y de la Zona Litoral del Golfo de Morrosquillo. Tomo I: Generalidades Geología. Convenio Colombo-Holandés. Bogotá, 1991. Pág. 11.
- [6] Ibid., p. 12.
- [7] Barrera, R., 2002. Geología del Departamento de Sucre. INGEOMINAS, Bogotá.
- [8] De Porta, J. et al. 1963. Nuevas aportaciones al Holoceno de Tierrabomba. UIS, Bol. Geol., (12). Bucaramanga.
- [9] Duque-Caro, H., 1975. Los foraminíferos planctónicos y el Terciario de Colombia. Rev. Española Micropaleont., 7 (3):403-427.
- [10] Herrera, P. Héctor M. Vulnerabilidad a la contaminación del Acuífero de Morroa. V Foro Institucional sobre el Agua Subterránea. ACOAGUA, Santafé de Bogotá: 1994.
- [11] INGEOMINAS, 1992. Evaluación Hidrogeológica del Acuífero de Morroa.
- [12] Rodríguez et al, 2004. Diagnóstico de la Permeabilidad de los suelos de la zona de recarga del acuífero Morroa. Tesis de Grado para optar el título de Ingenieros Agrícolas. Universidad de Sucre, Sincelejo.
- [13] Informe final, proyecto piloto de manejo integral de aguas subterráneas – cntr 97 2537.
- [14] CARSUCRE, 2001. Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas.
- [15] OIEA, 2003. Resultados de análisis isotópicos, muestras de agua de los pozos de que captan el acuífero Morroa.
- [16] OIEA, 2003 y 2004. Resultados de análisis isotópicos, muestras de agua lluvia de la estación hidrometeorológica de Corozal.

Estudio Hidrogeológico con Énfasis en Hidrogeoquímica de los Acuíferos en la Zona Sur del Departamento del Valle del Cauca (Colombia)

G. Medina Morales^a, G. Paez Ortigón^a, M.C. Vargas Quintero^b, J.D. Taupin^c

^a Corporación del Valle del Cauca (CVC), Cali, Colombia

^b INGEOMINAS, Bogotá, Colombia

^c Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Quito, Ecuador

Resumen. La zona de estudio está ubicada al sur occidente de Colombia en el departamento del Valle del Cauca entre las Cordilleras Occidental y Central. La climatología es de tipo sabana intermontana ($T_{\text{anual}} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1400\text{ mm/año}$). El depósito de edad cuaternaria forma un acuífero multicapa. El nivel superior A y el nivel inferior C están separados por una capa arcillosa B, bien diferenciada cerca del río Cauca. Las capas A y B están compuestas por depósitos aluviales del río Cauca y sus ríos tributarios. La recarga anual se estima en unos 270 Mm^3 y se produce en las partes altas de los conos aluviales y a través del sistema de fallas sobre las Cordilleras Occidental y Central. El flujo subterráneo se produce en el sentido Este-Oeste, hacia el río Cauca. Químicamente, el acuífero inferior C se diferencia del superior A por un intercambio catiónico ($\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$) a través de la capa B. El nivel C tiene una componente de la recarga a través de los sedimentos del terciario (Cl⁻ elevado) que subyacen el depósito aluvial y posiblemente también un mayor tiempo de residencia. No hay diferencia en la composición isotópica de las aguas de los niveles superior e inferior A y C. El tiempo de residencia, calculado usando ^{14}C y tritio, muestra un flujo muy rápido en el nivel superior A, con una edad de recarga menor que 50 años y mucho mayor en el nivel inferior C.

Abstract. The studied area is located in the south-west of Colombia in the Cauca Valley's Province between the Western and Central Andean Cordilleras. The climatology is of intermountain high plain type ($T_{\text{annual}} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1400\text{ mm/y}$). The Quaternary deposits form a multilayer aquifer. The upper level, A, and the lower level, C, are separated by a clay layer B. This layer clearly differentiated in the area of the Cauca River. The layers A and B are composed of alluvial deposits from the Cauca River and other tributaries. The estimated annual recharge is about 270 Mm^3 and takes place in the highest part of the alluvial cone and through the fault system which is standing in the Western and Central Cordilleras. The regional water flow is East-West, within the Cauca River direction. The chemical results show a difference between the aquifer levels. Level C is characterized by the substitution of Ca^{2+} by Na^+ (ion exchange) through the layer clay, B, and by higher chloride values in relation to the Tertiary deposits located under the alluvial deposit. It also shows higher residence time of groundwater. The stable isotope composition of groundwater in both aquifers is similar. The residence time, calculated using ^{14}C and tritium, is younger in the level A with ages younger than 50 years.

1. Introducción

La Corporación Autónoma Regional del Valle el Cauca, CVC es la entidad encargada de la gestión de las aguas subterráneas en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Este recurso es de fundamental importancia para el desarrollo económico y social de la región. Está intensamente explotado para el riego de cultivos (120000 ha), uso industrial (350 industrias) y abastecimiento público ($1\ 000\ 000$ de habitantes) con extracciones superiores a los $600\text{ millones de m}^3\cdot\text{año}^{-1}$. En la etapa de diseño y formulación del Plan de Manejo para la Protección de las Aguas Subterráneas en el Departamento del Valle del Cauca se identificaron, con los usuarios, amenazas importantes para su sostenibilidad como: riesgo de sobre-explotación, infiltración de lixiviados provenientes de los depósitos de basuras, vertimientos industriales y domésticos, aplicación indiscriminada de

agroquímicos, deterioro de la cobertura vegetal en las partes altas de las cuencas, infiltración de combustibles al subsuelo en las estaciones de servicios, etc. Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la CVC solicitó al IAEA apoyo técnico para tener un mayor conocimiento sobre las características y el funcionamiento del sistema acuífero y mejorar los aspectos técnicos relacionados con su gestión para garantizar su sostenibilidad, dentro de nuestras posibilidades técnicas, económicas, intereses y necesidades de la comunidad.

El departamento del Valle del Cauca tiene un depósito aluvial muy importante desde el punto de vista hidrogeológico. El objetivo inicial de la CVC era tener un mayor conocimiento de la dinámica y en especial la recarga de los acuíferos más profundos. Estos acuíferos están considerados como una reserva de agua muy importante para el abastecimiento futuro de la población, por el volumen almacenado, buen rendimiento de los acuíferos y la excelente calidad del agua. Posteriormente el IAEA dio la oportunidad a la CVC de ampliar los alcances del estudio y se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las zonas de recarga y descarga del acuífero.
- Establecer la relación entre las aguas superficiales y subterráneas.
- Utilizar las técnicas isotópicas para datar y definir el origen y dinámica de las aguas subterráneas.
- Realizar la interpretación hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.
- Definir el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero.
- Utilizar la modelación matemática para avanzar en el conocimiento de la dinámica del acuífero y mejorar la gestión de las aguas subterráneas.

En el desarrollo del proyecto participaron además como donante el Organismo Internacional de Energía Atómica – OIEA, como contraparte nacional el Ministerio de Minas y Energía, INGEOMINAS fue la entidad nacional que realizó la coordinación Nacional del proyecto. En el ámbito Regional, participaron la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, la Corporación Autónoma Regional de Risaralda – CARDER, la Corporación Autónoma Regional de Sucre – CARSUCRE y la Corporación Autónoma Regional de la Guajira – CORPOGUAJIRA.

En la realización del estudio, para mejorar el entendimiento de nuestro sistema acuífero utilizamos las técnicas isotópicas como una herramienta muy útil desde el punto de vista técnico y viable económicamente en razón de que su costo es mucho menor que las técnicas utilizadas en la hidrogeología tradicional, la cual tampoco tiene la posibilidad de resolver todos nuestros interrogantes relacionados con el origen, dinámica y datación de las aguas subterráneas. Utilizamos oxígeno-18 (^{18}O) y deuterio (^2H) para conocer el origen del agua, identificar las áreas de recarga y conocer la relación agua superficial - agua subterránea. Utilizamos el carbono-13 (^{13}C), el carbono-14 (^{14}C) y el tritio (^3H) para conocer la dinámica de las aguas subterráneas, datación del agua subterránea y para identificar recargas relativamente recientes.

2. Marco general del estudio

2.1. Localización

La zona de estudio se encuentra localizada al sur del departamento del Valle del Cauca al sur – occidente de Colombia; está delimitada al este por la Cordillera Central, al oeste por la Cordillera Occidental, al sur por el río Desbaratado y al norte por el río Sonso; tiene una extensión de 1940 Km² y su altitud general varía entre los 900 y 1100 m.s.n.m (Figura 1).

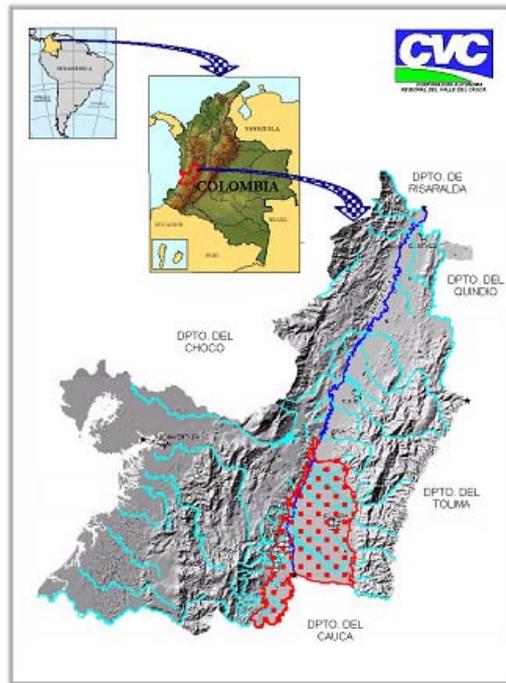


FIG. 1. Localización de la zona de estudio.

2.2. Hidrometeorología

La climatología del área es del tipo sabana intermontana con una temperatura media anual de 24°C, precipitación media de 1200 mm·año⁻¹ con una distribución bimodal con dos periodos de verano y dos de invierno al año. La humedad relativa media oscila entre el 75% y 85%. El drenaje principal de la zona es el río Cauca que corre en dirección sur-norte y tiene un caudal promedio de 316 m³·s⁻¹ a la salida del área de estudio. Los tributarios más importantes por la margen derecha son los ríos Desbaratado, Fraile, Bolo, Amaime, Zabaletas y Sonso. Por la margen izquierda están los ríos Jamundí y Cali.

2.3. Geología

La zona de estudio corresponde a un importante relleno aluvial con condiciones hidrogeológicas muy favorables para el aprovechamiento de las aguas subterráneas. Este depósito se encuentra dentro de la gran “Fosa del Cauca” formada por movimientos tectónicos (Figura 2). Los rasgos estructurales más importantes están asociados con las cordilleras central, occidental y a todo el sistema de fallas que corre en dirección sur-norte. Las rocas provenientes de la Cordillera Central constituyen el aporte más importante de sedimentos al relleno aluvial, dando origen a una secuencia de conos aluviales muy bien desarrollados con sedimentos muy gruesos en la parte alta de los conos y mucho más finos en la parte baja donde los conos se unen con la terraza aluvial del río Cauca. La Cordillera Occidental presenta el menor aporte de sedimentos al relleno aluvial, sólo hay algunos depósitos de interés hidrogeológico al sur-occidente asociados con los ríos Claro, Guachinte y Jamundí, en el resto del área se encuentran conos aluviales muy pobremente desarrollados (Figura 3).

Los depósitos cuaternarios se encuentran principalmente entre la línea de piedemonte de las dos cordilleras (cota 1000-1200 m.s.n.m) y el río Cauca, están suprayaciendo discordantemente sobre los sedimentos del Terciario. El espesor del relleno aluvial es bajo en las partes altas de los conos aluviales y puede tener más de 1000 m en el centro del Valle. La geología del subsuelo, deducida a partir de las correlaciones entre los perfiles litológicos de los pozos perforados en el área, muestra una secuencia sedimentaria muy compleja y heterogénea por la distribución espacial y características de las capas permeables e impermeables del subsuelo. Los sedimentos del subsuelo asociados con los conos aluviales están constituidos por gravas, cantos rodados y bloques con intercalaciones de arcillas

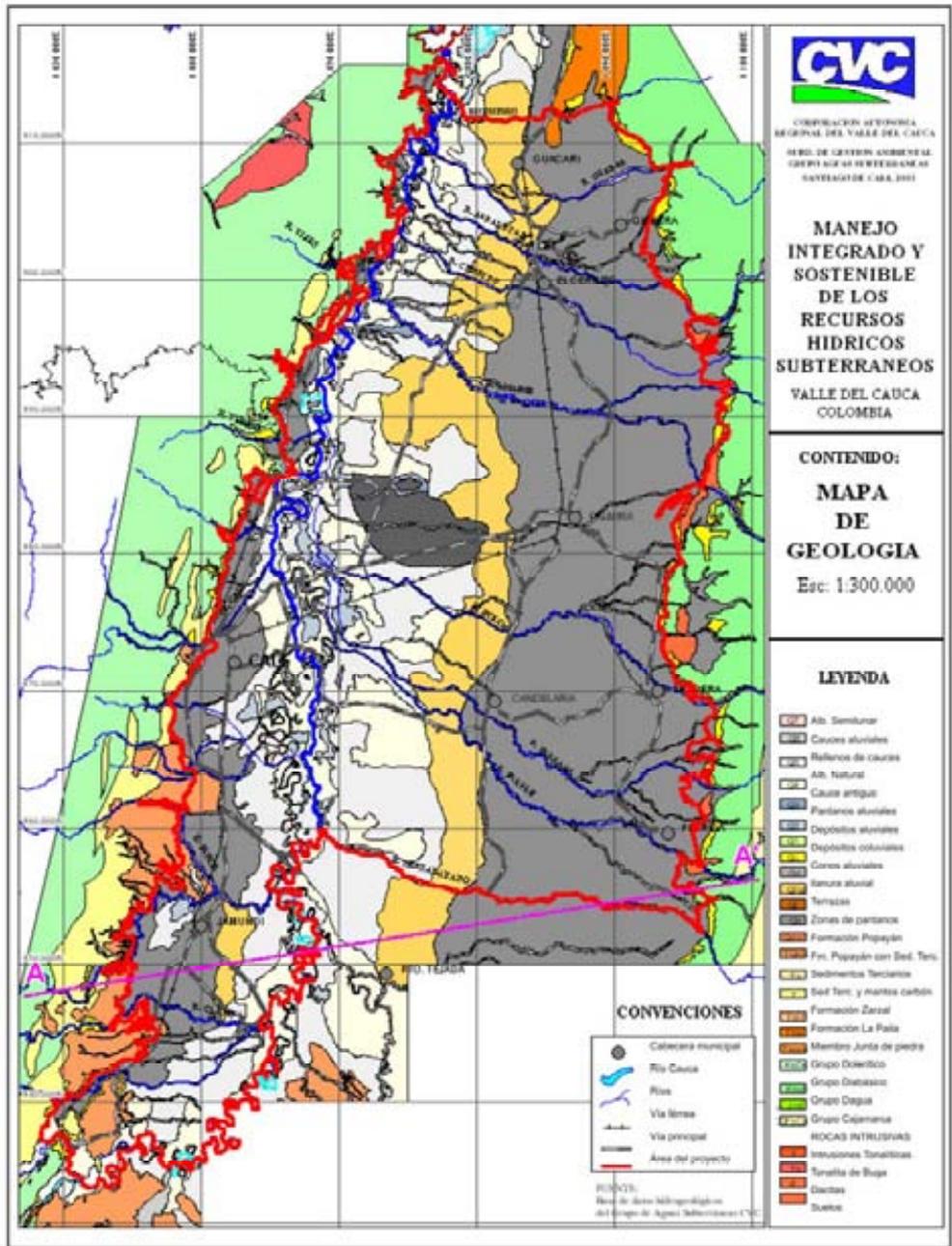


FIG. 3. Mapa geológico

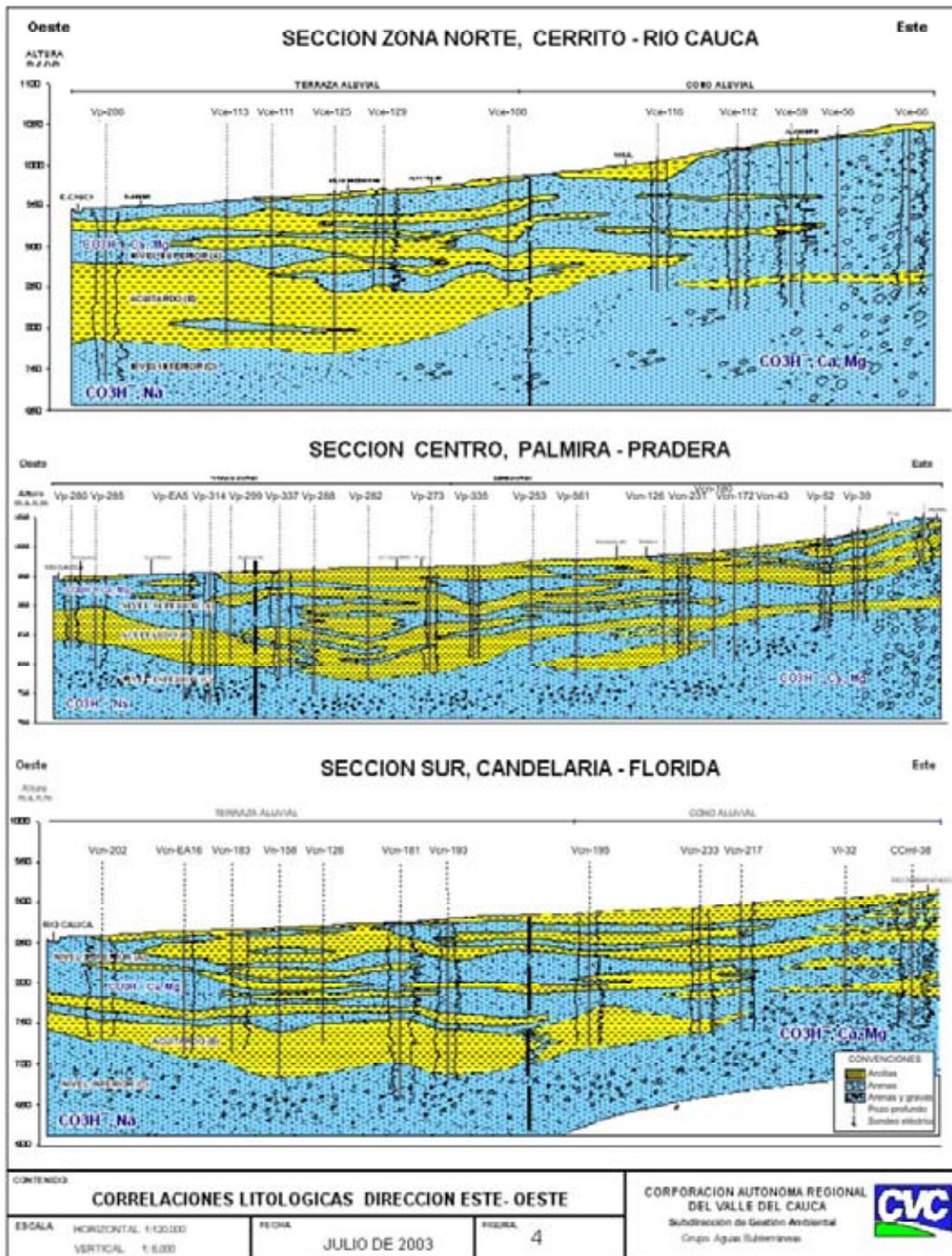


FIG. 4. Correlaciones litológicas dirección Este - Oeste

3. Enfoque metodológico

Básicamente los problemas a resolver están asociados a las amenazas para la sostenibilidad de las extracciones de aguas subterráneas en el departamento del Cauca, las cuales fueron identificadas durante la formulación del “Plan de Manejo para la Protección de las Aguas Subterráneas”. La hidrogeoquímica, las técnicas isotópicas los modelos de simulación son herramientas importantes que debemos utilizar para mejorar nuestro conocimiento sobre el funcionamiento del sistema acuífero y poder tomar las decisiones técnicas más acertadas (no son las únicas decisiones!) para la gestión de las aguas subterráneas la cual debe ser técnicamente factible, económicamente viable y socialmente aceptada por la comunidad.

En el departamento del Valle del Cauca hay una explotación intensiva de las aguas subterráneas y existen amenazas importantes en relación con las extracciones, pero en especial, con el riesgo de contaminación del recurso hídrico. Un mayor y mejor conocimiento del funcionamiento del sistema acuífero permitirá implementar un Plan de Manejo que incluya instrumentos de planificación para:

- Racionalizar el aprovechamiento de las aguas subterráneas.
- Definir los criterios técnicos en los cuales se debe soportar la reglamentación para la exploración, aprovechamiento y protección de las aguas subterráneas.
- Documentar los aspectos operativos en relación con el control y administración de las aguas subterráneas (concesiones, control de extracciones, permisos para perforación de nuevos pozos, monitoreos, etc.).
- Integrar la gestión de las aguas subterráneas con las aguas superficiales tomando como elemento de planificación los “Planes de Ordenamiento de Cuencas”.

El estudio se ha desarrollado siguiendo la siguiente metodología:

- Utilización de la hidrogeología clásica para revisar los aspectos relacionados con geometría, localización, propiedades físicas, características hidráulicas, hidrogeoquímica y balance hídrico del sistema acuífero.
- Utilización de las técnicas isotópicas para mejorar el conocimiento sobre la dinámica del sistema acuífero, zonas de recarga, datación de las aguas subterráneas, relación entre el agua superficial y subterránea.
- Evaluación conjunta de la información aportada por la hidrogeología clásica y las técnicas isotópicas para definir el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero.
- Modelación matemática del sistema acuífero, que será utilizada en el mediano plazo como herramienta de gestión.

Aplicación de los resultados del estudio en la gestión de las aguas subterráneas: “Implementación del Plan de Manejo para la Protección de las Aguas Subterráneas”.

4. Hidrogeoquímica

En el estudio de hidrogeoquímica se seleccionaron alrededor de 350 análisis físico-químicos para la clasificación del agua subterránea, estos fueron realizados en el laboratorio de CVC.

Para poder visualizar las relaciones entre las diferentes composiciones y la evolución del agua se trazaron cuatro secciones en el área de estudio, tres transversales en dirección este – oeste y una norte-sur.

Los diagramas Piper y las relaciones iónicas fueron utilizados para determinar el tipo de agua, para la identificación relación agua-roca y las reacciones químicas más comunes que cambian la composición de los iones principales e identificación de cambio iónico, así como la tendencia de evolución del agua.

Para la deducción de la roca por análisis químicos se utilizó la técnica [9] cuya teoría está basada en una simplificación de balance de masas, la propuesta de esta técnica es útil cuando no se conoce la interacción roca/agua. Se compararon todas las posibilidades de origen del cloruro y el sodio, del calcio y el sulfato, del bicarbonato y sílice - sodio, se tuvieron en cuenta otras comparaciones entre calcio y magnesio, sodio - potasio, sodio- calcio y cloruros – bicarbonatos.

4.1. Características del agua subterránea

Para evaluar las características del agua subterránea se evaluó la conductividad eléctrica y los siguientes iones mayoritarios:

Bicarbonatos: Es el ión predominante en los análisis de agua del Valle de Cauca y su porcentaje de concentración oscila entre el 46% y 51% con respecto a los iones calcio, sodio y magnesio. El porcentaje con respecto a la suma del resto de los aniones principales varía entre el 70% y 99%. En algunos casos como la zona de Cali y Yumbo el ión bicarbonato es superado por el ión sodio.

Calcio y magnesio: El calcio es el segundo ión en importancia en la composición del agua de este acuífero. Su concentración varía entre el 2.3 y el 38% con respecto a la suma de aniones presentes en el agua. Las concentraciones de magnesio varían entre 1 y 40%. Su porcentaje con respecto al total de los aniones se encuentra entre el 3.4% y el 27%, y por ello se clasifica como el tercer ión entre los principales.

Sodio (Na): Es el cuarto ión de importancia la concentración varía entre 5 mg·L⁻¹ y 147 mg·L⁻¹. Hay un cambio importante en la concentración del sodio en los pozos más profundos que captan el nivel C y en algunos sectores de los municipios de Cali y Yumbo. La recarga del agua subterránea ocurre a través de sedimentos del Terciario y en el municipio de Palmira la presencia de sodio está asociada a fenómenos de acumulación de sales por continuas inundaciones y resecações. En la zona paralela al río Cauca hay un cambio en la concentración de Na⁺, aumentando especialmente hacia los sectores de Cali, Yumbo y Palmira por lo anotado anteriormente, pero también por reacciones de intercambio catiónico en los depósitos arcillosos próximos al río.

Conductividad eléctrica: En la zona de estudio las conductividades menores a 500 µS·cm⁻¹ corresponden a los conos aluviales y la llanura aluvial del río Cauca. Se puede observar en general que la conductividad va aumentando en la dirección del flujo, los valores más altos de conductividad están asociados a las áreas con sedimentos más finos y velocidades de flujo más bajas especialmente en algunos sectores de Candelaria y Palmira. Es importante resaltar que los depósitos de los ríos con mayor capacidad en el arrastre de sedimentos como el Bolo, Amaime y Zabaletas tienen aguas con conductividades más bajas debido a la mayor velocidad del flujo subterráneo, poco tiempo de contacto, menor mineralización y menor contenido de arcillas que limita las reacciones de intercambio. La conductividad eléctrica en el agua subterránea en la zona de estudio está entre los 300–700 µS·cm⁻¹ pero lo más común es encontrar conductividades entre 400-500 µS·cm⁻¹ (Figura 5).

Cloruros: Las concentraciones de cloruros son bajas en la mayoría de las aguas subterráneas con valores inferiores a 6 mg·L⁻¹ correspondientes a los conos aluviales y la llanura aluvial margen derecha del río Cauca. Solo hay unas pequeñas áreas en el sector de Palmira con contenidos de cloruros entre 10 y 30 mg·L⁻¹. Las mayores concentraciones se presentan entre Cali, Yumbo margen Izquierda del río Cauca con valores mayores a los 100 mg·L⁻¹ (pero menores a 150 mg·L⁻¹) en áreas muy específicas y pozos que aprovechan el nivel inferior del acuífero y que su recarga está asociada con sedimentos del terciario de origen marino (Figura 6).

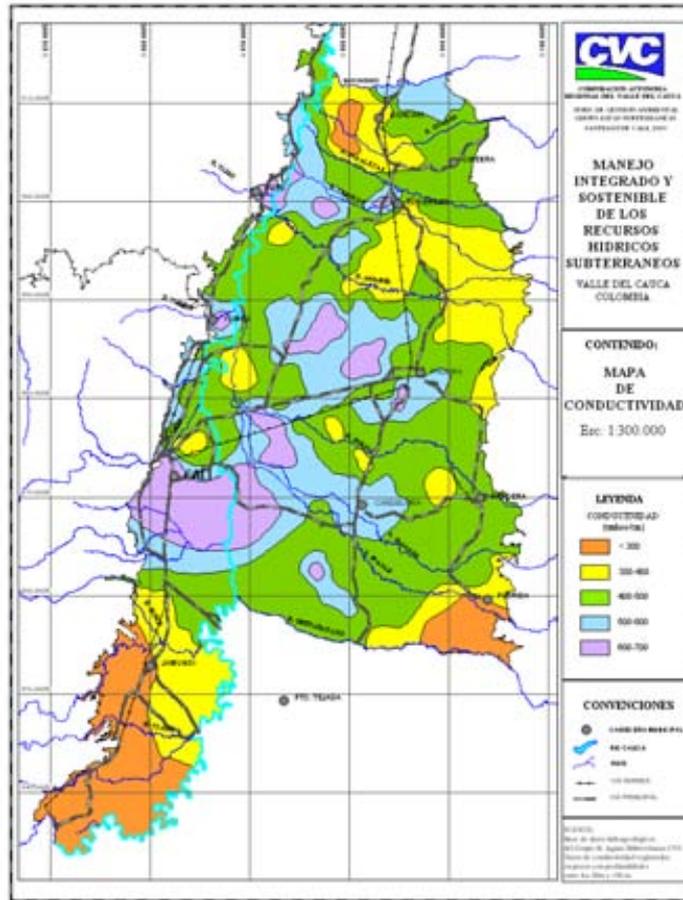


FIG. 5. Mapa de conductividad.

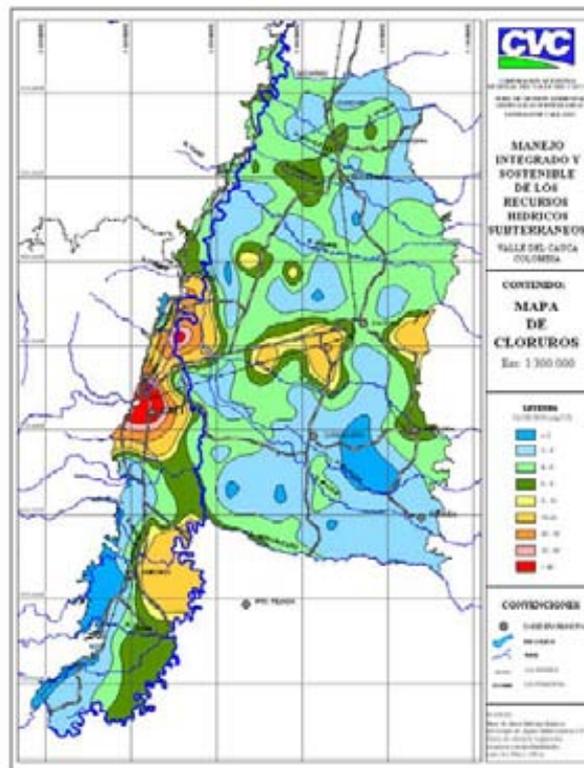


FIG. 6. Mapa de cloruros.

4.2. Clasificación de las aguas subterráneas

El agua subterránea se clasifica como bicarbonatada cálcico magnésica y magnésico cálcica la cual predomina en la mayoría de los pozos del nivel superior del acuífero y aguas superficiales. Otro grupo minoritario se clasifica como bicarbonatada sódica y clorurada sódica (anomalía pozo Lince, profundidad superior a 600 m), frecuente en los pozos profundos del nivel inferior del acuífero o en pozos localizados en el sector de los municipios de Cali y Yumbo donde la recarga se presenta a través de sedimentos del terciario (Figura 7).

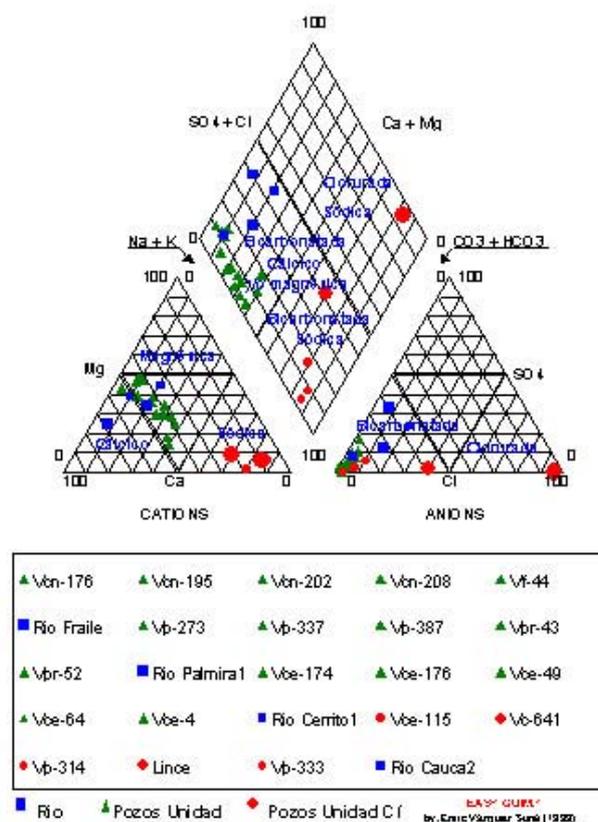


FIG. 7. Clasificación de las aguas subterráneas

4.3. Relaciones iónicas

Las características del agua están íntimamente ligadas con la composición química de las rocas y materiales que conforman el acuífero.

Para caracterizar el agua de los acuíferos se calcularon las relaciones iónicas. Los datos se obtuvieron en 4 secciones hidroquímicas, tres transversales en dirección E-W y una en dirección longitudinal Norte sur, las cuales guardan cierta similitud con el terreno del que procede el agua o indican la acción de los fenómenos modificadores [3]. Entre los índices más utilizados están:

Relación potasio/sodio

En aguas de origen continental o dulces se caracterizan por presentar valores entre 0.004 y 0.3 y en el agua marina es de 0.02 a 0.025. En la zona de estudio este valor muy bajo varía entre 0.02 y 0.20 debido a que el potasio es fijado por el terreno. Los resultados de esta relación son consistentes con las características de la roca fuente (Intemperismo de rocas ígneas).

Relación magnesio/calcio

En aguas de origen continental, la relación varía entre 0.3 y 1.5, si se deriva de terrenos dolomíticos dicha relación se acerca a 1. Valores por encima de 1 indican abundancia de minerales ricos en silicatos de magnesio como lo que se presenta en rocas como basaltos y gabros. Esta relación es muy baja en toda la zona, varía entre 0.20 y 1.76; los valores más altos están asociados con la presencia de silicatos en las rocas volcánicas (gabros y basaltos).

Relación sodio/calcio y sodio/(calcio+magnesio)

Estas relaciones son útiles para deducir procesos de intercambio iónico y distinguir el intemperismo de silicatos y carbonatos. En la zona de estudio, el valor de estas relaciones es bajo, menor que 1.0 en todos los pozos del nivel superior del acuífero (Nivel A) y aumenta hasta valores cercanos a 6 en los pozos que aprovechan el nivel inferior del acuífero (Nivel C). En el nivel superior del acuífero las relaciones presentan solo un incremento muy pequeño en la dirección del flujo, lo cual puede evidenciar reacciones de intercambio iónico entre el agua del acuífero y los sedimentos arcillosos (Figura 8).

Relación cloruros/bicarbonatos

Es una relación de interés para seguir los procesos de concentración de sales, siempre deber ir aumentado en la dirección del flujo. En aguas continentales tiene valores entre 0.1 y 5. En zonas de riego puede incrementar la relación por el aumento de cloruros. En el área de estudio, como son aguas bicarbonatadas, esta relación es baja, entre 0.02 y 0.12. En el nivel inferior del acuífero el valor de la relación es muy bajo. Solo se presenta una anomalía en el pozo Lince, con un valor igual a 20, lo que nos indica un agua de origen marino.

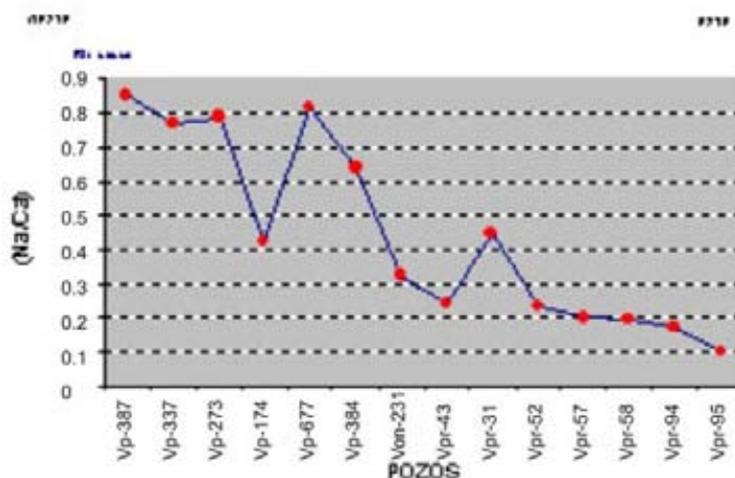


FIG. 8. Evolución de la relación (Na^+/Ca^{2+}) desde el este hacia el Oeste

Índice de cambio de bases $ICB(Cl^-(Na+K)/Cl)$

En aguas donde el Na y Cl son iones importantes esta relación sirve para verificar el intercambio iónico. En la sección norte (municipio de El Cerrito) y en la sección centro (municipio de Palmira) existe un ablandamiento por la liberación del sodio. En los pozos más profundos el icb es cercano a cero donde el valor de los cloruros y del sodio es alto y el potasio no es relevante.

En el área los índices icb y icb' tienen valores negativos en especial el icb (hasta cerca de -40). En el nivel superior del acuífero el índice presenta una tendencia a disminuir en la dirección del flujo. En el nivel inferior del acuífero el índice tiene muy poca variación en todos los pozos (entre -0.5 y -1.0) a excepción del pozo de Lince que presenta una anomalía con un valor de icb' de 5.0. En este último caso el índice icb' corrobora aún más la hipótesis de que el agua obtenida en el pozo Lince es de origen marino.

Los pozos donde el índice de cambio de bases se acerca a cero son los correspondientes a la zona de Cali y Yumbo, por lo que se puede concluir que hay dos facies de composición mineralogía diferente en el acuífero. Una proviene del material de la cordillera Central y que conforman la mayor parte del medio. La otra, caso de Cali y Yumbo, tiene su origen a la cordillera occidental compuesta por materiales sedimentarios que tuvieron contacto con el mar como es el caso de la formación Vijos, Guachinte, Ferreira y que se caracteriza por su alto contenido de sodio y cloruros.

Para establecer la interacción entre el agua y la roca con el propósito de deducir la roca fuente se analizaron otros tipos de mediciones como contenido de sílice, TDS, entre otros.

Los iones sodio y cloruros tienden a aumentar en la dirección del flujo (dirección Este – Oeste). En la parte media hay una disminución del Mg y el Ca. Esto se debe posiblemente a reacciones de intercambio iónico con las arcillas (montmorilloníticas) presentes en la zona.

4.4. Interpretación hidrogeoquímica

Al realizar la evaluación preliminar de los componentes químicos del agua subterránea, en el nivel superior del acuífero, se encuentra que los elementos presentes están determinados por la composición mineralógica de las rocas que conforman el material del acuífero. Dichas rocas, son esencialmente basaltos, diabasas anfibolitas, gabros, cuarzo-dioritas y esquistos principalmente. Estas rocas están conformadas por un alto porcentaje de minerales ferro-magnesianos y feldespatos-plagioclasas que por acción química del agua son alterados y descompuestos en dichos elementos.

Si se evalúa la variación espacial de la concentración de los iones en relación con las características del acuífero, los valores van aumentando ligeramente en sentido de la dirección del flujo subterráneo. Esta situación es más evidente en el área comprendida entre la parte baja de los conos aluviales y los depósitos arenosos del río Cauca. Las mayores concentraciones ocurren al nor-occidente de Palmira, con una ligera disminución de las concentraciones en el área paralela al río Cauca, constituida principalmente por aluviones arenosos y denominada zona de cambio.

En los pozos más profundos que captan el nivel inferior del acuífero (nivel C - confinado) y donde el acuífero interactúa con la capa arcillosa (nivel B), los valores de los bicarbonatos, el calcio, la conductividad y la dureza disminuyen aumentando las concentraciones de sodio y cloruros.

En general se ha evaluado la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea en las diferentes geoformas existentes en el Valle del Cauca, encontrándose los siguientes aspectos:

Conos aluviales: Los conos aluviales empiezan a formarse a los 1200 m.s.n.m. aproximadamente. En esta zona se inicia uno de los aportes más importantes al flujo subterráneo (recarga del acuífero). Los iones mayoritarios del agua en el nivel superior del acuífero presentan concentraciones relativamente bajas. No hay un incremento importante en la mineralización del agua en todos los conos aluviales ubicados en la zona de estudio, donde los gradientes hidráulicos y las velocidades del agua subterránea son elevadas, debido a que está atravesando sedimentos gruesos y tiene poco tiempo de contacto con los sedimentos del acuífero.

Llanura aluvial: En los depósitos de la llanura aluvial en el nivel superior del acuífero la concentración de los iones mayoritarios en el agua subterránea varía muy poco con respecto a lo que ocurre en los conos aluviales; no obstante, en algunos pozos se encuentra un ligero incremento en la concentración de los bicarbonatos principalmente en el sentido del flujo.

Aluvi3n arcilloso: En los pozos perforados en el nivel superior del acuífero en el aluvi3n arcilloso que corresponde a la parte mas baja del Valle la cual ha estado sometida frecuentemente a procesos de inundaci3n y desecaci3n, se presenta un incremento del sodio en el agua subterr3nea. El incremento seguramente se debe a un proceso de acumulaci3n de sales y a reacciones de intercambio cati3nico entre el calcio y el sodio presente en las arcillas de origen monmorillonitico.

Zona de cambio (aluvi3n arenoso): Para los pozos profundos que captan el nivel inferior del acuífero se observa un cambio brusco paralelo al r3o Cauca entre el aluvi3n arcilloso. Las concentraciones de calcio bajan, mientras que las de sodio y cloruros, suben. En esta misma 3rea se presentan valores de sodio altos principalmente en pozos de Cali y Yumbo ubicados al lado izquierdo del r3o Cauca (sedimentos provenientes de la Cordillera Occidental). Por lo tanto se podr3a pensar en un cambio en la composici3n mineral3gica del material que conforma este sistema acuífero que est3 en contacto con materiales ricos en sodio y cloruros, procedentes de formaciones de edad Terciaria: La Ferreira, Guachinte y Vijes.

En t3rminos generales en la zona de estudio se distinguen dos tipos de aguas. El m3s frecuente en toda el 3rea es la bicarbonatada c3lcico magn3sica o magn3sico c3lcico, correspondiente al nivel superior del acuífero (Nivel A). Es un acuífero libre y semiconfinado. El otro tipo de agua es bicarbonatado s3dico y se presenta en todos los pozos que captan el nivel inferior del acuífero (Nivel C – confinado) y en algunos pozos del nivel superior A, en el sector de Yumbo pr3ximo a los sedimentos terciarios de origen marino de la formaci3n Vijes (Figura 7).

Se deduce que, en la mayor3a de los pozos, la roca fuente y mineral3gia existente es del tipo bas3ltico-andes3tico de origen volc3nico con un tenor alto de s3lice y est3n presentes tanto en la cordillera Occidental como en la Central. El aumento del sodio se debe principalmente a la disoluci3n de la albita. Donde aumentan los bicarbonatos, aumenta el sodio y libera s3lice. La fuente del calcio es posible que se deba a la meteorizaci3n de los silicatos.

En el sector de Palmira se presenta un pozo (lince) cuya posible fuente de cloruro y sodio seg3n las relaciones i3nicas sugiere claramente una soluci3n de halita, correspondiente a rocas de origen sedimentario de edad terciaria.

5. Caracterizaci3n isot3pica de las aguas subterr3neas

Se utilizaron 15 pozos para la caracterizaci3n isot3pica de las aguas subterr3neas. Se determin3 ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{13}C y ^{14}C . En los pozos los valores en oxigeno-18 y deuterio son bastante cercanos, entre -9.9‰ y -11.2‰ ($\delta^{18}\text{O}$) y entre -68‰ y -77‰ ($\delta^2\text{H}$) con un exceso en deuterio entre 9.0‰ y 12.5‰ est3n sobre la recta mete3rica local ($^2\text{H} = 8.35 \cdot ^{18}\text{O} + 16.05$) definida a partir de las mediciones isot3picas mensuales de la red pluviom3trica ubicada entre 1000 y 3000 m (5 estaciones).

No hay una relaci3n entre is3topos estables y profundidad (niveles A y C), ni entre is3topos estables y qu3mica. La 3nica hip3tesis que se puede hacer es una recarga para los 2 acuíferos en condiciones clim3ticas id3nticas.

Los resultados de los is3topos radioactivos muestran para el ^{14}C que la actividad var3a entre 8.58 pCM y 113.96 pCM. Ocho pozos que pertenecen al nivel A tienen agua con actividad entre 97 y 116 pCM lo que corresponde a agua reciente con una recarga inferior a 50 a3os, el tritio confirma bien esta edad reciente con valores entre 0.7 UT y 2.2 UT.

Se puede notar que la secci3n al norte tiene la totalidad de sus puntos con agua reciente. Esta secci3n corresponde tambi3n a la zona donde existe una litolog3a m3s favorable a una circulaci3n r3pida del agua y el punto m3s "antiguo" (A=97.7 pCM) est3 ubicado al oeste en relaci3n con la direcci3n del flujo.

El agua extraída del único pozo del nivel C tiene la actividad más baja (8.58 pCM), lo cual es lógico en razón de la profundidad de captación del agua (entre 200 y 400m). Sin embargo, la edad parece demasiado antigua (20000 años). Una hipótesis de mezcla con un agua más antigua (agua del Terciario?) o una mezcla con carbono primario debe ser investigada. Seis pozos aprovechan los niveles A y C simultáneamente (30 a 92 pCM ^{14}C) tienen por lo tanto edades un poco más antiguas que corresponden a edad intermedia entre la edad antigua del agua del nivel C y la edad reciente del agua del nivel A.

El pozo del nivel C y los pozos de agua mezclada A y C evidentemente no tienen tritio. Las mediciones en ^{13}C varían entre -8.41‰ y -12.81‰ (origen gas del suelo, ciclo C_3 -bosque- en conformidad con la vegetación de la parte alta, zona supuesta de recarga) y no muestran de mezcla posible con un carbonato marino, la actividad en ^{14}C no debe ser corregida (Figura 9). La parte baja del Valle Cauca tiene cultivo de caña de azúcar hace más de 50 años (gas del suelo, ciclo C_4), el acuífero esta cerca (< 10 metros), pero no parece tener una infiltración importante en la parte baja porque deberíamos tener valores más enriquecidos en ^{13}C alrededor de -4/-2‰. Eso confirma que un nivel superficial de arcillosas impide la infiltración hacia el nivel A.

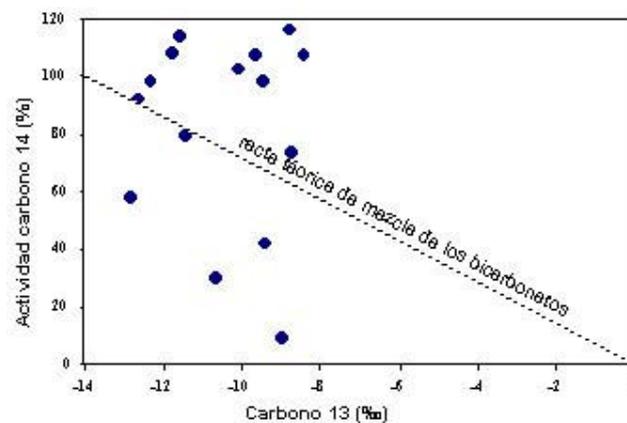


FIG. 9. ^{13}C vs. ^{14}C de las aguas de los acuíferos.

6. Modelo hidrogeológico conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero definido a partir del análisis de toda la información generada durante la realización del estudio y la información hidrogeológica ya existente, muestra un depósito aluvial muy profundo y un solo acuífero multicapas de dos niveles muy bien diferenciados en la zona plana (llanura aluvial) cerca del río Cauca. El nivel superior (Nivel A) es de poco espesor (100 a 120 m) y tiene acuíferos libres y semiconfinados. El gradiente hidráulico (0.003) y la velocidad del flujo (5-10 cm/día) son bajos. Está compuesto por sedimentos finos principalmente arcillas y arenas y gravas en algunos sectores, principalmente al norte. El nivel inferior del acuífero (Nivel C) se encuentra generalmente por debajo de los 180 m de profundidad. Tiene acuíferos confinados de buen rendimiento específico. Esta separado del nivel superior por una capa arcillosa (Nivel B) impermeable, con algunos lentes muy delgados de arena pero sin mucho interés para el aprovechamiento de aguas subterráneas. En el subsuelo de los conos aluviales, no hay una diferenciación de los dos niveles acuíferos. Hay un solo acuífero muy heterogéneo en la granulometría y espesor de las capas el cual en algunas áreas es libre y en otras semiconfinado (Figura 10).

La dirección del flujo subterráneo es E-W (Cordillera Central hacia el río Cauca) y W-E (Cordillera Occidental hacia el río Cauca) y hay un flujo regional en dirección S-N (Figura 6). La interpretación hidrogeoquímica e isotópica del agua subterránea en la zona de estudio muestra una recarga muy rápida en el nivel superior del acuífero que ocurre principalmente a través de los conos aluviales,

sistema de fallas y cauces de los ríos principalmente al norte del área donde hay un predominio mayor de sedimentos permeables en el subsuelo que en el sector sur. En el nivel inferior del acuífero la recarga es mucho más lenta. La interpretación isotópica (^{13}C) no muestra una recarga muy importante en la zona plana.

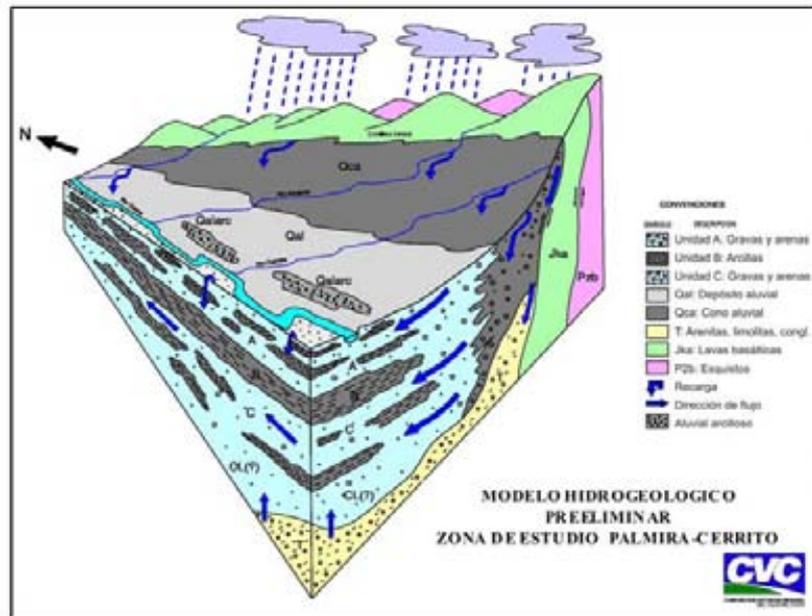


FIG. 10. Modelo Hidrogeológico Conceptual del acuífero.

7. Modelación del sistema acuífero

El acuífero se modeló utilizando tres capas, los dos niveles acuíferos identificados en el modelo hidrogeológico conceptual (niveles A y C) y la capa arcillosa impermeable (nivel B). El nivel superior se comporta como un acuífero libre y semiconfinado en algunos sectores. El nivel intermedio es un acuitardo que sólo está bien definido en las proximidades del río Cauca y el nivel inferior es un acuífero confinado donde está presente la capa arcillosa y semiconfinado en los sectores medios y altos de los conos aluviales. La distribución espacial de las capas y el modelo digital del terreno se obtuvo trazando siete correlaciones entre las columnas litológicas y registros eléctricos de los pozos perforados en la zona, las coordenadas y cotas de los pozos.

Las condiciones de contorno se definieron analizando la información hidrogeológica de la zona, el modelo hidrogeológico conceptual, el sistema de flujo y el modelo digital del terreno. Los límites este y oeste se hicieron coincidir con las isopiezas 1020 y 1010 m.s.n.m. para los periodos de verano e invierno respectivamente. El flujo subterráneo tiene dirección E-W y W-E de las cordilleras hacia el río Cauca. Cerca del río, el flujo toma una dirección S-N, por lo tanto al sur y norte cerca del río se establecieron dos niveles de cabeza constante. La condición del río se interpretó como RIVER por la conexión del río con el acuífero.

La recarga del acuífero se estableció con el balance hídrico de la cuenca, dando una mayor ponderación a la recarga por los conos aluviales. También se consideraron los retornos del riego y las pérdidas en los acueductos de Cali y Candelaria.

Los parámetros hidráulicos del acuífero se obtuvieron mediante la interpretación de 75 pruebas de bombeo en pozos construidos en la zona. La modelación se trabajó con la información de niveles y consumos de 225 pozos que están en operación, utilizando los registros obtenidos entre los años 1997 y 2003. El modelo se calibró en una primera instancia en régimen permanente para las condiciones iniciales de mayo de 1997 lográndose una buena correlación entre los niveles simulados y los observados, con un error medio cuadrático inferior al 4% (Figuras 11 y 12).

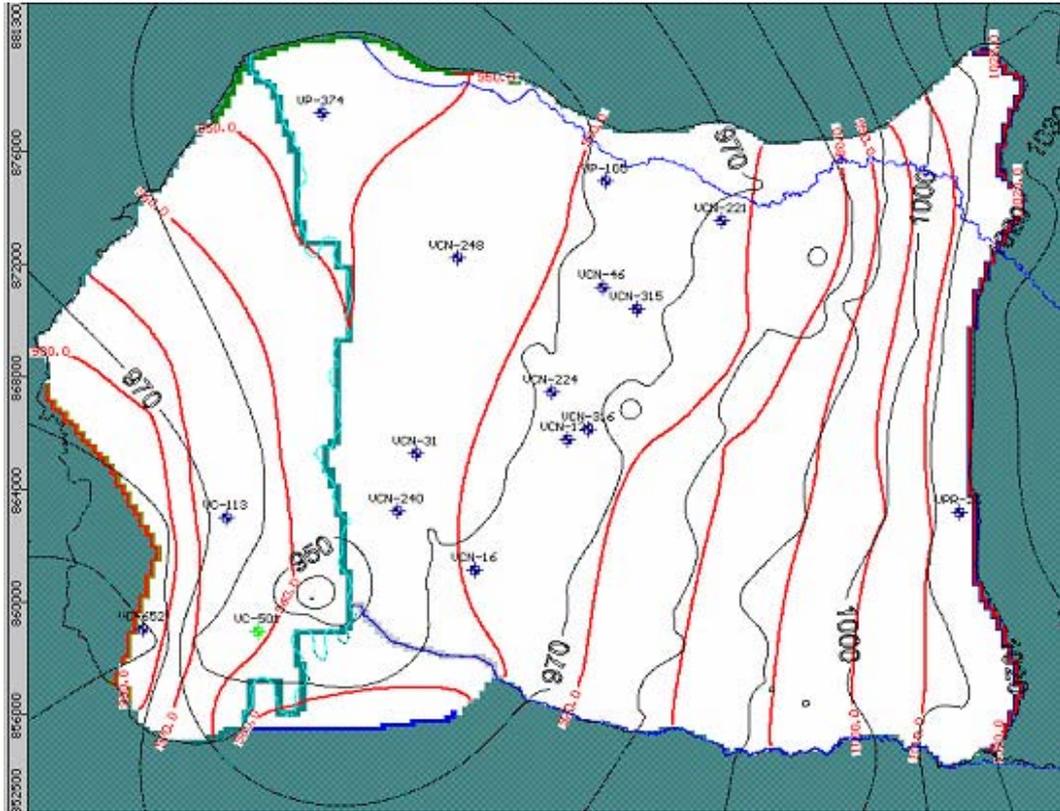


FIG. 11. Régimen permanente. Isopiezas observadas en mayo de 1997(negras) y generadas por el modelo (rojas).

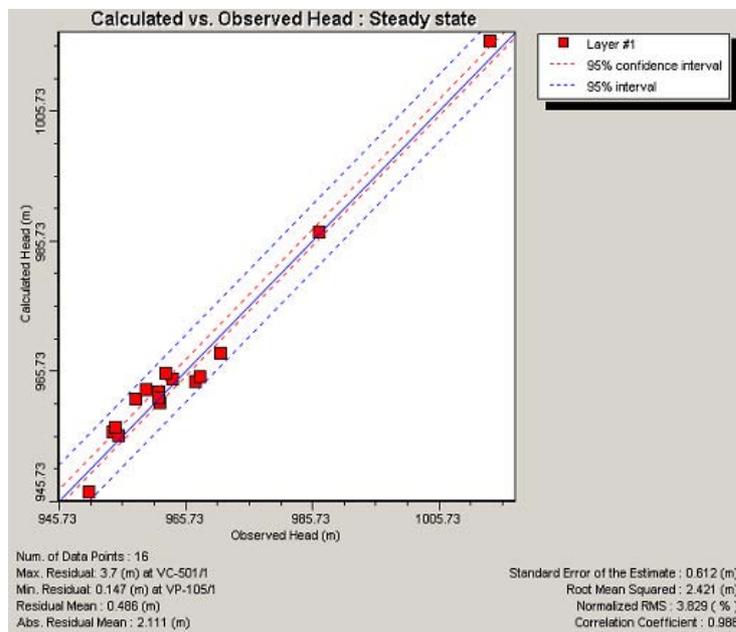


FIG. 12. Estadísticos de la calibración en régimen permanente.

Posteriormente, se modeló el acuífero en régimen transitorio utilizando los consumos y niveles registrados semestralmente. Los resultados obtenidos en la calibración del primer año no fueron buenos pero mejoraron a partir del año y medio hasta el año siete (2003). En una segunda etapa de la modelación en régimen transitorio se trabajó con los consumos mensuales. La calibración se realizó para un período de cuatro años (Mayo 1997 a Abril 2001) y la validación en un periodo de 2.5 años. Los resultados obtenidos fueron mejores. El valor del NRMS para el período de calibración fue inferior al 4% (Figuras 13 y 14) y durante la etapa de validación varió entre el 5% y el 6.7%.

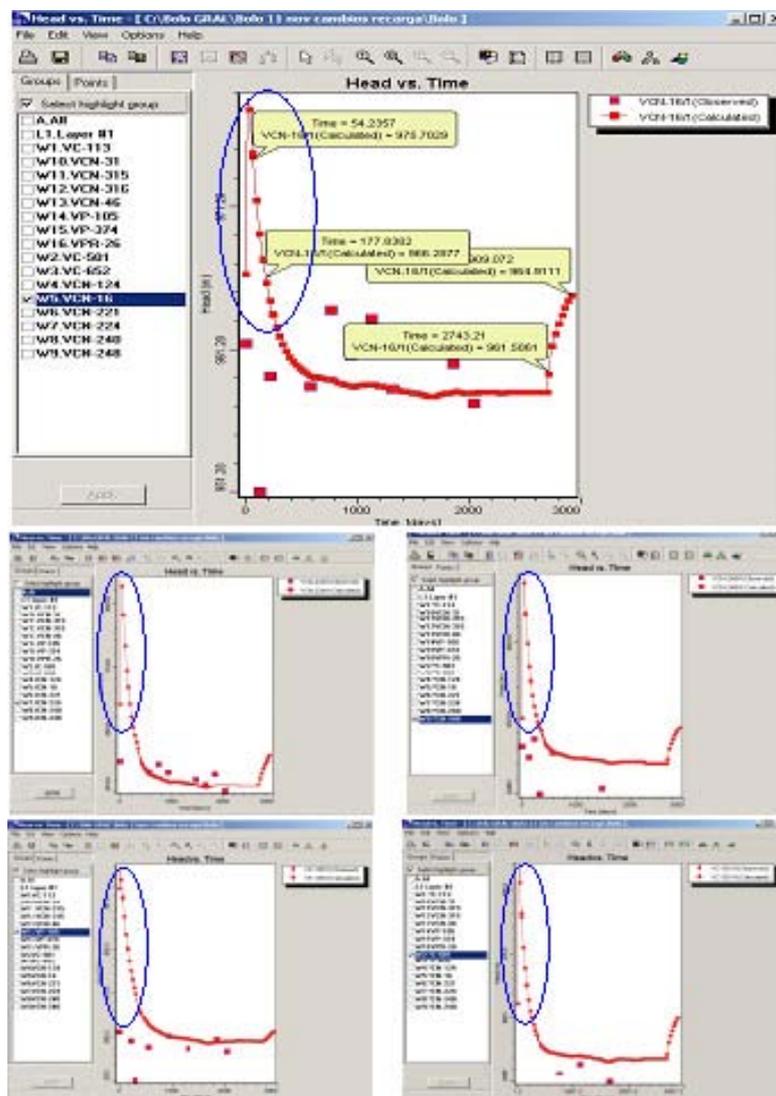


FIG. 13. Variación de los niveles medidos y calculados en cinco pozos de calibración.

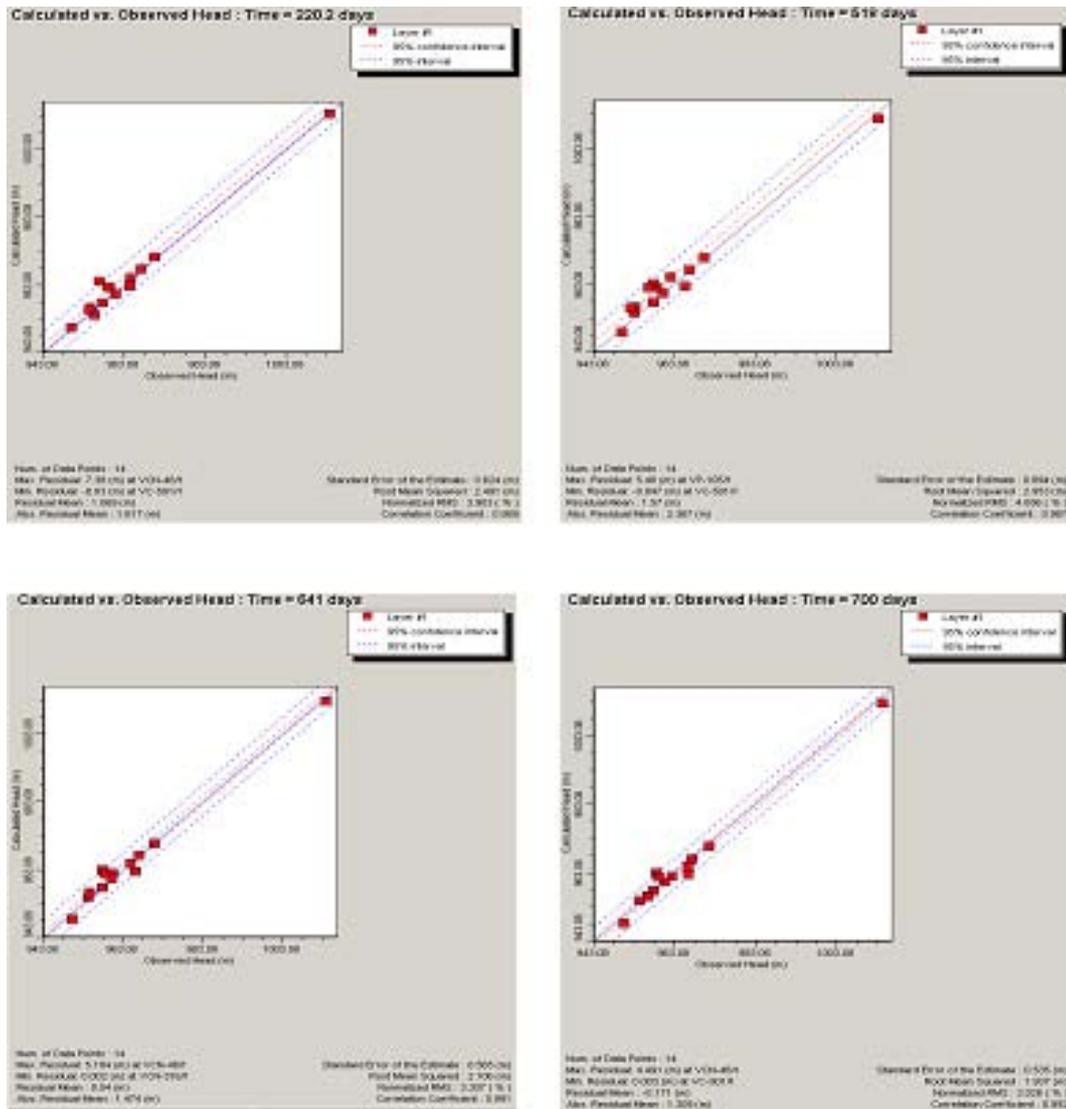


FIG. 14. Estadísticas régimen no permanente para 220, 518, 608 y 700 días.

8. Conclusiones

Existe un acuífero multicapa con dos niveles superior e inferior A y C bien definidos en las proximidades del río Cauca con una zona de transición correspondiente a la parte baja de los conos aluviales. En la parte media y alta de los conos aluviales no hay una diferenciación de los dos niveles. La hidrogeoquímica no muestra procesos de mineralización importantes en toda el área de estudio. Sólo se presenta alguna actividad no muy importante de intercambio catiónico en los sedimentos de la llanura aluvial del río Cauca por el mayor contenido de arcilla monmorilloníticas.

Los iones mayoritarios presentes en el agua subterránea están relacionados directamente con la composición mineralógica de las rocas que conforman los acuíferos.

Los contenidos altos de cloruros y sodio encontrados por encima de los valores medios del agua subterránea de la zona, en los pozos más profundos y en algunos pozos relativamente someros (100 a 150 m de profundidad) en el sector de Yumbo, están asociados a la recarga de acuíferos a través de los sedimentos del terciario (hipótesis) de origen marino o al mayor tiempo de residencia.

El estudio de hidrogeoquímica y los resultados de los análisis isotópicos muestran que el nivel superior A tiene una recarga muy rápida que ocurre a través del sistema de fallas y las partes altas de los conos aluviales y no hay una recarga importante por infiltración en la zona plana. La evaluación de

la conductividad del agua muestra una recarga importante a través de los cauces de los ríos Amaimé y Zabaletas el sector norte de la zona de estudio donde hay un mayor predominio de sedimentos permeables asociados a los cauces de estos ríos y una recarga muy rápida.

La recarga del nivel inferior C es lenta y se presume que ocurre como un tránsito lento desde el nivel superior del acuífero y eventualmente (hipótesis) a través de los sedimentos del terciario de origen marino que subyacen a los sedimentos del Cuaternario.

El modelo hidrogeológico conceptual obtenido del estudio hidrogeológico realizado con la ayuda de las técnicas isotópicas permitirá iniciar el proceso de modelación del sistema acuífero, optimizar el aprovechamiento de las aguas subterráneas y avanzar en la gestión integral del recurso hídrico superficial y subterráneo en el departamento del Valle del Cauca.

En esta primera etapa de modelación del sistema acuífero se ha obtenido una correlación aceptable entre las cabezas observadas y simuladas en un buen porcentaje del área. No obstante es necesario trabajar más en los aspectos relacionados con las condiciones de contorno, la revisión espacial de los parámetros hidráulicos del acuífero, definir una red de pozos de monitoreo para tener información mensual de los consumos y niveles del agua en los próximos tres años (ya se definió la red y empezó el monitoreo) y revisar periódicamente la conceptualización del modelo para realizar los ajustes correspondientes. El trabajar en la modelación del acuífero, independientemente de los resultados obtenidos en la calibración y validación ha sido muy importante para mejorar el conocimiento sobre la dinámica del sistema acuífero y poder tomar las decisiones más apropiadas en los permisos de aprovechamiento del agua subterránea en la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC quiere expresar sus más sinceros agradecimientos al IAEA por la oportunidad que nos dio de participar el proyecto en especial a la Dra. Laurence Gourcy y al Dr. Edmundo García; al Dr. Jean-Denis Taupin por sus enseñanzas en las técnicas isotópicas, por el apoyo recibido y su interés en nuestro trabajo, al Dr. Carlos Espinosa de la Universidad de Chile por sus enseñanzas y colaboración permanente en la modelación de acuíferos, a todo el personal técnico del INGEOMINAS por la Coordinación Nacional del Proyecto, particularmente a la Dra. María Consuelo Vargas. Ella merece todo nuestro reconocimiento por su trabajo y gratitud por el apoyo que nos brindó. A los compañeros de Colombia y demás países participantes en el proyecto por sus comentarios y sugerencias durante los talleres de coordinación.

REFERENCIAS

- [1] Álvarez, A.O y Tenjo, S. 1971. Hidrogeología del Valle del Cauca entre Santander de Quilichao y el Río Sonso, informe CVC, 53-96
- [2] Azcuntar, O. 1992. Evaluación, Control y Manejo del Agua Subterránea., Informe CVC, 48-56.
- [3] Custodio E y M.R. Llamas, 1983. Hidrología Subterránea. Editorial Omega, Segunda Edición. Tomos I y II.
- [4] Chapalle. F.H. 1992. Ground Water – Microbiology and Geochemistry. John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Hirata, R. 2002. Evolución Química de las Aguas Subterráneas. Universidade de Sao Paulo.
- [6] Manzano. M. 2002. Hidrogeoquímica. II Curso Hispanoamericano de Hidrología Subterránea.
- [7] Usunoff. E. 2002. Química del agua subterránea. II Curso Hispanoamericano de Hidrología Subterránea.
- [8] Medina, G. 2002. Plan de Manejo para la Protección de las Aguas Subterráneas en el Valle del Cauca, informe CVC. 16-29.
- [9] Hounslow, A.W., Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publisher, CRC Press, Boca Raton, Florida (1995) 397p.

Exploración de Aguas Subterráneas en Maicao (Colombia) Mediante Técnicas Hidroquímicas e Isotópicas

L.E. Toro^a, J. Calderón^a, J.D. Taupin^c, M.C. Vargas Quintero^b

^a CORPOGUAJIRA, Riohacha, Colombia

^b INGEOMINAS, Bogotá, Colombia

^c IRD, Quito, Ecuador

Resumen. Se ha llevado a cabo en Maicao (Colombia) un estudio combinado de hidrogeología, hidroquímica e isotopía (deuterio, oxígeno-18, tritio, carbono-13 y radiocarbono) en el marco del proyecto RLA/8/031. El área de estudio abarca 650 kilómetros cuadrados y comprende tres acuíferos: Cretácico (calizas) ubicado al sur de la falla de Oca; Terciario (sedimentos marinos semiconsolidados) y Cuaternario (sedimentos aluviales, principalmente), localizados al norte de la falla de Oca. La elevación del terreno varía entre 40 y 600 m.s.n.m. Se han encontrado tres tipos de agua subterránea: el primero, de baja salinidad ($CE < 900 \mu\text{S/cm}$) y edad reciente (menos de 50 años) se encuentra en el acuífero Cretácico y en un sector del acuífero Cuaternario adyacente al río Carraipía (principal corriente superficial del área de estudio). El segundo, de moderada mineralización, isotópicamente empobrecido respecto al primer grupo, y de edad antigua (más de 7000 años), se encuentra en el acuífero Terciario y en los sectores norte y este del acuífero Cuaternario. El último, de baja mineralización pero edad antigua, representa el sector sur del acuífero Cuaternario. Los primeros resultados muestran que el acuífero Cuaternario (el más utilizado por la población de Maicao) tiene una baja recarga y es susceptible de agotamiento si no se toman medidas que logren su uso racional.

Abstract. A combined study of hydrogeology, hydrochemistry and environmental isotopes (deuterium, oxygen-18, tritium, carbon-13 and radiocarbon) has been carried out in Maicao (Colombia). The study area extends over 650 km² and includes three aquifers: Cretaceous aquifer (limestone) located to the south of the Oca fault; Tertiary aquifer (semi-consolidated marine sediments), and Quaternary aquifer (unconsolidated sediments of continental and transitional origin), both placed just north of the same fault (elevation between 40 and 600 m a.s.l.). Three types of groundwater have been identified. The first one, of low salinity ($EC < 900 \mu\text{S/cm}$) and recent age (less than 50 years) is located in the Cretaceous aquifer and in part of the Quaternary aquifer adjacent to Carraipia River (main superficial water body of the area). The second one, of moderate mineralization, isotopically depleted with respect to the first group, and of more than 7000 years, is represented by the Tertiary aquifer and eastern and north sectors of the Quaternary aquifer. The last one, has low mineralization ($EC < 1000 \mu\text{S/cm}$) but ancient age, and represents the south sector of the Quaternary aquifer. The first results show that the recharge of the Quaternary aquifer (the more intensively exploited) is minimum and therefore susceptible of exhaustion if no measures for a rational use of this resource are taken.

1. Introducción

La Corporación Autónoma Regional de La Guajira (CORPOGUAJIRA) ha realizado, con la asistencia técnica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OAEA) y la coordinación nacional del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), un estudio combinado de Hidrogeoquímica e Hidrología Isotópica (deuterio, oxígeno-18, tritio, carbono-13 y carbono-14) en el municipio de Maicao (Dpto. de La Guajira), en el extremo norte de Colombia (Figura 1).

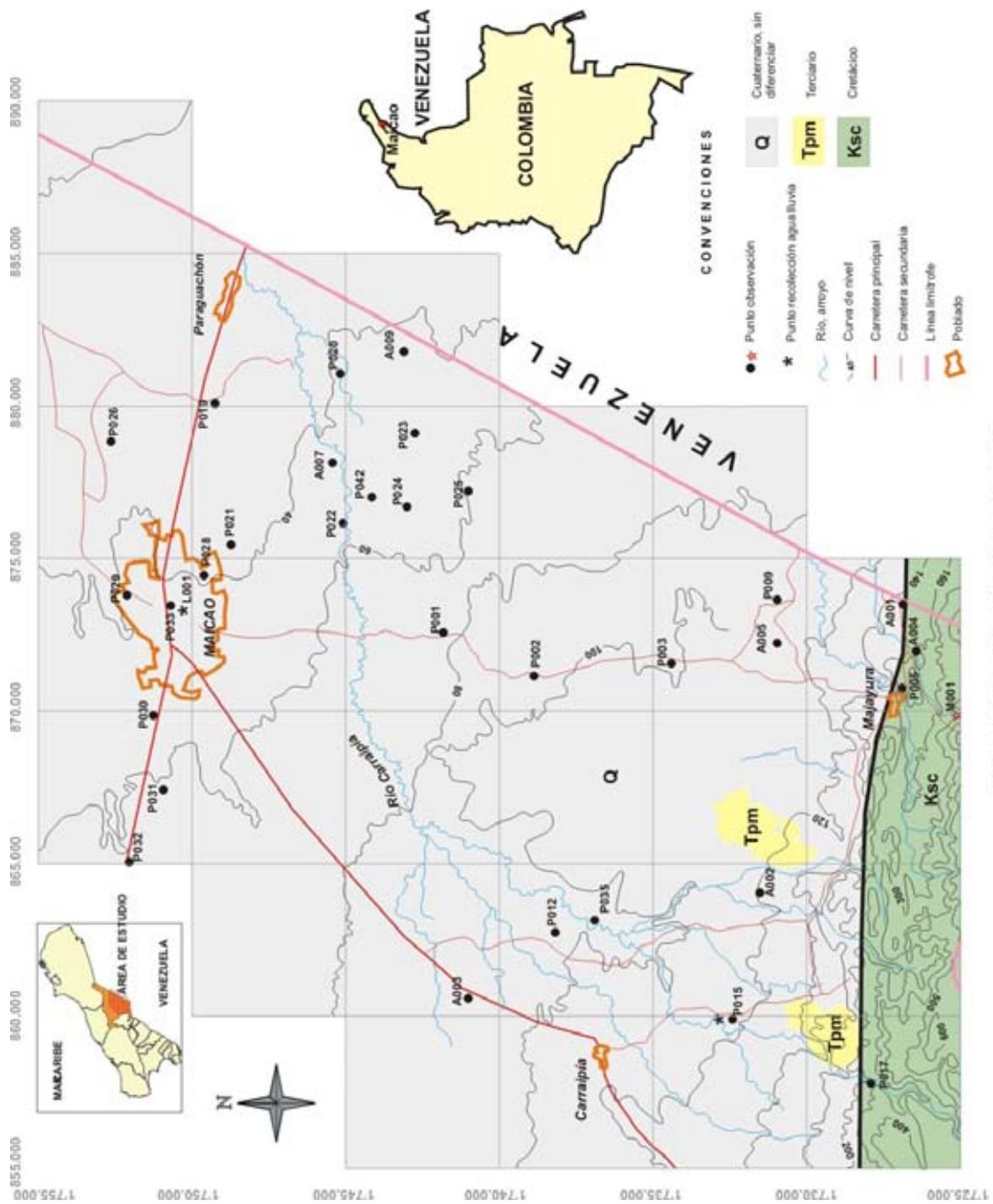


Figura 1. Mapa de localización área de estudio

Este estudio ha tenido como objetivos específicos determinar la naturaleza de los tres acuíferos presentes en Maicao, juzgar la relación entre ellos, y evaluar el papel que desempeñan los principales rasgos estructurales en los procesos de recarga. Este estudio hace parte de la formulación del Primer Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de Maicao, y es pieza clave en el proceso de fortalecimiento institucional que está viviendo Colombia respecto a la administración de sus recursos hídricos subterráneos.

El municipio de Maicao ocupa parte de la denominada Media Guajira; su población estimada es de 130.000 habitantes, 80% de los cuales habita en el área urbana [1]. Esta región se caracteriza por su alto índice de aridez. Rasgos comunes son la escasez de cuerpos superficiales de agua y la dificultad al acceso continuo de agua potable. La red de acueducto actualmente satisface a menos del 50% de las necesidades de agua de la población, de ahí la proliferación de pozos privados en la zona urbana, muchos de ellos perforados sin haber seguido un estricto control técnico. En la actualidad, estos pozos captan aguas no aptas para consumo humano.

2. Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende 650 kilómetros cuadrados, ubicados entre los meridianos W 72° 05' y W 72° 25', y los paralelos N11° 09' y N11° 25'. Su superficie es predominantemente plana con cotas entre 30 y 150 msnm, excepto al sur en donde aparece la Serranía del Perijá, con cotas hasta 600 msnm. La mayor corriente superficial es el río Carraipía, la cual es intermitente, con dos periodos secos entre enero – abril y junio – agosto. Su caudal promedio es $1.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, siendo su máximo histórico $48.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [2].

El clima es semiárido; el régimen de precipitación es bimodal, con los periodos de lluvia comprendidos entre los meses de abril a junio, y agosto a diciembre, y una precipitación anual entre 500 mm al norte y 1100 mm al sur. La temperatura media es 27° C. La humedad relativa media es del 76%, y la evapotranspiración estimada es de 1600 mm por año [3].

El principal rasgo estructural corresponde a la falla de Oca (de tipo dextro lateral), la cual cruza la zona de estudio de este a oeste en el sector sur (Figura 1). Esta falla separa las rocas del Mesozoico (al sur) de las del Terciario y sedimentos recientes (al norte). Tres unidades hidrogeológicas están presentes en el área de estudio (Figuras 1 y 2):

Grupo Calcáreo (Ksc) de edad Cretácica, conformado por calizas masivas, muy fracturadas, que constituyen la Serranía del Perijá. La transmisividad varía entre $292 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ y $1172 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, y el coeficiente de almacenamiento es del orden de 5×10^{-3} [4]. El agua presenta una conductividad inferior a $700 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$.

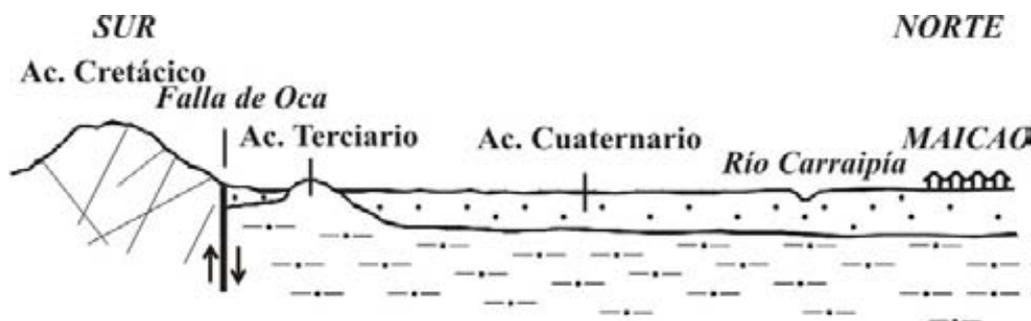


FIG.2. Perfil esquemático área de estudio.

Formación Monguí (Tmp) de edad Terciaria, conformada por sedimentos de origen marino. En el área de estudio, esta formación aflora como pequeñas colinas justo al norte de la Falla de Oca. En el sector oriental la secuencia es predominantemente arcillosa, mientras que al extremo occidental aparecen niveles arenosos y conglomeráticos intercalados con arcillas. En su zona de recarga (al suroeste de la zona de estudio) el agua presenta conductividades eléctricas menores que $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y el comportamiento hidráulico es libre, con transmisividades del orden de $53 \text{ m}^2\cdot\text{d}^{-1}$. Al norte del área de estudio (zona urbana) el acuífero es 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.

Los sedimentos recientes no consolidados (acuífero Cuaternario - Q) conformados por depósitos de llanura aluvial, de cauce aluvial y dunas, reposan en forma concordante sobre la Monguí. 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 yace sobre esta unidad hidrogeológica. Su comportamiento en términos generales es libre a semiconfinado, y las transmisividades se ubican en el rango $1 \text{ m}^2\cdot\text{d}^{-1}$ a $500 \text{ m}^2\cdot\text{d}^{-1}$. El flujo regional para esta unidad hidrogeológica va de sur occidente a nororiente [5].

3. Enfoque metodológico

La hipótesis inicial de trabajo establecía que el acuífero Cuaternario presenta aguas recientes y es permanentemente recargado a través de la falla de Oca (al sur) y a través de la infiltración directa de agua lluvia en toda la zona de estudio. También se establecía que al menos parte de este acuífero podría estar sujeto a una intrusión marina activa (el 90% de los pozos existentes en Maicao – la mayoría concentrada en el casco urbano – captan aguas de este acuífero, y en algunos de los pozos, especialmente en la zona noreste, se extrae agua clorurada sódica).

Con relación al acuífero Terciario (el menos conocido de los tres), la hipótesis inicial de trabajo proponía que podía contener las aguas más antiguas, al menos en la parte norte donde mediciones aisladas de niveles han indicado un comportamiento confinado, y también establecía que no había contacto hidráulico con el acuífero Cuaternario.

Respecto al acuífero Cretácico, la hipótesis inicial de trabajo afirmaba que se trata de un sistema dinámico, con aguas recientes circulando principalmente por la red de fracturas de las calizas.

Con el fin de verificar las hipótesis planteadas, se hicieron dos campañas de muestreo fisicoquímico (una en época de sequía, y la otra en periodo de lluvias) y una campaña de muestreo isotópico en Febrero 2003.

Treinta y cinco pozos y un manantial fueron muestreados para análisis fisicoquímico (29 del acuífero Cuaternario, 3 del Terciario y 4 del Cretácico). Las determinaciones analíticas fueron hechas en el campo y en los laboratorios de CORPOGUAJIRA e INGEOMINAS. En el laboratorio de la Corporación se hicieron determinaciones de dureza total, dureza cálcica, cloruros, alcalinidad (bicarbonatos), sulfatos, nitratos, nitritos, fosfatos, hierro total, sílice, manganeso, turbiedad y sólidos disueltos totales (SDT). El magnesio se estimó a partir de la diferencia entre las durezas total y cálcica. Las determinaciones de sodio y potasio fueron hechas en el laboratorio de INGEOMINAS. En el laboratorio de la Corporación también se hicieron determinaciones de potasio, con resultados similares a los reportados por INGEOMINAS.

Treinta pozos fueron muestreados para deuterio y oxígeno-18. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). También fueron muestreados 13 pozos para carbono-13 y radiocarbono y 11 para tritio. Todos estos pozos contaron con los respectivos análisis fisicoquímicos. Los análisis de radiocarbono en el carbón inorgánico disuelto fueron realizados

en el laboratorio de radiocarbono de Montevideo (Uruguay). Parte del precipitado obtenido fue enviado al CCHEN para el respectivo análisis de carbono-13.

Las determinaciones de tritio se hicieron en los laboratorios del USGS, USA y en el laboratorio de Tritio Ambiental del Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) en Belo Horizonte, Brasil.

Adicionalmente, se tomaron 22 muestras compuestas mensuales de agua lluvia recolectadas en dos estaciones pluviométricas dentro del área de estudio, para análisis de deuterio y oxígeno-18 (a cinco de ellas les fue medido tritio), y cuatro muestras del río Carraipía también para análisis de deuterio y oxígeno-18. Estos análisis isotópicos fueron realizados en el OIEA. La tabla 1 presenta información relevante respecto a los puntos de muestreo.

4. Resultados

4.1. Hidroquímica

La Tabla 2 presenta los resultados más importantes de las determinaciones químicas. En esencia, dos tipos de agua predominan en Maicao (Figuras 3 y 4): el primero corresponde a aguas bicarbonatadas cálcicas de baja mineralización ($CE < 900 \mu S \cdot cm^{-1}$), obtenidas en los pozos del Cretácico y en las captaciones del Cuaternario ubicadas en cercanías al cauce actual del río Carraipía. Estas muestras son del mismo tipo que la del río Carraipía (R001, R002 y R003), aunque levemente enriquecidas en sodio y cloruro, posiblemente debido al lavado de sales depositadas en el suelo. La similitud entre las aguas de estos pozos y la del río sugiere no sólo la recarga desde éste, sino también que la infiltración es relativamente rápida (poco tiempo para disolución de minerales). Lo último no es de extrañar en el acuífero Cretácico, pues su porosidad predominante es secundaria (fracturas).

El segundo tipo de agua, el cual predomina hacia el sector noreste y norte del área de estudio, corresponde a aguas cloruradas sódicas. Estos dos sectores del área de estudio son precisamente los más cercanos a la línea de costa actual (el Golfo de Venezuela se halla de Paraguachón a veinte kilómetros). A este tipo de agua pertenecen el pozo del Terciario (la Formación Monguí es marina) y los pozos del Cuaternario relativamente alejados del cauce actual del río Carraipía.

Las muestras P009 y A005 (ubicadas al sur del acuífero Cuaternario) son de baja mineralización y de tipo bicarbonatado cálcico (como el primer grupo), pero como se verá en el siguiente numeral, difieren de éste desde el punto de vista isotópico. A medida que se avanza hacia el norte, la conductividad eléctrica de las aguas aumenta (muestras P003 y P002), y el contenido de cloruros y sodio toma más importancia (Figura 4). La muestra A001 (al extremo sureste) corresponde a un aljibe emplazado en un depósito aluvial íntimamente relacionado con una corriente que desciende de la serranía de Perijá y, por tanto, exhibe el mismo tipo de agua que el acuífero Cretácico.

Cabe destacar los bajos valores de nitratos, nitritos y amonio encontrados en los pozos P028, P029 y P030 ($NO_3^- < 1.7 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ como NO_3^- , $NO_2^- < 0.02 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ como NO_2^- , $NH_4^+ < 1.6 \text{ mg} \cdot L^{-1}$). Estos pozos se ubican en la zona urbana, y siguen la tendencia encontrada por CORPOGUAJIRA en más de veinte pozos evaluados en la ciudad de Maicao. La profundidad del nivel freático allí suele estar entre 25 y 35 metros. Si se tiene en cuenta que las especies nitrogenadas en el agua subterránea pueden servir como indicador de contaminación por aguas residuales domésticas, y que al año 2004 sólo el 30% del casco urbano de Maicao está conectado a una red de alcantarillado, entonces se deduce que al menos la conductividad hidráulica vertical de los sedimentos cuaternarios es muy baja.

Entre los días 1 y 26 de diciembre de 2003 (época de lluvias) se muestrearon de nuevo los pozos P026, P028, P029, P030 y P033, no encontrándose cambios significativos en la composición química.

TABLA 1. ESTACIONES DE MUESTREO

Estación	Tipo muestreo	Prof. muestreo (metros)	X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	Sitio
P001	Cuaternario	15 - 60	872,435	1,741,920	52	Guayabita
P002	Cuaternario	15 - 60	871,133	1,738,781	55	La Sabana
P003	Cuaternario	15 - 60	871,501	1,734,333	78	La Cochinerá
P005	Cretácico	33 - 78	870,667	1,727,003	142	Base Militar Majayur
P009	Cuaternario	15 - 65	873,656	1,730,814	110	El Divino Niño
P012	Cuaternario	20 - 60?	862,679	1,738,193	99	Wamayao
P015	Cuaternario	10 - 40?	859,914	1,732,445	119	Colegio Carraipía
P017	Cretácico	15? - 115	857,816	1,727,964	197	P6A (acueducto)
P019	Cuaternario	15 - 60	880,158	1,749,140	35	Cauciarijuna
P020	Cuaternario	15 - 60	880,995	1,745,185	38	Gollo
P021	Cuaternario	15-60	875,333	1,748,996	62	Puipuren
P022	Cuaternario	15 - 60	876,160	1,745,043	58	Carrero
Estación	Tipo muestreo	Prof. muestreo (metros)	X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	Sitio
P023	Cuaternario	15 - 60	879,176	1,742,782	56	Cuatro Bocas
P024	Cuaternario	15 - 60	876,613	1,742,801	61	Casa de Tabla
P025	Cuaternario	15 - 60	877,170	1,741,090	63	Pulikumana
P026	Cuaternario	40 - 46	878,991	1,752,516	40	Jepén
P028	Cuaternario	27 - 58	874,343	1,749,584	52	La Floresta
P029	Cuaternario	32 - 57	873,731	1,751,943	53	San Agustín
P030	Cuaternario	31 - 67	869,816	1,751,123	70	Los Laureles
P031	Cuaternario	13 - 30	867,395	1,750,829	70	La Paz
P032	Cuaternario	20 - 60	865,067	1,751,948	71	Km 67
P033	Terciario	80 - 115	873,658	1,750,346	50	Edificio Hamer
P035	Cuaternario	20 - 40	862,876	1,736,096	92	Finca El Cielo
P042	Cuaternario	20 - 40	877,042	1,743,937	45	Molino Nuevo
P047	Terciario	120 - 165	870,217	1,750,648	50	Hospital Nuevo
P049	Cuaternario	37 - 70	880,709	1,746,369	41	PozObs 02
A001	Cuaternario	02 - 08	873,486	1,726,860	135	La Victoria
A002	Cuaternario	06 - 08	860,899	1,731,509	125	La Fe
A003	Cuaternario	36 - 47	860,741	1,741,090	90	El Descanso
A004	¿Cretácico?	04 - 06	871,891	1,726,445	159	El Bulloso
A005	Cuaternario	15 - 20	872,063	1,730,756	120	El Pozo
A007	Cuaternario	28-33	878,245	1,745,235	60	Villa Fátima
A009	Cuaternario	25-32	881,567	1,743,157	46	Rosa María 01
A011	Cuaternario	20-26	875,623	1,747,243	49	Pirulo
A016	Cuaternario	31 - 35	878,140	1,741,674	56	México
R001	Río Carraipía		857,815	1,728,100	175	Bocatoma
R002	Río Carraipía		860,000	1,734,500	115	Puente a Colegio
R003	Río Carraipía		880,697	1,746,489	38	Monterrey
L001	Lluvia		872,665	1,749,400	45	Tanque Maicao
L002	Lluvia		859,936	1,732,506	118	Colegio Agrícola
M001	Cretácico		869,789	1,725,138	300	Finca La Granjita

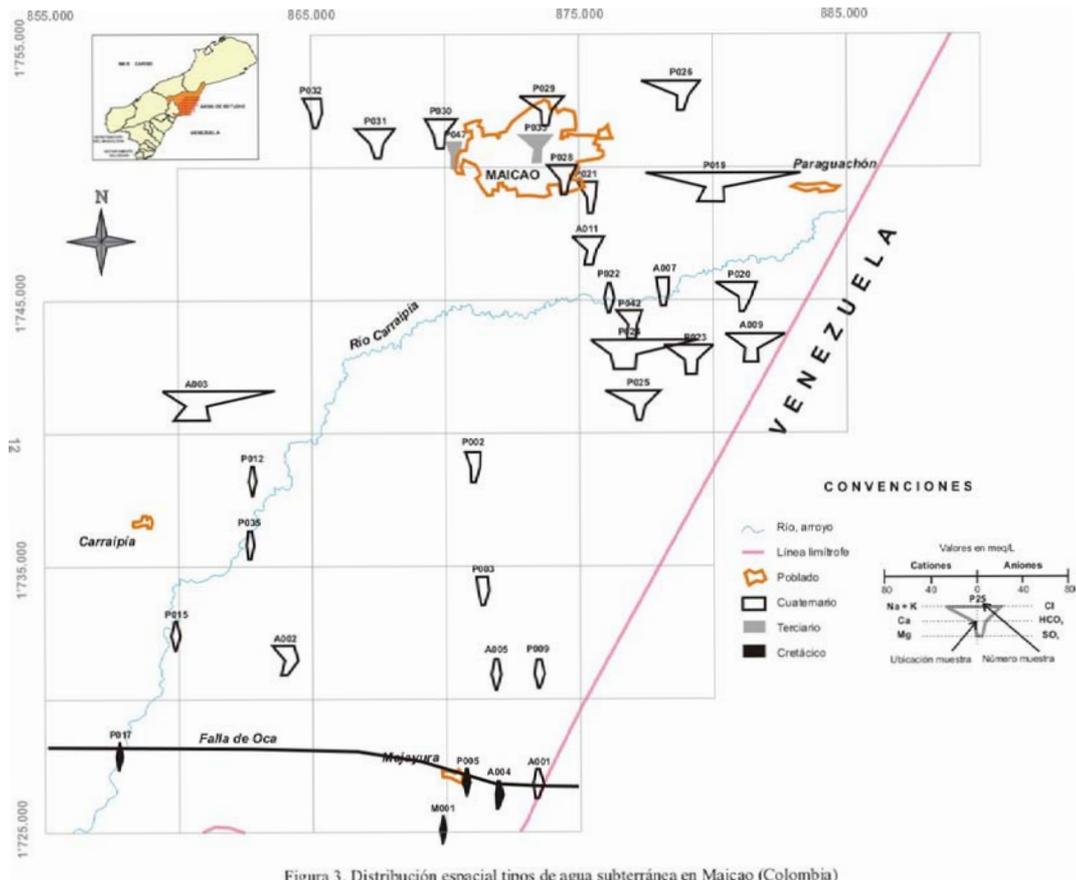


Figura 3. Distribución espacial tipos de agua subterránea en Maicao (Colombia)

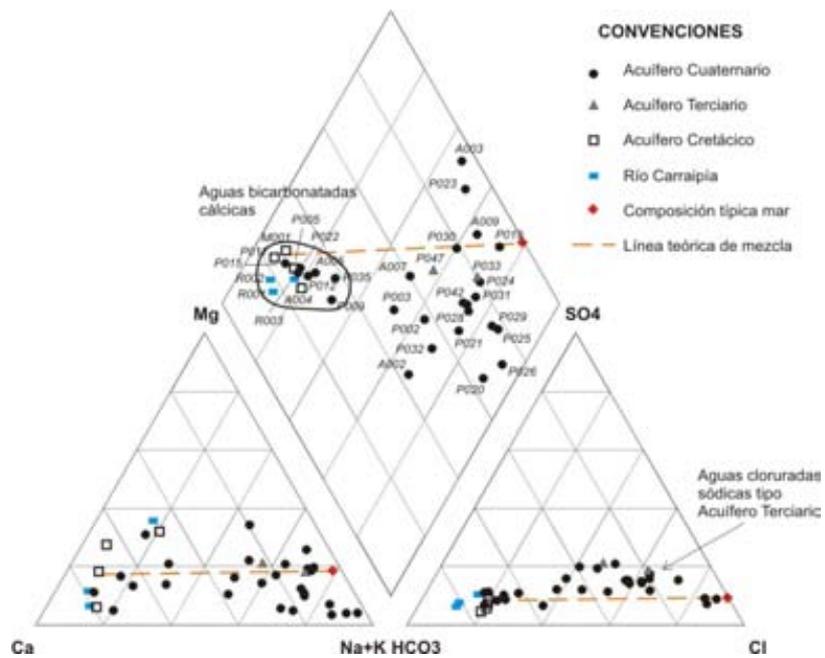


FIG. 4. Tipos de agua presentes en Maicao.

TABLA 2. PRINCIPALES RESULTADOS QUÍMICOS. CONCENTRACIONES EN MG·L⁻¹

Muestra	Fecha muestreo	CE μS/cm	T °C	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	NO ₂
P003	10-dic-03	1652	29.8	7.2	110.4	17.5	171	4.52	219	495	90	3.6	0.31
P005	25-feb-03	802	28.1	6.9	116.0	4.9	25	1.80	60	371	28	1.1	0.04
P009	10-dic-03	1030	28.4	7.0	106.4	15.8	71	0.92	90	442	50	2.1	0.04
P012	24-feb-03	597	28.9	7.6	95.2	3.4	30	1.10	50	266	23	0.1	0.02
P015	24-feb-03	638	28.1	7.1	109.6	9.2	19	0.88	55	356	24	1.3	0.06
P017	24-feb-03	596	25.6	7.4	88.0	21.9	12	0.64	50	336	14	1.1	0.03
P019	26-feb-03	11600	30.7	7.0	224.0	264.9	2000	4.78	3800	634	524	1.1	0.09
P020	26-feb-03	3180	32.4	7.4	44.0	14.1	710	1.44	710	811	194	0.7	0.01
P021	17-dic-03	2380	30.7	7.57	70.4	25.8	384	1.31	395	505	216	1.2	0.02
P022	26-feb-03	771	32.1	7.0	116.0	17.0	34	0.80	60	394	47	1.0	0.13
P023	26-feb-03	9020	30.4	6.7	480.0	243.0	1110	3.78	3000	508	319	5.5	0.01
P024	26-feb-03	4250	28.9	7.0	140.0	64.6	750	2.78	1020	558	371	1.1	0.03
P025	26-feb-03	3800	29.3	7.2	100.8	16.5	910	1.74	1000	595	231	0.4	0.01
P026	26-feb-03	4170	31.7	7.6	30.4	20.9	1060	0.89	940	762	295	0.9	0.01
P028	26-feb-03	2580	30.8	7.1	81.6	33.0	450	1.94	590	506	206	1.7	0.01
P029	25-feb-03	3460	31.5	7.3	71.2	28.6	700	0.40	870	578	262	0.4	0.02
P030	25-feb-03	2860	31.5	7.2	160.0	51.0	420	2.36	750	427	242	0.2	0.01

Muestra	Fecha muestreo	CE μS/cm	T °C	pH	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃	SO ₄	NO ₃	NO ₂
P031	26-feb-03	3360	30.7	7.0	153.6	18.5	600	1.76	810	537	253	1.3	0.06
P032	25-feb-03	1692	31.0	7.1	100.0	12.2	320	1.92	300	602	158	0.8	0.26
P033	26-feb-03	3240	28.8	7.4	81.6	75.8	580	1.00	780	437	302	0.9	0.07
P035	10-dic-03	805	29.7	7.3	87.2	21.4	58	0.54	78	300	39	1.4	0.08
P042	7-sep-04	2820	30.2	7.2	50.2	55.6	402	1.59	517	498	279		0.74
P047	15-sep-04	2830	32.3	7.1	93.0	50.4	268		381	439	226		0.05
A001	25-feb-03	932	27.2	6.9	107.2	37.9	40	1.74	65	464	53	0.5	0.01
A002	24-feb-03	2280	30.2	7.7	37.6	79.2	398	6.38	335	891	75	1.7	0.34
A003	24-feb-03	10440	27.7	7.0	420.0	437.4	1140	3.92	3199	293	412	1.5	0.04
A004	25-feb-03	985	27.2	7.2	98.4	39.4	47	4.40	75	461	27	1.2	0.06
A005	10-dic-03	884	29.0	7.0	128.9	15.6	51	1.03	88	405	39	1.3	0.08
A007	8-sep-04	1707	30.0	7.1	117.0	33.4	203	5.11	254	422	162		0.31
A009	8-sep-04	5320	30.5	7.0	166.7	128.3	761	1.40	1488	447	412		1.25
A011	7-sep-04	3230	31.3	7.2	47.8	68.0	489	1.94	668	549	229		1.32
R001	1-dic-03	539	24.8	8.3	98.4	4.4	18	0.88	25	310	17	3.3	0.13
R002	1-dic-03	539	25.6	8.2	92.0	7.8	13	1.68	25	298	20	2.4	0.07
R003	1-dic-03	538	27.4	8.2	55.2	24.8	22	2.20	33	261	27	2.4	0.08
M001	25-feb-03	594	24.6	7.9	93.6	14.1	15	0.40	50	306	27	1.2	0.01

4.2. Isotopía

4.2.1. Deuterio y oxígeno-18

La Línea Meteorica Local (LMWL) obtenida en el presente estudio para Maicao tiene por ecuación:

$$\delta^2H = 8.50(\pm 0.24) \cdot \delta^{18}O + 11.3(\pm 1.2) \quad (1)$$

que se puede comparar con la ecuación de la Línea Meteorica Global (GMWL) estimada por Rozanski et al. [6]:

$$\delta^2H = 8.17(\pm 0.07)\delta^{18}O + 13.07(\pm 0.65) \quad (2)$$

La LMWL fue obtenida a partir de veintidós análisis de sendas muestras mensuales compuestas obtenidas en dos estaciones (L01=Maicao y L02=Carraipía). El coeficiente de correlación de la línea es 0.99. La Tabla 3 contiene los respectivos resultados analíticos.

TABLA 3. DEUTERIO Y OXÍGENO-18 AGUA DE LLUVIA. DATOS EN ‰ VS VSMOW (L01-MAICAO; L02 – CARRAIPÍA)

MUESTRA	FECHA	$\delta^{18}O$	δ^2H	PROYECTO
ING	Nov-77	-5.9	-37.1	ING-TNO
L01_01	Oct-02	-5.3	-32.9	RLA/08/031
L002_03	Dic-02	-2.6	-9.5	RLA/08/031
L01_05	Dic-02	-3.9	-19.6	RLA/08/031
L01_07	Abr-03	-3.4	-17.6	RLA/08/031
L02_08	Abr-03	-5.7	-37.4	RLA/08/031
L02_10	May-03	-5.0	-33.8	RLA/08/031
L01_11	Jun-03	-7.0	-50.0	RLA/08/031
L02_12	Jun-03	-9.1	-64.7	RLA/08/031
L02_14	Jul-03	-4.5	-27.5	RLA/08/031
L02_16	Ago-03	-2.8	-13.3	RLA/08/031
L01_17	Sep-03	-3.8	-19.2	RLA/08/031
L02_18	Sep-03	-3.8	-20.8	RLA/08/031
L01_19	Oct-03	-4.8	-26.8	RLA/08/031
L02_20	Oct-03	-3.4	-15.8	RLA/08/031
L01_21	Nov-03	-4.9	-29.8	RLA/08/031
MUESTRA	FECHA	$\delta^{18}O$	δ^2H	PROYECTO
L02_22	Nov-03	-4.2	-21.2	RLA/08/031
L01_23	Ene-04	-4.7	-28.7	RLA/08/031
L01_24	May-04	-11.4	-85.5	RLA/08/031
L01_25	Jul-04	-3.9	-28.7	RLA/08/031
L01_26	Ago-04	-2.7	-13.9	RLA/08/031
L01_27	Sep-04	-5.4	-34.2	RLA/08/031

La Figura 5 presenta las concentraciones obtenidas para los pozos y el río Carraipía. En términos generales, las muestras se ajustan bien a la Línea Meteorica Local. Dos grupos de aguas (arbitrariamente denominados A y B) se diferencian isotópicamente:

El grupo A presenta concentraciones isotópicas que varían entre -4.2‰ y -3.5‰ para el oxígeno-18, y entre -22.2‰ y -18.7‰ para el deuterio. Los valores de exceso de deuterio (d) fluctúan entre $+8.6\text{‰}$ y $+12.1\text{‰}$, siendo su valor promedio 10.2‰ , con una desviación estándar de $\pm 1.1\text{‰}$. Las muestras tomadas del río Carraipía presentan una composición isotópica similar a los valores obtenidos para este grupo. Esto significa que al menos una parte importante del agua subterránea correspondiente a los pozos del Grupo A tiene su origen en las aguas de esta corriente superficial.

El Grupo B muestra contenidos isotópicos en el rango -4.3‰ a -4.8‰ para ^{18}O , y 24.3‰ a -29.8‰ para el deuterio. Los valores de exceso de deuterio (d) varían de 6.8‰ a 11.3‰ , siendo su valor promedio 9.4‰ , con una desviación estándar de $\pm 1.1\text{‰}$. En este grupo se incluye la muestra P33, la cual procede del acuífero Terciario.

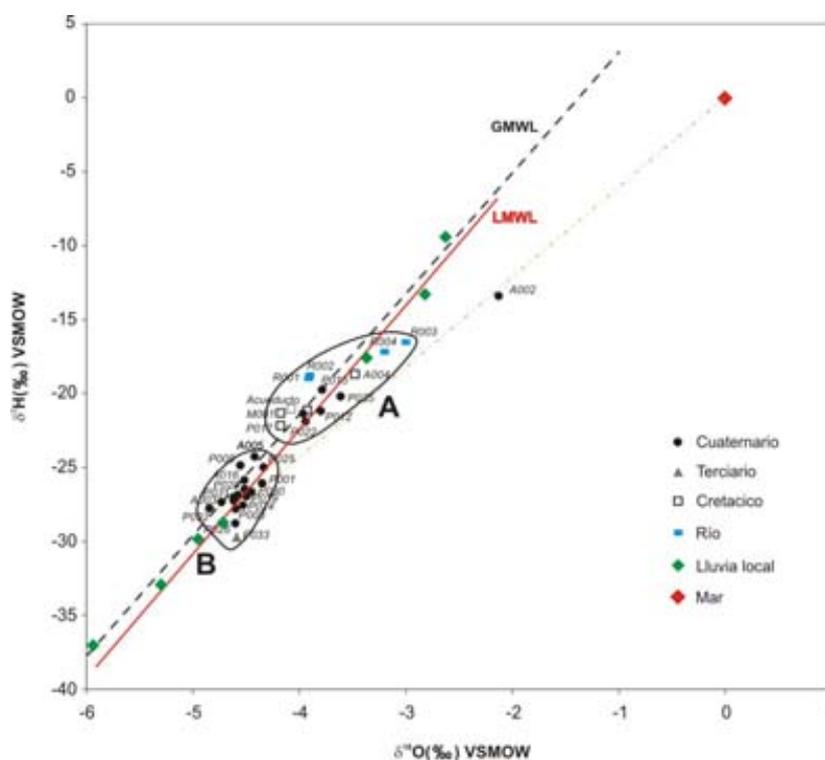


FIG. 5. Contenidos de deuterio y oxígeno-18 en la zona de Maicao.

Una razón probable que explique el empobrecimiento isotópico del Grupo B respecto del A es que las condiciones climáticas inherentes al proceso de recarga para cada grupo hayan sido lo suficientemente diferentes como para imprimir firmas isotópicas distintas. Cualquier cambio climático significativo durante un periodo de tiempo largo comparado con el tiempo de duración de las variaciones estacionales locales, dará lugar a un cambio en el contenido de deuterio y oxígeno-18 [7]. Si bien no se conoce una reconstrucción del paleoclima en la zona de estudio, se sabe que el último cambio climático a escala mundial tuvo lugar hace 5000 años [8][9]. Numerosos trabajos en acuíferos conteniendo paleoaguas revelan contenidos de deuterio y oxígeno-18 más negativos comparados con acuíferos cercanos y de recarga reciente. Por tanto, en forma preliminar se podrían asociar las muestras del grupo B con aguas más antiguas respecto a las muestras del grupo A, aunque hay que anotar que la diferencia existente entre los dos grupos no es muy grande.

Todas las muestras que conforman el grupo A son de tipo bicarbonatada cálcica de baja mineralización (pozos del acuífero Cretácico y pozos del acuífero Cuaternario ubicados cerca del cauce actual del río Carraipía). En contraste, todas las muestras del Grupo B son cloruradas sódicas, excepto A005 y P009. Las dos muestras citadas están ubicadas al sur del área de estudio, justo al norte de la falla de Oca. La muestra A002 difiere ostensiblemente de los grupos A y B; esta muestra corresponde a un aljibe emplazado en el Cuaternario, pero muy cerca de los afloramientos del Terciario. Dos posibles hipótesis pueden argumentarse a partir de la figura 5: mezcla con agua de mar o evaporación. La firma química de esta muestra parece no corresponder con la primera hipótesis, ya que es bicarbonatada sódica (no clorurada sódica).

4.2.2. *Tritio y radiocarbono*

El valor promedio de tritio, para el análisis de cinco muestras compuestas mensuales de agua lluvia obtenidas en la zona de estudio es 1.1 UT (con una desviación estándar de 0.2 UT). La tabla 4 presenta los resultados de tritio, carbono-13 y radiocarbono obtenidos en este estudio. A partir de esta tabla, es evidente que las muestras P005 y M001 (del acuífero Cretácico), y P012 y P015 (del acuífero Cuaternario, cerca al río Carraipía) corresponden a aguas recientes (edades menores que 50 años), y la muestra P017 (acuífero Cretácico) debe tener al menos una fracción importante de agua reciente. Todas estas muestras están incluidas en el Grupo A descrito en el numeral anterior y, por ende, también corresponden a aguas bicarbonatos cálcicas de baja mineralización.

En contraposición, todas las muestras rotuladas en el Grupo B y datadas han demostrado ser aguas antiguas, con actividades de radiocarbono menores que 38 pCM. Como es bien sabido, la disolución de calcita y dolomita por parte del agua subterránea a datar, diluye la concentración de ^{14}C dando como resultado edades más “viejas” que las reales. Para verificar si este fenómeno se da en los acuíferos de Maicao, se ha medido el carbono-13 en las muestras datadas con radiocarbono.

Por definición, los carbonatos de origen marino tienen un valor de $^{13}\text{C} = 0\%$. El valor de ^{13}C para las aguas infiltradas que están alcanzando la zona saturada, y que provienen de una zona de recarga con vegetación con ciclo fotosintético de tipo C3 (como la que existe en la Serranía de Perijá), está alrededor de -15% . Por consiguiente, si el agua a datar ha diluido carbonatos marinos en forma significativa, el conjunto de muestras analizadas debe mostrar una correlación inversa entre la actividad de ^{14}C y la concentración de ^{13}C ; es decir, que las muestras con actividades menores del radiocarbono a su vez deben mostrar un enriquecimiento en ^{13}C (valores cercanos a 0%). Como se puede ver en la Tabla 4 y en la Figura 6, éste no es el caso para las muestras analizadas en este estudio.

Como la dilución de carbonatos marinos en las aguas a datar parece no jugar un papel importante en Maicao, simplemente se utilizó la ecuación básica de desintegración radioactiva del ^{14}C para tener una aproximación al tiempo de residencia promedio de las muestras. La actividad más baja corresponde a una de las muestras del acuífero Terciario (P033). Llama la atención la antigüedad de las muestras P001, P009, P019, P029 y P032 (más de 7000 años). Estas muestras tienen en común no tener actividad de tritio, y presentar un contenido en deuterio y oxígeno-18 más negativo, respecto a muestras de edad reciente analizadas en este informe.

5. **Discusión y conclusiones**

El alcance del presente trabajo es comprender, en términos generales, el comportamiento de los tres acuíferos de Maicao (así como sus interrelaciones), con miras a promulgar directivas para el aprovechamiento y protección del recurso hídrico subterráneo. Para ello se han utilizado la química y varios isótopos ambientales, tanto estables (deuterio, oxígeno-18, carbono-13) como radioisótopos (tritio y carbono-14). Estas herramientas normalmente se usan como complemento a técnicas hidrogeológicas de mayor empleo en Colombia.

TABLA 4. VALORES DE TRITIO, RADIOCARBONO Y CARBONO-13 EN LA ZONA DE MAICAO

Muestra	^{14}C pCM	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	Tritio UT	Edades estimadas
P001	24.5	-12.2	0.0	11892
P005	95.7	-14.0	1.3	Reciente
P009	29.9	-13.0	0.2	10226
P012	110.3	-13.2	1.3	Reciente
P015	107.4		1.3	Reciente
P017	85.5	-14.2	1.4	1503 a reciente
P019	34.9	-14.5	0.1	8904
P029	23.2	-13.2	0.0	12327
P032	38.0	-12.4	0.0	8235
P033	10.7	-13.5	0.1	18717
P047	30.3	-12.5		9590
P048	30.5	-12.7		9540
M001	91.0		1.6	Reciente
L02_14			1.3	
L02_16			1.1	
L02_18			1.3	
L02_20			1.1	
L02_22			0.8	

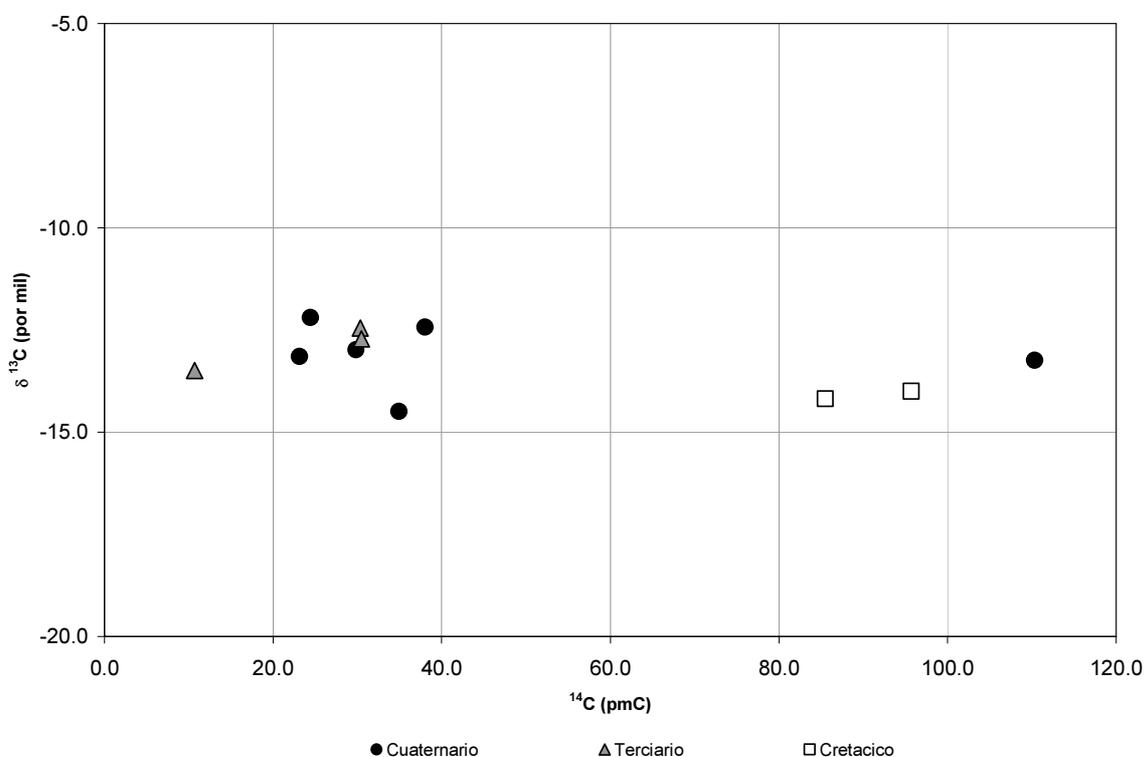


FIG. 6. Carbono-13 y radiocarbono en la zona de, Maicao.

En términos de manejo, podría decirse que en Maicao hay dos tipos de agua subterránea: una en la que su tiempo de renovación (edad) se puede contextualizar a una escala 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. Este tipo de agua se caracteriza por ser bicarbonatada cálcica de baja mineralización (conductividad eléctrica $< 900 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), y por tener concentraciones de deuterio entre -20‰ y -25‰ y de oxígeno-18 entre -3‰ y -4‰. El manantial y los pozos ubicados en las calizas cretácicas, así como los pozos cercanos al cauce actual del río Carraipía presentan aguas de esta naturaleza.

El otro tipo de agua puede denominarse “antigua”, en el sentido de que su tiempo de renovación puede ser medido en milenios (aguas con más de 7000 años de edad) y, por consiguiente, su extracción siempre implicará una reducción de las reservas. Esta agua presenta unas concentraciones de deuterio entre -25‰ y -30‰ y de oxígeno-18 entre -4‰ y -5‰. Aunque las aguas con esta firma isotópica son predominantemente cloruradas sódicas, también las hay dulces bicarbonatadas cálcicas al sur del acuífero Cuaternario (muestra P009).

Con relación al papel que desempeña la falla de Oca en la recarga del acuífero Cuaternario, parece que no es muy importante, habida cuenta de las edades tan altas que presentan las aguas subterráneas a menos de cuatro kilómetros al norte de dicha falla (P009). Una perforación reciente hecha por CORPOGUAJIRA sobre un pequeño afloramiento de la Formación Monguí, a menos de cuatro kilómetros del pozo P009 y dos kilómetros de la falla de Oca, ha revelado una secuencia de arcillas plásticas de sesenta metros de espesor. Estas arcillas afloran igualmente al sur del corregimiento de Carraipía (suroeste del área de interés) y es probable que tengan continuidad lateral justo al norte de la falla de Oca, al menos dentro del área de estudio. Si ello es así, el acuífero Terciario funcionaría como una barrera de flujo impidiendo la recarga del acuífero Cuaternario desde la falla de Oca.

De otro lado, la infiltración directa de agua lluvia parece no jugar un papel de preponderancia en la recarga del acuífero Cuaternario, bien por la escasez de lluvias, especialmente al norte del área de estudio, o por el predominio de los granos de tamaño fino en esta secuencia sedimentaria. Otra perforación realizada por CORPOGUAJIRA en el sector noreste del área de estudio ha indicado la existencia de pequeños acuíferos colgados, limitados por capas de arcilla de más de siete metros de espesor. A pesar de que buena parte de los suelos presentes en Maicao presentan una capacidad de infiltración alta [10] (dunas de arena), el agua no alcanza a llegar al nivel freático principal del acuífero Cuaternario. Las bajas concentraciones en los compuestos nitrogenados detectadas bajo el caco urbano de Maicao podrían también deberse a este fenómeno.

Con relación al río Carraipía, este estudio indica que dicha corriente superficial es el mecanismo de recarga más importante del acuífero Cuaternario, pero al parecer la recarga pierde importancia río abajo hasta desaparecer cualquier vestigio a la altura de la cota 40, en el sector noreste del área de estudio. Exploraciones geoelectricas en detalle llevadas a cabo recientemente por CORPOGUAJIRA con la Universidad de La Guajira en este sector definen un pequeño cuerpo de agua dulce entre 30 y 50 metros de profundidad, asociado al río. Por debajo de 50 metros de profundidad, los valores de resistividad indican la presencia sólo de agua salobre a salada. Adicionalmente, las concentraciones detectadas de deuterio y oxígeno-18 en las muestras cloruradas sódicas sugieren que no existe una intrusión marina actual y, por consiguiente, esta firma química puede estar más asociada al origen de formación de los sedimentos.

En resumen, la información hasta ahora obtenida indica que la recarga del acuífero Cuaternario (el más utilizado por la población de Maicao) es poca y por ende susceptible de un agotamiento si no se toman medidas que conlleven al uso racional de este recurso.

Con relación al acuífero Terciario, la información obtenida en este proyecto indica que no representa una fuente de agua dulce al menos en sus primeros 150 metros de profundidad. El mismo estudio de geoelectrica citado anteriormente apoya esta afirmación. Un sitio de interés futuro podría ser el ubicado a cinco kilómetros del extremo suroeste del área de estudio, en donde la Formación Monguí aflora, exhibiendo niveles con granulometría gruesa. Sin embargo, la zona más prometedora es la ubicada por

debajo de 200 metros de profundidad en las zonas centro y occidental del área de Proyecto, habida cuenta de información reciente de tres perforaciones realizadas en el municipio vecino de Manaure, donde ha sido posible extraer agua dulce en estratos de arenas fosilíferas ubicadas por debajo de una potente capa de arcilla. De otro lado, los afloramientos de la Formación Monguí al sur-centro y sureste del área del Proyecto son muy arcillosos y lo más probable es que allí esta formación geológica se comporte más como un acuitardo. La alta edad (más de 9.000 años) del agua de este acuífero, 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.

La presencia de tritio y la alta actividad de radiocarbono en las muestras procedentes de las calizas de la Serranía de Perijá confirman el carácter dinámico del acuífero Cretácico. Por lo menos una fracción importante de estas muestras es de edad reciente. Su baja mineralización, y la ausencia de grandes conglomerados humanos asentados en la zona de recarga, aseguran por ahora una calidad del agua aceptable para consumo humano. Por ende, CORPOGUAJIRA deberá destinar parte esencial del Plan de Manejo a la preservación de este acuífero.

Con relación a las aguas bicarbonatadas cálcicas de baja conductividad eléctrica pero edad antigua situadas al sureste del área de estudio, por ahora no es claro su mecanismo de mineralización. En forma preliminar, es posible sugerir que son aguas provenientes de la falla de Oca (tal vez aguas del acuífero Cretácico) que han migrado muy lentamente hacia el norte, aunque debido a su tiempo de residencia (varios miles de años) es de extrañar que no hayan aumentado significativamente los sólidos disueltos. Otra hipótesis es que se tratan de aguas lluvias que han migrado verticalmente a velocidades muy lentas debido al carácter predominantemente arcilloso de los sedimentos recientes.

En conclusión, tres tipos de agua han podido ser detectados mediante la hidronímica y la isotopía: uno dulce reciente, uno dulce antiguo y una de moderada mineralización también antiguo. A partir de todos los resultados que tenemos, y que permitieron tener un mejor entendimiento del funcionamiento de las tres acuíferos, podemos proponer un primer modelo hidrogeológico conceptual (Figura 7) basado sobre un probable ausencia de recarga actual del acuífero del Cuaternario a partir de la lluvia pero una recarga a partir del río abastecido de agua que viene del acuífero Cretácico.



FIG. 7. Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de la zona de Maicao

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos a la doctora Laurence Gourcy, Oficial Técnico del proyecto RLA/8/031, al doctor Edmundo Agudo, Coordinador Administrativo del proyecto por parte del IAEA, y al funcionario de CORPOGUAJIRA Julio Segundo Curvelo, coordinador local del Proyecto en Maicao, por sus continuas gestiones que han hecho posible los trabajos descritos en este documento. También ha sido de suma importancia la coordinación nacional de INGEOMINAS y el apoyo prestado por el Laboratorio de Aguas de CORPOGUAJIRA.

REFERENCIAS

- [1] Consultores del Caribe Ltda., Plan de Ordenamiento Territorial, municipio de Maicao, La Guajira: Consolidado de los aspectos ambientales, Parte II (2002).
- [2] Repúblicas de Colombia y Venezuela, Estudio conjunto del aprovechamiento integral y conservación de los recursos hídricos del río Carraipía Paraguachón. Diagnóstico (1991).
- [3] IDEAM, Datos obtenidos de las estaciones Colegio Agrícola Carraipía (1508503), Aeropuerto Maicao (1508501), Intercor (1506505), La Mina (1506513).
- [4] INGEOMINAS, Resultados de la ejecución de la prueba de bombeo en los pozos del acueducto de Maicao, depto de La Guajira (1999)
- [5] HUGUETT, G., A., Resumen del estudio hidrogeológico de la Media y Baja Guajira. En: Boletín Geológico INGEOMINAS, vol. 29 N°1 (1988) 45-83.
- [6] ROZANSKI, K., ARAGUAS-ARAGUAS, L., GONFIANTINI, R., Isotopic patterns in modern global precipitation. En: Continental Isotope Indicator of Climate, American Geophysical Union. Geophysical Monograph 78 (1993) 1-36.
- [7] GAT, J.R., GONFIANTINI R (Ed), Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. STI/PUB No. 210, IAEA, Vienna (1981).
- [8] ROGNON, P., Essai d'interprétation des variations climatiques au Sahara depuis 40000 ans, Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn. 18, 251 (1976).
- [9] ROGNON, P., WILLIAMS, M.A.J., Late Quaternary climatic changes in Australia and North Africa: A preliminary interpretation, Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeogeol. 21, 285 (1977).
- [10] MEDINA, M., LARA, R., SUÁREZ, L, Estimación de la Recarga Potencial del Acuífero Cuaternario en Maicao. Acuerdo Específico 007 de 2003 CORPOGUAJIRA – Universidad de La Guajira (2004) Documento interno.

Utilización de Isótopos Estables en la Precipitación para Determinar Zonas de Recarga del Acuífero Barva, Costa Rica.

J. Reynolds-Vargas, J. Fraile

Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

Resumen: Se analizó la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de las aguas subterráneas del acuífero Barva y de la precipitación en la zona con la finalidad de identificar las áreas de recarga y de evaluar los principales procesos hidrológicos e hidrogeológicos. Se tomaron muestras de pozos (38 puntos), manantiales (14 puntos) y precipitación (12 estaciones) durante al menos 12 meses en el transcurso del período comprendido entre enero de 2002 y octubre de 2004. Los resultados de este estudio confirman que existen complejas relaciones hidrogeológicas y climáticas en la zona de estudio, determinadas principalmente por la variedad en las cualidades y espesores de los materiales volcánicos y de las interacciones entre los sistemas de vientos predominantes en la región. Se concluye que la recarga del acuífero Barva es local y derivada de la precipitación de origen Pacífico en su parte central y noroeste. Una parte de la recarga ocurre en las tierras altas ubicadas en la parte noreste y sur de la zona, en donde también se recarga el acuífero Colima Superior, semiconfinado. En esta zona se da una influencia importante de la precipitación proveniente del Caribe. Ocurren procesos intensos de reciclaje de humedad por evapotranspiración y reevaporación de la humedad interceptada por la vegetación en la parte alta del acuífero, en las cercanías del volcán, lo que a su vez señala la necesidad de preservar la zona boscosa en esa región. Los ríos en la parte media y baja de la cuenca del río Virilla son un componente significativo de la recarga. Este hecho tiene implicaciones importantes, sobre todo en el Valle Central, en donde la población es dependiente de las aguas del subsuelo y en donde se hace necesario garantizar la sostenibilidad del uso del recurso. La puesta en práctica de medidas más adecuadas de manejo de desechos y de protección de aguas superficiales y subterráneas es urgente

Abstract: The isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of precipitation and groundwater of the Barva aquifer has been analyzed with the aim of identifying recharge areas and evaluate the main hydrological and hydrogeological processes. Samples were collected from well (38 sites), springs (14 sites) and precipitation (12 stations) for at least 12 months during the period Jan-2002 to Oct-2004. The results obtained in this study confirm the existence of complex hydrological and climatic relationships in the study area, mainly controlled by the properties and thickness of the volcanic rocks and the interaction between the dominant winds in the region. The recharge of the Barva aquifer, in the central and south areas, is of local origin and mainly derived from the precipitation originated in the Pacific Ocean. Part of the recharge takes place in the high lands in the NE and south regions, where the recharge of the Colima Superior semi-confined aquifer also takes place. Intense recycling processes of moisture dominate in the area due to evapotranspiration and re-evaporation of moisture trapped by vegetation in the upper part of the aquifer. Rivers in the middle and upper part of the Virilla basin constitute an important recharge component. This fact is relevant, mainly in the Central Valley, where population depends on groundwater and where it is necessary to ensure sustainable use of the water resources. The implementation of adequate waste management practices and the protection of surface and groundwaters are urgent matters.

1. Introducción

El análisis de la variación en la composición de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) en la precipitación y en las aguas subterráneas ha sido ampliamente utilizado en el estudio de los procesos hidrogeológicos y en la identificación de las zonas de recarga de los acuíferos [1-3].

El efecto altitudinal sobre la composición isotópica de la precipitación ha sido observado en varios lugares del mundo [4]. Conforme una masa de aire se desplaza desde la costa y asciende hacia las montañas, va enfriándose y perdiendo el agua isotópicamente más pesada. Esto hace que a mayores elevaciones, en donde las temperaturas son menores, la precipitación sea isotópicamente más negativa. En Costa Rica, algunos autores [5-7], basándose en el análisis de algunos pozos y manantiales en Costa Rica, han sugerido que la relación considerada “normal” entre las proporciones isotópicas y la altitud parece no darse en el Valle Central, en donde más bien se manifiesta una inversión de la misma. No obstante, Reynolds-Vargas (datos no publicados), con base en el análisis de muestras de precipitación a lo largo de una línea imaginaria que atraviesa el país desde el mar Caribe hasta la costa Pacífica, ha observado el efecto de la elevación, más evidente en la trayectoria tierra adentro de la precipitación proveniente de la costa Pacífica que en la que proviene del Caribe.

Se ha observado una correlación entre la composición isotópica y la cantidad de lluvia denominada “efecto de cantidad” [8], atribuida al enriquecimiento evaporativo de las gotas de agua durante el verano en zonas templadas. En zonas tropicales, donde no hay variaciones marcadas de temperatura durante el año, la relación entre la composición isotópica y la cantidad parece ser controlada por la variación isotópica del vapor de agua en la misma región donde se origina [2].

1.1. Sitio de estudio

La mayor parte de la población de Costa Rica vive en el Valle Central, en la zona más densamente poblada del país. En la actualidad, aproximadamente 1.300.000 personas de la Gran Área Metropolitana (GAM), sobre la cuenca del río Virilla, consume aguas de origen subterráneo, cantidad que aumentará en los próximos cinco años, cuando se pongan en uso pozos de gran diámetro con el objetivo de satisfacer la creciente demanda. Por esta razón, la ubicación de las zonas de recarga y la comprensión de la dinámica de los procesos hidrológicos es de vital importancia para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y para definir zonas de protección de los acuíferos.

Los materiales volcánicos de la región central del país, muchos de los cuales son altamente fracturados y brechosos, han formado el complejo sistema de acuíferos del Valle Central (**Figuras 1 y 2**). La Formación Barva, objeto de este estudio, se encuentra ubicada en la parte noroeste de la cuenca del río Virilla. Está constituida por al menos cuatro unidades lávicas (miembros), dentro de los cuales se han formado sub-acuíferos de extensión y profundidad variable, separados por capas de diferente espesor de tobas y piroclastos meteorizados. Generalmente, se refiere al conjunto de sub-acuíferos de la Formación Barva como “acuífero Barva” cuya base está constituida por una unidad de tobas e ignimbritas de muy baja permeabilidad, llamada Formación Tiribí. El movimiento del agua en el acuífero parece darse por un flujo fisural y no poroso, ya que se produce a través de horizontes con múltiples brechas y fisuras, en una roca sumamente fracturada. Debido a esto, la conductividad hidráulica es muy heterogénea, ya que está determinada por la cantidad y disposición de las fracturas. Se han determinado valores de K entre los 0,6 a los 100 m·d⁻¹ [9,5].

Sobre la Formación Barva se ubican nueve cantones o municipios que extraen el agua subterránea por medio de más de mil pozos registrados, de un número desconocido de pozos no registrados, y de alrededor de 400 manantiales. En la actualidad se capta un volumen superior a los 2500 L·s⁻¹, que son utilizados, en su mayor parte, para consumo humano. Aproximadamente 500.000 personas se abastecen de agua del acuífero Barva. La zona que sobreyace la Formación Barva presenta una topografía muy irregular, de acentuadas pendientes y una red hídrica superficial densa, con elevaciones que van desde los 800 hasta los 2 900 metros sobre el nivel del mar. Debido a las grandes diferencias en elevación, los ríos tienden a ser de poco caudal, angostos y de gran velocidad, que drenan cuencas alargadas. En las partes bajas el uso del suelo es principalmente urbano; la región intermedia corresponde, principalmente, a una zona agrícola y en la parte superior, el suelo está ocupado principalmente por pastos y bosques. Existe en esta zona una gran variedad de microclimas, determinados por la alta precipitación, una topografía irregular, la existencia de pasos entre montañas y colinas, y la influencia de masas de aire proveniente de ambos océanos.

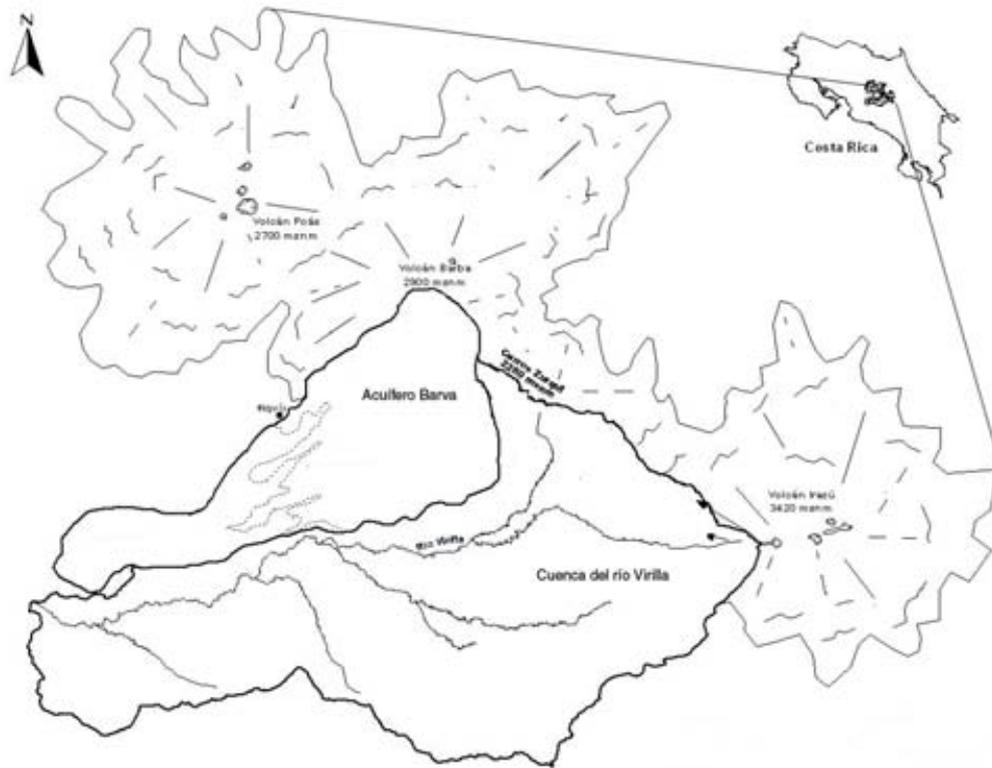


FIG.1. Cuenca del río Virilla y ubicación del acuífero Barva, al noroeste de la cuenca. La línea punteada sobre el acuífero indica un posible límite (bajo estudio).

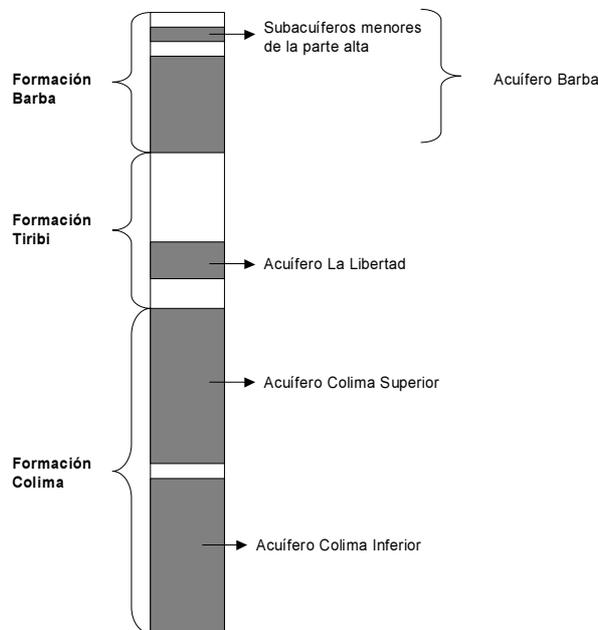


FIG. 2. Columna geológica simplificada, a escala libre, de la cuenca del río Virilla. Se señalan las ubicaciones relativas de los miembros geológicos que comprende el sistema de acuíferos del Valle Central (modificado de BGS/SENARA, 1988).

Es probable que la recarga del acuífero esté concentrada en los meses de julio a diciembre [10], cuando los suelos están saturados. En los meses del período seco y de mayor evapotranspiración (enero a abril) las tasas de recarga probablemente disminuyen, excepto en las partes altas, en donde la precipitación continúa aún durante estos meses. Estimaciones hechas [9,10], tomando en cuenta factores tales como la permeabilidad de los suelos, el volumen de precipitación, y la conductividad hidráulica de las tobas, estiman que la recarga puede alcanzar aproximadamente de un 30 a un 55% de la precipitación. Por otra parte, se han realizado aforos que han permitido determinar la ocurrencia de recarga en los tramos en donde algunos ríos presentan disminución de su caudal (Rodríguez, H., datos no publicados; Laboratorio de Hidrología Ambiental, datos no publicados). Sin embargo, estas mediciones no han sido exhaustivas ni sistemáticas, por lo que no existe una cuantificación de los volúmenes de agua que ingresan a los acuíferos desde la compleja red hídrica superficial.

La descarga se produce principalmente por medio de manantiales y como flujo base de los ríos. Existe controversia sobre si las tobas e ignimbritas de la Formación Tiribí, que constituyen a la vez el piso del acuífero Barva y el techo del acuífero Colima Superior, son lo suficientemente permeables como para permitir la infiltración desde el nivel superior hacia el estrato acuífero inferior. Algunos autores [5] consideran que sí puede existir un flujo vertical de agua, mientras que Protti [11] considera que la permeabilidad de la formación Tiribí es demasiado baja para que ocurra una transferencia importante de agua. La presencia de compuestos orgánicos volátiles detectados recientemente en pozos del acuífero Colima Superior (Reynolds-Vargas, datos no publicados) sugiere que existe una comunicación hidráulica entre ambos estratos. Por otra parte, la presencia de nitratos y su variación a lo largo del tiempo en el acuífero Colima, en zonas que subyacen el estrato acuífero Barva, confirman esta sospecha [12]. Es evidente que los materiales, probablemente altamente fracturados, que separan los acuíferos Barva y Colima Superior son insuficientes para impedir el flujo vertical de agua.

El territorio de Costa Rica tiene menos de 200 km de distancia entre la costa Pacífica y la costa Caribe. Por esta razón, el llamado “factor ístmico” influye de manera significativa en el clima, pero con modificaciones determinadas por la Cordillera Volcánica Central, que está orientada de manera casi perpendicular a los vientos predominantes. Este sistema montañoso define dos regímenes climáticos diferentes, el del Pacífico y el del Caribe. En el Pacífico se pueden diferenciar dos estaciones, una seca, de unos cinco meses de duración y otra lluviosa, de 6 a 7 meses, con una precipitación promedio anual que va desde 1300 en las zonas bajas a 4300 mm en las regiones a más de 2500 msnm. En el Caribe llueve prácticamente todos los meses del año, con una precipitación que va desde los 3400 en la costa a los 5000 mm anuales, en la parte alta de la Cordillera. Los vientos predominantes vienen del sur y del suroeste en el Pacífico y del noreste (vientos alisios) en el Caribe [13]. La temperatura en el Valle Central (a 1250 msnm) oscila entre 18 y 29 °C, con un promedio anual de 23 °C. En las zonas montañosas, a más de 2000 msnm, las temperaturas varían entre 7°C y 23°C. En ambos sitios las menores temperaturas se alcanzan durante las madrugadas, ya que existe poca variación a lo largo del año. La humedad relativa promedio anual es de 75% en Santa Lucía de Heredia, a 1100 msnm y de 87% a 2000 msnm.

Los resultados que aquí se describen forman parte de un proyecto más amplio que se realiza con la intención de conocer los procesos que influyen sobre la calidad y cantidad de las aguas subterráneas en el Valle Central. El objetivo del presente estudio fue identificar las zonas de recarga del acuífero Barva, con la finalidad de proporcionar información que permita un mejor manejo de este importante recurso.

2. Metodología

La información base sobre los pozos utilizados en este estudio (descripción litológica, datos de caudal, construcción, pruebas de bombeo, etc.), fue suministrada por las instituciones que administran el agua en la Gran Área Metropolitana (Servicio Nacional de Aguas Subterráneas (SENARA), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH) y municipalidades de la zona de estudio). Con base en esta información se definieron las isofreáticas y las líneas estructurales del piso del acuífero.

Se colocaron recipientes colectores de precipitación en 12 sitios sobre el acuífero Barva, ubicados a elevaciones desde 642 hasta 2397 msnm. La mayor parte de los colectores se colocó en estaciones pluviométricas pertenecientes al Instituto Meteorológico Nacional. Los análisis de ^{18}O y deuterio se realizaron mensualmente en todos los sitios, durante al menos 12 meses, entre enero del 2002 y octubre del 2004. Las muestras fueron analizadas por el Laboratorio de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, en Santiago, Chile.

Se seleccionaron 38 pozos, de los cuales 16 formaron parte de una red que se muestreó de 5 a 8 veces entre los años 2002 al 2004. También se tomaron muestras de 12 manantiales que descargan cada una de las unidades acuíferas de la Formación Barva. Para efectos comparativos, también se tomaron muestras de pozos y manantiales que extraen agua de los acuíferos Colima Superior y La Libertad.

En este trabajo se utiliza la recta meteórica local (RMCR) determinada con base en los datos isotópicos de precipitación de Costa Rica por Reynolds-Vargas (datos no publicados), cuya ecuación es $8.33 \delta^{18}\text{O} + 14.09$ ($r^2 = 0.993$; $n = 397$, lluvias mensuales $> 20\text{mm}$).

3. Resultados

El acuífero Barva tiene un espesor saturado que va desde los 4 a los 85 m. y un área de 180 km^2 . Esta superficie incluye la parte noroeste y oeste del acuífero (observar línea punteada en la Figura 1), aunque aún está en estudio la posibilidad de una comunicación hidráulica entre ambas zonas. La tendencia general del flujo subterráneo es de noreste a suroeste, siguiendo la morfología de la base del acuífero y correspondiendo en general, con la topografía de la zona.

En la **Figura 3** se indica la ubicación de 12 estaciones de muestreo de lluvia, 38 pozos y 14 manantiales para la toma de muestras de agua subterránea. En la parte central del diagrama indica un posible límite del acuífero, todavía bajo estudio,

En el **Cuadro 1** se proporciona información sobre los sitios de muestreo de precipitación, incluyendo la ubicación, la elevación, la precipitación total anual y los promedios aritméticos y ponderados de los isótopos estables. Las estaciones se encuentran a elevaciones entre los 640 y los 2400 msnm y se muestrearon por un período mínimo de 12 meses. No se encontró una relación significativa entre el dato isotópico y la elevación. La precipitación total anual aumenta en función de la elevación. Los **Cuadros 2 y 3** proporcionan información sobre los 38 pozos estudiados. Para efectos comparativos se incluyeron tres pozos del acuífero Colima (Claretiano, Santa Lucía y La Guácima) y otros tres pozos cuya profundidad sobrepasa la profundidad de la base del acuífero Barva (Isaías Gómez, La Condesa y El Castillo) y que se supone extraen agua del acuífero Colima Superior.

La **Figura 4a)** muestra, para efectos comparativos, los datos isotópicos de la precipitación sobre Costa Rica, en muestras tomadas a lo largo de una línea imaginaria que coincide con el paralelo 10, que atraviesa el país de este a oeste (Reynolds-Vargas, datos no publicados). Los valores isotópicos se ubican a lo largo de la línea meteórica definida por la autora para Costa Rica desde un mínimo de -17‰ hasta un máximo de $+1\text{‰}$. No obstante, al ponderar estos valores contra el volumen de precipitación se observó una clara concentración de valores entre -10‰ y -7.5‰ para la vertiente Pacífica y valores claramente diferentes, más positivos (entre -6‰ y -3‰), para los sitios sobre la vertiente Caribe. La **Figura 4b)** muestra resultados isotópicos de los pozos y manantiales sobre el acuífero Barva. La **Figura 5** muestra la composición isotópica de las aguas subterráneas y de la precipitación (promedios ponderados) en las estaciones sobre el acuífero Barva con relación a la recta meteórica definida para Costa Rica (RMCR). El agua de los tres pozos del **Grupo A** tienen una composición isotópica semejante a la de la precipitación en la estación Monte de la Cruz, y constituyen el grupo más empobrecido isotópicamente. Las aguas subterráneas del **Grupo B** (parte media y oeste del acuífero) son claramente más evaporadas que la precipitación sobre esa zona, ya que se encuentran bajo la línea meteórica. Las aguas del **Grupo C** son más positivas, y tanto las aguas de precipitación (estación Paso Llano) como las subterráneas, se ubican sobre la línea meteórica. A este grupo pertenecen los manantiales Iris Hernández, 29^a, Las Chorreras y La Gruta, y los pozos Tirol, Moretti, La Condesa, El Castillo, Isaías Gómez, Santa Lucía, Claretiano, La Guácima y Walter Helmund. Tres de éstos extraen agua del acuífero Colima Superior.

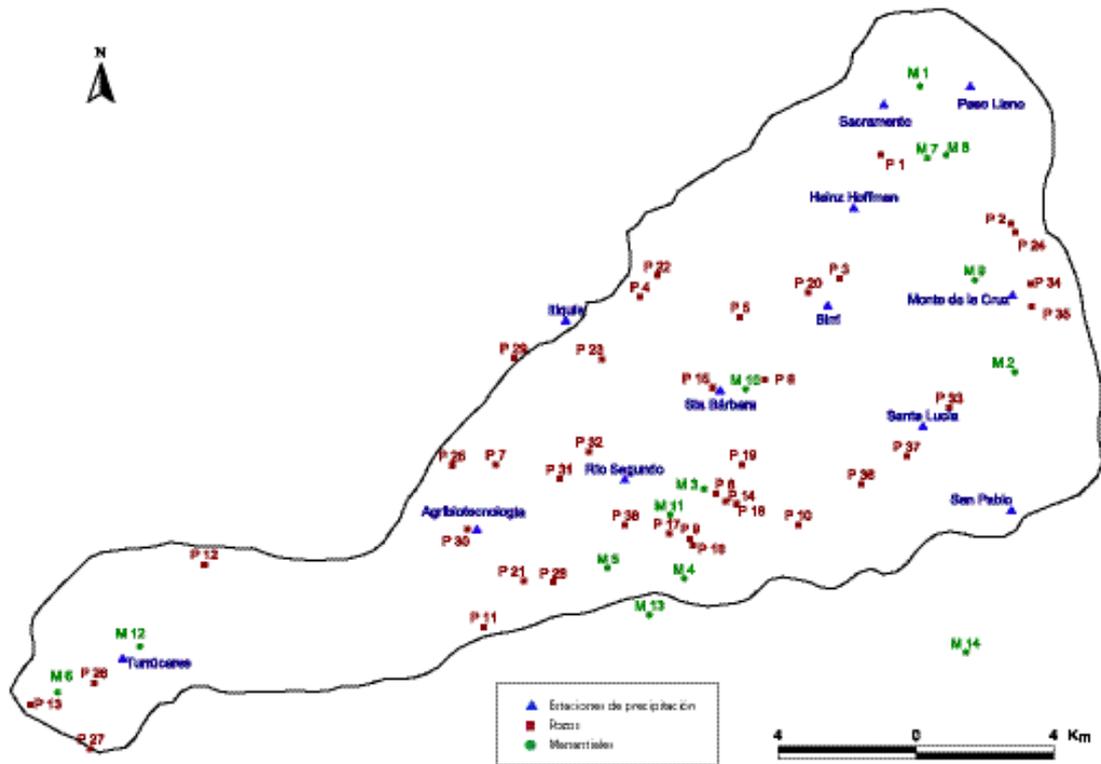


FIG. 3. Estaciones para muestreo de precipitación sobre el acuífero Barva y ubicación de pozos y manantiales (ver Cuadros 1, 2 y 3 para detalles).

Cuadro 1. Datos de ubicación, período de muestreo, elevación de las 12 estaciones utilizadas para muestreo de lluvia. Se incluyen los promedios de precipitación, delta oxígeno-18 y deuterio.

	Nombre de la estación de muestreo	Código del sitio	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Período del muestreo	Precipitación promedio mensual (mm)	Precipitación total anual (mm)	O ¹⁸ promedio aritmético	O ¹⁸ promedio ponderado	H ² promedio aritmético	H ² promedio ponderado
1	Paso Llano	PR23	10.113	-84.09889	2397	Nov 03 a oct 04	344	4131	-6.92	-7.90	-41.8	-49.9
2	Sacramento	PR24	10.108	-84.12194	2266	Nov 03 a oct 04	277	3323	-6.96	-8.72	-43.2	-57.1
3	Monte de la Cruz	PR18	10.058	-84.08778	1700	Sept 03 a ag 04	232	2778	-6.88	-9.63	-44.1	-66.7
4	Heinz Hoffman	PR22	10.081	-84.12972	1650	Nov 03 a oct 04	245	2940	-6.56	-8.50	-41.1	-56.3
5	Birri	PR21	10.055	-84.13694	1318	Nov 03 a oct 04	243	2916	-6.60	-8.77	-41.2	-58.2
6	Santa Lucía	PR2	10.023	-84.11167	1251	Ene a dic 02	185	2038	-6.62	-9.07	-42.9	-62.5
7	San Pablo	PR19	10.001	-84.08806	1215	Nov 03 a oct 04	171	2051	-6.57	-9.12	-41.4	-61.7
8	Itiquís	PR16	10.051	-84.20611	1110	Sept 03 a ag 04	249	2492	-6.85	-9.06	-43.6	-61.1
9	Santa Bárbara	PR5	10.033	-84.16583	1102	Ene a dic 02	202	2224	-6.72	-9.07	-44.6	-62.5
10	Río Segundo	PR25	10.009	-84.1906	980	Nov 03 a oct 04	190	2092	-6.96	-8.91	-43.7	-60.0
11	Agrobiotecnología	PR27	9.996	-84.23194	860	Nov 03 a oct 04	168	2017	-6.69	-8.79	-42.8	-58.9
12	Turrúcares	PR26	9.962	-84.32361	642	Nov 03 a oct 04	177	1945	-6.48	-8.36	-41.7	-56.4

Cuadro 2. Información sobre pozos muestreados dentro de la Formación Barva. Para efectos comparativo se incluyeron en el muestreo pozos del acuífero Colima Superior y La Libertad.

	NOMBRE	Código oficial del pozo ^a	Código LHA ^b	n	Acuífero	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Profundidad de la rejilla (m)	
									Mínimo	Máximo
1	Montelagos	BA-631	SP-20	8	Barva	10.095	-84.123	1924	56	68
2	Tirol	BA-286	SP-3	8	Barva	10.076	-84.088	1865	34	46
3	Empolladora Belén	BA-221	SP-6	8	Barva	10.100	-84.100	1386	23	35
4	Villas Pura Vida	BA-223	SP-18	8	Barva	10.057	-84.186	1301	30	60
5	Hacienda Santa Bárbara	BA-290	SP-17	8	Barva	10.033	-84.167	1233	24	42
6	Cifuentes	BA-414	SP-16	8	Barva	10.035	-84.153	1131	45	75
7	Orlich	BA-97	SP-21	8	Barva	10.013	-84.225	919	---	---
8	Cristal	BA-178	SP-11	5	Barva	10.000	-84.200	1006	20	44
9	La Ribera	AB-1234	SP-14	8	Barva	9.993	-84.173	978	27	45
10	Oscar Arias	BA-419	SP-9	7	Barva	9.997	-84.144	1067	48	60
11	Avícola Mónica	AB-974	SP-19	8	Barva oeste	9.970	-84.228	837	54	63
12	LACSA	RG-265	SP-20	8	Barva oeste	9.986	-84.302	697	19	39
13	Walden Jones	RG-269	SP-24	8	Barva oeste	9.949	-84.348	487	20	32
14	Embutidos París	BA-271	PRE-26	3	Barva	10.003	-84.164	1024	35	47
15	Medina del Campo	BA-480	PRE-15	1	Barva	10.033	-84.167	1102	58	70
16	Los Mangos	AB-885	PRE-16	1	Barva	9.991	-84.173	972	32	52
17	El Arreo	AB-907	PRE-20	1	Barva	9.995	-84.179	960	24	70
18	Boo Huug	BA-362	PRE-27	1	Barva	10.003	-84.161	1030	42	60
19	Vera Campos	BA-455	PRE-30	1	Barva	10.013	-84.159	1035	25	41
20	Gonzalo Cerdas	BA-425	PRE-32	1	Barva	10.058	-84.142	1335	33	63
21	El Coco	AB-1477	PRE-36	1	Barva	9.983	-84.217	865	40	60
22	Hacienda Montemar	BA-409	PRE-52	2	Barva	10.063	-84.182	1264	39	57
23	Ticoplant	BA-628	PRE-54	1	Barva	10.041	-84.197	1017	----	----
24	Moretti	BA-507	PRE-11	1	Barva	10.074	-84.087	1865	33	45
25	Club Leones Alajuela	BA-29	PRE-38	2	Barva oeste	10.013	-84.236	890	36	----
26	Granja Ochomogo	RG-209	PRE-39	1	Barva oeste	9.955	-84.331	590	12	35
27	Ludwig Muller	RG-250	PRE-40	1	Barva oeste	9.938	-84.332	535	32	56
28	Walter Hellmund	AB-1785	PRE-46	3	Barva oeste	10.000	-84.200	872	74	92
29	Granja Machito	BA-220	PRE-48	1	Barva oeste	10.041	-84.220	1013	40	70
30	Agnbiotecnología	AB-1249	PRE-49	3	Barva oeste	9.996	-84.232	860	12	30
31	Tropicana Alajuela	BA-313	PRE-50	3	Barva oeste	10.000	-84.200	917	20	50
32	Los Adobes	BA-547	PRE-51	1	Barva oeste	10.016	-84.200	938	60	97
33	Isaias Gómez	BA-609	PRE-29	1	Sin clasificar	10.028	-84.105	1318	60	100
34	La Condesa	BA-529	PRE-9	2	Sin clasificar	10.061	-84.083	1738	135	147
35	El Castillo	BA-683	PRE-12	1	Sin clasificar	10.055	-84.083	1660	96	120
36	Claretiano	BA-587	SP-8	8	Colima	10.008	-84.128	1146	207	343
37	Santa Lucía	sn	SP-25	5	Colima	10.015	-84.116	1180	---	----
38	La Guácima	sn	SP-27	5	Colima	9.997	-84.191	950	118	148

^a = Código oficial asignado al pozo por el Departamento de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía y por el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas.

^b = Código asignado por el Laboratorio de Hidrología Ambiental (LHA) para el muestreo.

Cuadro 3. Manantiales que extraen agua de los acuíferos de la Formación Barva y de los acuíferos Colima y La Libertad.

	Nombre del Sitio	Código LHA ^a	n	Acuífero	Latitud	Longitud	Altitud
1	Sacramento	SM-1	8	Barva	10.113	-84.1122	2396
2	La Gruta	SM-4	8	Barva	10.037	-84.0872	1500
3	Cristal (Echeverría)	SM-10	8	Barva	10.006	-84.1694	967
4	Belén	SM-13	8	Barva	9.983	-84.1747	1386
5	Ojo de Agua	SM-15	8	Barva	9.985	-84.1950	882
6	Laguito Phillips	SM-22	7	Barva oeste	9.953	-84.3406	545
7	29 A	PRE 5-1	1	Barva	10.094	-84.1106	1975
8	Iris Hernández	PRE 7-1	2	Barva	10.094	-84.1056	2021
9	Chorreras	PRE 4-1	2	Barva	10.061	-84.0978	1715
10	León Cortés	PRE 34 -1	3	Barva	10.000	-84.2000	1118
11	Los Sánchez	PRE 19 -1	2	Barva	9.999	-84.1786	939
12	Cebadilla	PRE 1-1	3	Barva oeste	10.000	-84.3000	627
13	Puente de Mulas	PM-131	3	Colima	9.973	-84.1842	910
14	La Libertad	PRE 24-1	1	La Libertad	9.963	-84.1006	1080

^a = Código utilizado por el Laboratorio de Hidrología Ambiental (LHA).

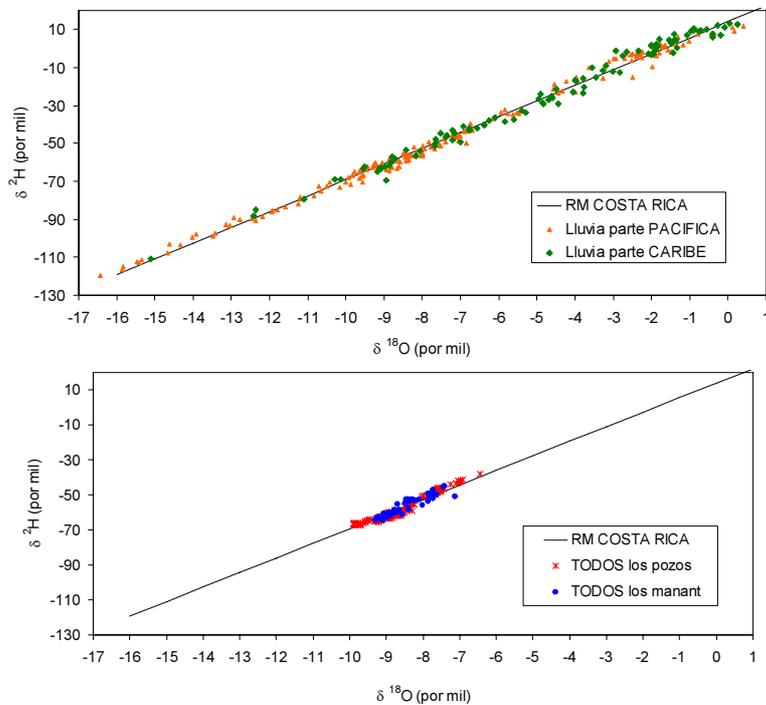


FIG. 4.a) Firma isotópica de la precipitación sobre la región Caribe y sobre la zona Pacífica de Costa Rica. b) Firma isotópica de los pozos y manantiales sobre el acuífero Barva. Em ambos casos se utiliza la recta meteórica definida para Costa Rica por Reynolds-Vargas, cuya ecuación es $\delta^2\text{H} = 8.33 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14.09$

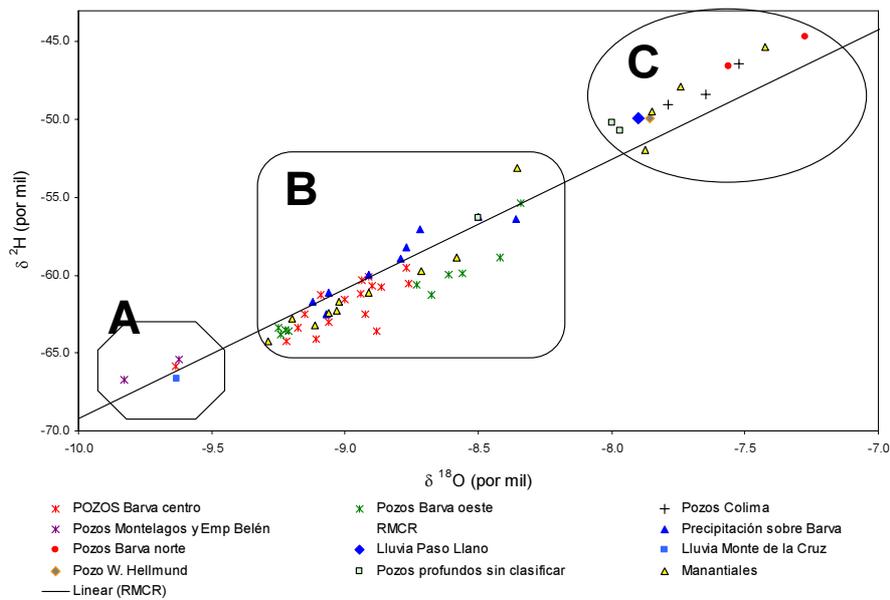


FIG. 5. Variación isotópica de las aguas en diferentes zonas del acuífero Barva. Grupo A: Precipitación y aguas subterráneas en la zona noreste y sur del acuífero; Grupo B: Precipitación y aguas subterráneas sobre la zona central del acuífero; Grupo C: Precipitación y aguas subterráneas en la zona norte del acuífero.

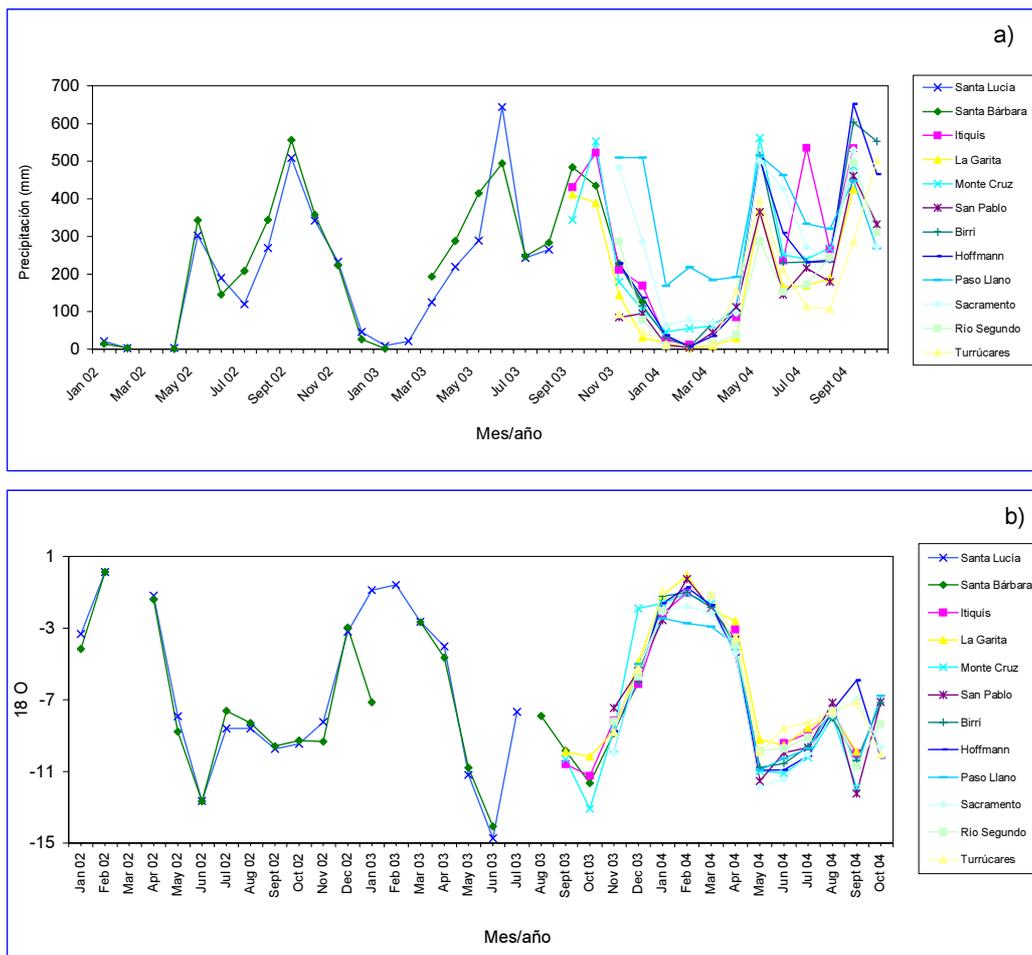


FIG. 6. Variaciones estacionales del volumen de precipitación durante el período de estudio, en 12 estaciones sobre el acuífero Barva. b) Variaciones del $\delta^{18}\text{O}$ en las mismas estaciones.

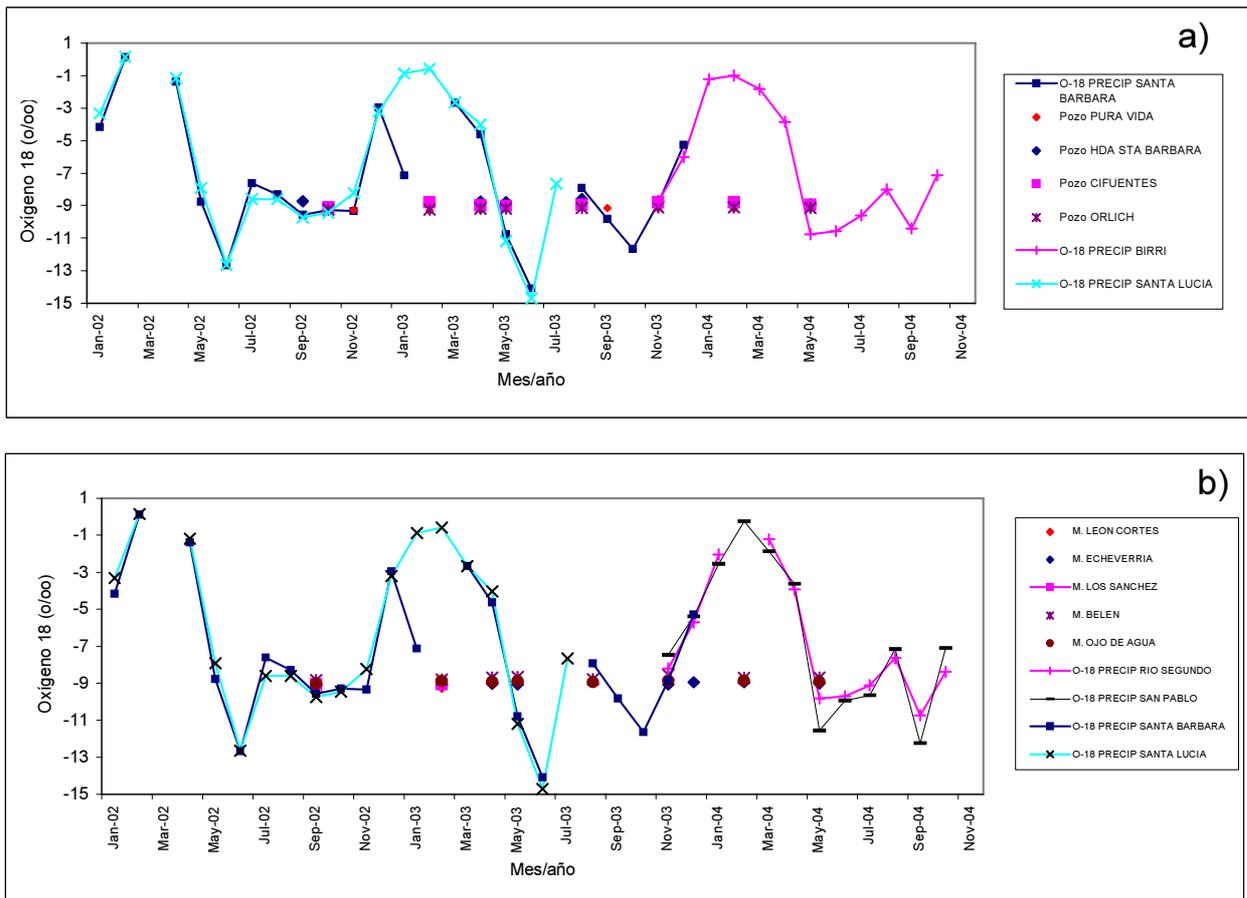


FIG. 7. Comparación de la variación estacional del $\delta^{18}\text{O}$ de la precipitación y en pozos sobre el acuífero Barva. b) Comparación de la variación estacional del $\delta^{18}\text{O}$ de la precipitación y en manantiales sobre el acuífero Barva.

Existe una marcada variación durante el año en el $\delta^{18}\text{O}$ que coincide con el patrón estacional de precipitación. En general, los valores más positivos se encontraron durante los meses de menor precipitación (**Figura 6**). La variación isotópica estacional que se observa en la precipitación no se refleja en las aguas subterráneas, las cuales varían muy poco a lo largo del año. La **Figura 7** muestra la composición isotópica de pozos y de manantiales, comparados con la precipitación en la zona central del acuífero. Resultados similares se obtuvieron al comparar las aguas subterráneas con la precipitación en la zona oeste y de la zona norte del acuífero.

4. Discusión

4.1. Origen de la recarga

En general, la composición isotópica de las aguas subterráneas presenta desviaciones importantes de la línea meteórica (RMCR) que permiten afirmar que los procesos de recarga del acuífero Barva son variados y que la recarga no es uniforme.

Los resultados isotópicos indican que las fuentes de humedad para la región central de Costa Rica provienen tanto del océano Pacífico como del Caribe. Obsérvese en la Figura 4 que el agua de los pozos y los manantiales del acuífero Barva tiene una composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ entre -10% y -7% , y manifiestan una coincidencia con la composición isotópica de las masas de aire provenientes de ambos océanos.

Se pueden observar en la precipitación y las aguas subterráneas analizadas tres grupos isotópicamente diferentes (Figura 5): En las aguas de la zona norte del acuífero (Grupo A) se cumple con la relación elevación/empobrecimiento isotópico, tanto para los pozos de la zona como para la estación Monte de la Cruz, todos ubicados a más de 1300 msnm. La precipitación en este sitio es de origen Pacífico, ya que la presencia hacia el este de los Cerros Zurquí (ver Figura 1) impide el ingreso de masas de aire cargadas de humedad del Caribe, como sí ocurre en la parte noreste y sur, que se discutirá posteriormente.

Las aguas subterráneas de la zona central y de la zona oeste del acuífero (Grupo B), todos entre 500 y 1300 msnm, se recargan localmente, ya que coinciden isotópicamente con la precipitación sobre la zona. En la mayor parte de los casos las aguas subterráneas se ubican bajo la línea meteórica, indicando que se trata de aguas más evaporadas, probablemente recargadas desde los ríos. Debe tenerse en cuenta que la precipitación en la zona central y oeste del acuífero es escasa o muy baja durante los meses del período seco (ver Figura 6a). Aun durante la época lluviosa la evaporación puede ser considerable, pues los procesos convectivos característicos de la región hacen que el agua evaporada durante la mañana se condense y precipite durante las horas de la tarde.

Las aguas de los pozos y los manantiales ubicados en la zona noreste y sur del acuífero (Grupo C), son todas isotópicamente más positivas que el resto de las aguas subterráneas y descargan agua que se ha infiltrado en esa zona. Estos pozos son semejantes isotópicamente a la precipitación de la estación Paso Llano; y el hecho de ser mucho más positivas y de no cumplir con la relación esperada entre la composición isotópica y la elevación demuestra la influencia de la precipitación del Caribe, al menos durante algunos meses del año. El vapor proveniente del Caribe sería transportado hacia el lado Pacífico de la Cordillera Volcánica Central por masas de aire que logran pasar la cumbre montañosa, al norte de la zona de estudio, y precipitan en las cercanías, captadas en la estación Paso Llano. La existencia de un basamento común en la parte sur y suroeste del macizo del volcán Barva hasta el río Virilla ha sido propuesta [14-17], lo que explicaría, a su vez, un origen común de las aguas de los pozos del Grupo C y la recarga del acuífero Colima Superior en la parte alta de la zona.

La mayor parte de las aguas subterráneas del Grupo C (excepto el manantial La Gruta), así como la precipitación de la zona, se ubican sobre la recta meteórica y paralelas a la misma, indicando agua re-evaporada. De acuerdo con [4], no es frecuente encontrar precipitación o agua subterránea que se ubique sobre la línea meteórica, ya que la mayor parte de los procesos meteóricos o subsuperficiales producen cambios en el $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$. No obstante, dadas las condiciones de la zona, que incluyen la presencia de densa vegetación y las relativamente bajas temperaturas nocturnas en la zona protegida cercana al volcán Barva, es posible que existan procesos de condensación y re-evaporación constantes. En este caso, la precipitación proveniente del Caribe, empobrecida isotópicamente, se condensaría sobre la densa vegetación en las cercanías del volcán, para luego precipitar y recargar los acuíferos en esa zona.

4.1.1. *Tendencias estacionales en la precipitación y su relación con las aguas subterráneas*

Las variaciones marcadas en la composición isotópica de la precipitación coinciden con las variaciones en cantidad de lluvia durante el año e ilustran muy bien el denominado “efecto de cantidad” de Dansgaard. Evidentemente, no hay relación alguna de las variaciones en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ con la temperatura, ya que esta varía relativamente poco durante el año. Estos resultados coinciden con los mencionados por Lachniet y Patterson [18], quienes analizaron datos de 17 estaciones de precipitación que forman parte de la Red Global de Isótopos en Precipitación (GNIP). del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

No se presentan variaciones isotópicas marcadas en las aguas subterráneas que correspondan con las variaciones en la precipitación, como se observa en la Figura 6. Esta poca variabilidad isotópica se repite en prácticamente todos los pozos y manantiales de la zona. A pesar de relativa poca profundidad del nivel freático, es evidente que las variaciones isotópicas de la precipitación son atenuadas durante la infiltración a través de la zona no saturada debido a las características físicas del suelo y del

subsuelo. Esta uniformidad isotópica sugiere también que debe existir una capacidad de almacenamiento considerable, suficiente para atenuar la variación estacional en la precipitación. Los resultados de este estudio confirman que existen complejas relaciones hidrogeológicas y climáticas en la zona de estudio, determinadas principalmente por la variedad en las cualidades y espesores de los materiales volcánicos y de las interacciones entre los sistemas de vientos predominantes en la región que drena al Pacífico y la zona que drena al Caribe de la Cordillera Volcánica Central. Estas relaciones han sido puestas en evidencia gracias al análisis de las variaciones isotópicas en la precipitación y las aguas subterráneas en la zona de estudio y señalan que tanto el acuífero Barva como el acuífero Colima Superior son, además, altamente vulnerables a la contaminación.

Se concluye que la recarga del acuífero Barva es local y derivada de la precipitación proveniente del Pacífico, en su parte central y oeste y que las aguas subterráneas en estas dos zonas no se diferencian isotópicamente. Una parte de la recarga ocurre en las tierras altas ubicadas en la parte noreste y sur de la zona, en donde también se recarga el acuífero Colima Superior, semiconfinado. En su parte no confinada, al sur de la zona de estudio, existe recarga directa que se manifiesta en la composición isotópica del manantial Puente de Mulas, que es similar a la de la precipitación local. Ocurren procesos intensos de reciclaje de humedad por evapotranspiración y reevaporación de la humedad interceptada por la vegetación en la parte alta del acuífero, en las cercanías del volcán, lo que a su vez señala la necesidad de preservar la zona boscosa en esa región.

Es evidente que los ríos en la parte media y baja de la cuenca del río Virilla son un componente significativo de la recarga. Lamentablemente estos cauces de agua están altamente contaminados debido a que son utilizados para la disposición de desechos líquidos y sólidos de todo tipo. Este hecho tiene implicaciones importantes, sobre todo en el Valle Central, en donde la población es dependiente de las aguas del subsuelo y en donde se hace necesario garantizar la sostenibilidad del uso del recurso. La puesta en práctica de medidas más adecuadas de manejo de desechos y de protección de aguas superficiales y subterráneas es urgente.

REFERENCIAS

- [1] Fritz, P. Y Fontes, J.Ch. 1980. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Volume 1. Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam.
- [2] Rozanski K., Araguás-Araguás L., and Gonfiantini R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: Climate Change in Continental Isotopic Records. Geophysical Monograph 78. American Geophysical Union. 36 p
- [3] Mook, W.G. 2001. Environmental isotopes in the hydrogeological cycle. Principles and applications. Technical Documents in Hydrology. No 39. UNESCO, Paris
- [4] Clark, I. y P. Fritz. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers. New York, EEUU. 328 p.
- [5] BGS/SENARA. 1988. The continuation of hydrogeological investigations in the north and east of the Valle Central, Costa Rica. Final Report 1984-1987. British Geological Survey Technical Report WD/88/13R. San José, Costa Rica. 120 p.
- [6] Darling, W., Parker, J., Rodríguez, H. y A. Lardner. 1989. Investigation of a volcanic aquifer system in Costa Rica using environmental isotopes. En: Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina. Documento técnico. Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena. 482 p.
- [7] Pérez, J., Hirata, R. y Reynolds Vargas, J. 2002. Estudio de la hidrogeología del área oeste del Valle Central, Costa Rica, utilizando isótopos ambientales. En: Manejo Integrado de Aguas Subterráneas: Un reto para el futuro (Ed. J.Reynolds-Vargas). Pp. 203-214. Editorial EUNED. San José, Costa Rica.
- [8] Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. Tellus, 16: 436-468.
- [9] Gómez, A. 1987. Evaluación del potencial de los acuíferos y diseño de las captaciones de agua subterránea en la zona de Puente de Mulas, Provincia de Heredia, Costa Rica. Tesis de grado. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. 68 p.

- [10] Reynolds Vargas, J. 1997. Evaluación de los recursos hídricos en Costa Rica: Disponibilidad y utilización. Informe Final. Centro Científico Tropical/Centro Internacional en Política Económica para el Desarrollo Sostenible. 161 p.
- [11] Protti E. 1997. Análisis de riesgo de contaminación de acuíferos del Valle Central, Costa Rica. Geotest S.A. Informe para el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. 26 p.
- [12] Reynolds-Vargas, J.; Fraile, J.; Hirata, R. 2006. Trends in nitrate concentrations and determination of its origin using stable isotopes (^{18}O and ^{15}N) in groundwater of the western Central Valley, Costa Rica. *Ambio* 35 (5): 229-236.
- [13] Zárate, E. 1978. Comportamiento del viento en Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. Nota de Investigación No. 2. San José, Costa Rica. 31 p.
- [14] Fernández, M. 1968. Las unidades hidrogeológicas y los manantiales de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla. Informe Interno No. 27. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 56p.
- [15] Echandi, E. 1981. Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla. Tesis de Licenciatura. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 123 p.
- [16] Kussmaul, S. 1988. Comparación petrológica entre el piso volcánico del Valle Central y la Cordillera Central de Costa Rica. *Revista Ciencia y Tecnología (Costa Rica)* 12:109-116.
- [17] Brenes, J. 2003. Geología y peligros volcánicos del flanco oeste y suroeste del Volcán Barva, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 83 pp.
- [18] Lachniet, M. and Patterson, W.P. 2002. Stable isotope values of Costa Rican surface waters. *Journal of Hydrology* 260: 135-150.

Aquifer recharge and contamination determination using environmental isotopes: Santiago basin, Chile

A study case

S. Iriarte^a, M. Atenas^b, E. Aguirre^c, C. Tore^d

^aSchlumberger Water Services (ex Servicio Nacional de Geología y Minería), Santiago

^bDirección General de Aguas, Santiago

^cComisión Chilena de Energía Nuclear, Santiago

^dSQM (ex Aguas Andinas), Santiago

Resumen: Se ha observado desde la última década en el acuífero de Santiago Norte el progresivo descenso de los niveles piezométricos y la contaminación por nitratos y sulfatos. El acuífero está prácticamente cubierto por la ciudad de Santiago, que utiliza el agua subterránea para abastecimiento urbano, comercial e industrial. Debido a las condiciones climáticas semiáridas y la existencia de periodos de sequía, el agua subterránea constituye un recurso hídrico muy importante. El acelerado crecimiento urbano de Santiago durante los 30 últimos años ha producido impactos en el ciclo hidrológico y ha contribuido a la degradación de la calidad del agua. El impacto puede relacionarse con la proporción y la calidad del agua recargada inducida por las actividades urbanas. Este estudio estima el impacto que tiene esta recarga en la cantidad y en la calidad del agua subterránea bajo la ciudad. En términos de gestión del agua, la evaluación de la recarga urbana frente a la recarga natural y la determinación de las fuentes de contaminación son los aspectos más importantes abordados en este estudio. Los resultados obtenidos indican que la mayor parte de la recarga natural está asociada a las facies de grano grueso en el vértice del abanico aluvial del río Mapocho y las cuencas locales. Los datos isotópicos muestran que existe una pequeña recarga de la precipitación directa sobre el acuífero en la zona urbana. Hacia el sector central de la zona de estudio, donde se encuentra la parte más antigua de la ciudad y donde se encuentran materiales muy permeables de gravas y arenas sobre la parte no confinada del acuífero, se ha identificado la presencia de una importante fuente de recarga, derivada de las fugas de las redes de abastecimiento y de saneamiento. Estos sistemas están alimentados por agua importada desde otra cuenca, al sur de la ciudad. Las diferencias en la composición química e isotópica de estas aguas permiten evaluar la magnitud de este impacto. La recuperación de este acuífero necesitará la reducción de la magnitud de las fugas. Sin embargo, esta solución puede afectar enormemente el balance hídrico del acuífero.

Abstract. Progressive water level descends and nitrate and sulfate contamination have been recorded in Santiago Norte aquifer since the last decade. This aquifer is almost completely covered by Santiago City which uses groundwater for drinking water, industrial, and commercial uses. Due to the semi-arid conditions of the area and the constant drought periods, groundwater constitutes an extremely important water resource. The accelerated urban growth of Santiago City over the past 30 years has produced impacts on the hydrological cycle and in the degradation of water quality. The impact may be related to the proportion and quality of groundwater recharge induced by urban activities. The study addresses the impact in quality and quantity that urban recharge has in the aquifer beneath the city. In terms of water management, the evaluation of the urban recharge with respect to natural recharge and the determination of the sources of contamination were the main goals of the study. The main results show that the most important natural recharge is associated to the coarse grain facies of the alluvial fan apex of Mapocho River and the local watersheds. The isotopic data shows a minor recharge from direct precipitation over the city. Toward the central sector of the study area, where the oldest part of the city is located and where highly permeable sandy gravel facies over an unconfined aquifer are present, an important source of recharge related to leakage from the drinking water and sewage systems was identified. These leaking systems are mainly fed by imported water from another watershed located south of the study area. The distinctive chemical and isotopic signature of this source allows the evaluation of its impact in this area. The remediation of the aquifer will require the reduction of leakages of the water and sewage distribution systems. However, this solution may strongly affect the water balance in the aquifer.

1. Foreword

Progressive water level descends and nitrate and sulfate contamination have been recorded in Santiago Norte aquifer since the last decade. This aquifer is almost completely covered by Santiago City, which use the groundwater for drinking water, industrial, and commercial uses. Due to the semi-arid conditions of the area and the constant drought periods, groundwater is a extremely important water resource for the Santiago City. The accelerated urban growth of Santiago City over the past 30 years has produce impacts on the hydrological cycle and in the degradation of water quality. These impacts may be related to the proportion and quality of groundwater recharge induced by urban activities.

The study is trying to address the impact in quality and quantity that urban recharge has in the aquifer beneath the city. In term of water management, the evaluation of the urban recharge respect of the natural source and the determination of the sources of contamination are the main goals to achieve in the study.

Through an extended and detailed hydrogeological, hydrochemical and isotopic study, the main sources of recharge to the aquifer and the sources of contamination were identified. This study consisted in a stratigraphic interpretation of more than 300 well logs, water level measurements, and four chemical and isotopic sampling campaigns. The samples, from more than 80 wells and surface water, were analyzed for major and minor elements, and environmental isotopes ($^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, $^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$, $^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$, $^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$, ^{15}N , $^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$, $^3\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ and $^{14}\text{C}_{\text{HCO}_3}$). Based on these data a conceptual model, including an interpretation of facies distribution, groundwater flow directions, and a distribution of geochemical and isotopic patterns was developed.

The main results show that the most important natural recharge is associated to the coarse grain facies of the alluvial fan apex of Mapocho River and the local watersheds. The isotopic data shows a minor recharge from direct precipitation over the city. Toward the central sector of the study area, where the oldest part of the city is located and where highly permeable sandy gravel facies over an unconfined aquifer are present, an important source of recharge related to leakage from the drinking water and sewage systems was identified. These leaking systems are mainly fed by imported water from another watershed located south of the study area. The distinctive chemical and isotopic signature of this source allows evaluating its impact in this area.

The leakage from the drinking water system dominates the surface recharge in most of the central area and it is responsible of the extensive sulfate contamination. Although leakage from the sewage system is not as extended as the drinking water system, it contributes most of the nitrate contamination beside high chloride, potassium, and phosphate concentrations. These sources of urban recharge are replacing the former agricultural and direct-precipitation recharge and preliminary estimations shows the urban recharge may be the main source of recharge. Although the water level has experience a constant descend in most of the area, this is partly due to climatic conditions and urban recharge is acting as an attenuation element.

2. Introduction

Water supply and water quality problems have constituting one of the most critical problems in many large cities. The increasingly high migration of rural population to the large cities has produced an exponential growth of population and urban surface. The consequent increment of drinking water demand is strongly related to an increment of wastewater generation. A combined effect of an impermeabilization of former recharge areas currently covered with urbanizations and roads with new urban recharge sources has been identified in some large cities around the world [1-3].

Chilean cities and particularly its capital Santiago, has experienced an exponential growth since the beginning of twentieth century, and consequently urbanized areas have growth in similar proportions. Both factors generally have had profound impact on the hydrological cycle and in the degradation of water quality.

The growing demand of water associated to the increase in population of Santiago City has produced a progressive increase in construction of production wells. This increment has been particularly intense in the northwestern part of the city, which is one of the areas of more accelerated growing and also one of the most dependent on the groundwater. Although this area presents the highest production of groundwater, it also requires exporting surface water from Maipo River to cover its necessities. The intensive groundwater exploitation, the incorporation of waters from a different basin, and the expansion of the city over former groundwater recharge areas are factors affecting the water balance in this part of the city. However not only the quantity of the groundwater resource is affected, the incorporation of new contamination sources associated to the urban environment produce change that has to be addressed. Due to the importance of the above topics in terms of a water management strategy, Chilean Government through the Dirección General de Aguas (DGA), its water conservation department, invite several public and private institutions and companies related to water protection, regulation, management and production to conduct and developed, in a coordinate scheme, a study focused on the impact of urban recharge on the aquifer system of the northern part of the city. The public institutions, apart from DGA, were Servicio Nacional de Geología y Minería, Comisión Chilena de Energía Atómica (CCHEN), Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) and Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). The private company was the main water supply and sanitation company, Aguas Andinas.

The main objective of this work is to present the methodology and main results of the isotopic study carried out in the main integrated study. This study counted with technical and financial support of International Atomic Energy Agency (IAEA) through the regional project “Integrated and sustained manage of groundwater resources in Latin America (RLA8/031)”.

3. Site characterization

The study area corresponds to the northern part of Santiago City, which is characterized by multiples land uses. Although the main land use of the study area is residential, there are important industrial areas and progressively reduced agricultural areas. With an extension of over 170 km², the study area represents more than one tenth of the total basin area and includes a population of more than 2 million inhabitants with an increasing industrial activity (more than 150 industries). This part of the city is one of which has had the most accelerated growth over the last 50 years. The urban development has produced an increment in demand for drinking water, which has been supplied by groundwater and surface water. This part of the city overlies extensive unconfined and confined alluvial aquifers that provide on average more than 35% of the total water demand, and it has the highest dependence on the groundwater [4]. Regional groundwater studies have pointed out a progressive decrease in quantity and quality of those aquifers [4]. Some of those previous studies showed the presence of specific contaminants, principally nitrate and sulfate [4,5], and others discussed the most probable sources of the contamination [6-8]. Today the presence of nitrate and sulfate is recognized, but its distribution and sources remain unknown. Most of the former studies report significant lowering of the water table beneath this part of the city.

4. Research approach

The research approach used in the study included the use of isotopic, geological, hydrogeological, and hydrochemical tools. A detailed geological and hydrogeological characterization and interpretation of the main aquifer units was obtained from [9], and the hydrochemical and selected isotopical characterization was taken from Iriarte et al (in progress). We will present the research approach related to the complete isotopic study.

Environmental isotopes have been successfully used to determine sources of recharge of groundwater.

The use of deuterium (²H) and oxygen 18 (¹⁸O) to discriminate among different sources of recharge is well demonstrated to be an effective indicator. To probe groundwater flow paths and recharge within the basin, tritium (³H) and carbon 14 (¹⁴C) analysis were carried out.

Since the former studies in that area has indicated anomalous concentrations of sulfate and nitrate, it were used the isotopes of both molecules to determine possible source for those contaminants. The different altitude and climatic conditions of the possible sources of groundwater recharge are the key factor for using water molecule isotopes. The isotopes of the sulfate molecule (^{34}S and ^{18}O) can be used to discriminate among different sources of sulfate, such as dissolution of evaporitic sequences, sulphide oxidation, atmospheric sources, etc. The isotopes of the nitrate molecule (^{15}N and ^{18}O) also allow discriminating from animal metabolic sources (animal farm infiltrations, sewage, etc.) or synthetic fertilizers.

The effectiveness of these methods is based on the distinctive isotope signatures of the possible sources of recharge and/or contamination.

The isotopic characterization of the groundwater was used as a important tool to characterize the possible sources of natural and anthropogenic recharge.

5. Methodology

The methodology of this study included office and fieldwork and considered the following steps: Information gathering, fieldwork and sampling, and analytical interpretation. The geological, hydrogeological and hidrochemical data are extensively described in [9], only isotopic related methodology will be presented.

The isotopic data correspond to the analysis of 113 groundwater and 35 surface water samples. These samples were taken from 70 wells and 28 surface water-sampling points, during 5 campaigns carried out between March 2002 and January 2003. Field parameters were also measured at each sampling location (Table 1).

The sample points were classified according to their provenances and spatial locations. Surface waters were classified in three groups, Mapocho River, irrigation channels (Maipo river-type waters), and local streams and springs. Groundwater samples were classified according to their position relative to regional flow direction including up-gradient wells (those located east of San Carlos Channel), central-south wells (central part of the study area and close to Mapocho River), central-north wells (central part and areas close to the local watersheds), and down-gradient wells (east of the central wells) (Figure 1). The well groups were further sub-divided in shallow, medium depth, and deep wells according to the screen depth. In general, the shallow wells have screens at depth less than 20 m below the water table, the medium depth wells have screens between 20 to 100 m below the water table, and the screens in deep wells are below 100 m.

The analyses for $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, $^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$, $^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$, and $^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ were performed at the Comisión Chilena de Energia Nuclear Laboratory (CCHEN - Chilean Atomic Energy Agency). The isotope analysis for $^3\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$, $^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$, $^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ and $^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ were carried out at the Environmental Isotope Laboratory of University of Waterloo.

5.1. Analytical procedures

Deuterium and Oxygen 18 were analyzed in a Finnigan MT 252 isotope ratio mass spectrometer (IRMS), using the Equilibrium Method [10]. The analytical error is ± 0.2 ‰ for ^{18}O and ± 1 ‰ for ^2H . Samples were taken in 125 mL plastic bottles directly from available well outputs. They were not filtered and no preservative added. Special care was taken to eliminate bubbles, avoid evaporation or atmospheric oxygen interaction.

Sulfur-34 and oxygen-18 from sulfate molecule were measured in the form of SO_2 gas on a VG Micromass 602D dual collector mass spectrometer. The analytical error is ± 0.3 ‰ for ^{34}S and ± 0.5 ‰ for ^{18}O . Samples for sulfur-34 and oxygen-18 analyses in sulfate were filtered (0.45m) and collected in 250, 500 or 1000 mL bottles, depending on its sulfate concentration. No preservative was added.

TABLE 1. SELECTED GROUNDWATER SAMPLING POINTS

Code	Type	Name	UTM_N	UTM_E	Altitude	Well depth	Screen	T° C	Cond	pH
RLA-1	Well	194-Q	6307500	337050	478	150.0	59-135	19.2	659	7.8
RLA-2	Well	202-Q	6307860	335585	474	112	60-104	19.6	282	8.9
RLA-3	Well	179-Q	6307004	338513	482	70	28-69	18.1	1183	7.3
RLA-4	Well	175-Q	6307410	338816	482	70	9-68.1	18.1	1421	7.1
RLA-7	Well	212-H	6306480	342690	497	150	121	17.4	1192	7.8
RLA-10	Well	147-SV	6306110	346934	509	100	38-95	17.9	1291	7.2
RLA-11	Well	113-P	6306406	348129	520	101	36-99	18.3	1091	7.2
RLA-12	Well	149-JA	6305750	344143	502	142	24-136	16.8	1513	7.2
RLA-13	Well	10-JAR	6301360	344710	502	130	120	16.8	1287	6.8
RLA-14	Well	131-R	6303062	341939	502	59	59	16.8	1283	7.2
RLA-17	Well	142-PC	6303756	345424	515	91	34-89	16.9	1437	7.0
RLA-20	Well	GBn	6309917	340793	482	42	42*	19.3	1544	7.8
RLA-21	Well	Bext	6308201	338423	482	38	38	21.3	1731	8.1
RLA-26	Well	SRH-2	6308082	344724	492			19.6	1644	7.7
RLA-31	Well	RMel	6300099	345213	549	75	67-75	17.7	1188	7.2
RLA-33	Well	CCU-9	6307102	341519	500	180	139-174	21.5	658	8.2
RLA-36	Well	Ecusa3	6302139	343652	517	196.5	152-181	19.1	526	7.6
RLA-38	Well	PyC	6303610	344044	509			16.6	1657	7.2
RLA-40	Well	Cer	6303266	346970	529	70.4	36-68	17.3	1330	7.6
RLA-41	Well	CGcre	6301727	346449	541	150	72-141	17.4	1110	7.7
RLA-44	Well	Tehm	6306749	339929	486	30	30*	18.6	1420	8.1
RLA-49	Well	CPolo	6305255	352797	675	75	75*	14.6	286	7.7
RLA-57	Stream	QLHA	6307733	348844	585			11.7	457	8.7
RLA-65a	River	RM	6306694	370132	960			7.6	254	7.7
RLA-65b	River	RM	6306694	370132	960			14.3	290	8.1
RLA-66	Spring	V-3	6308441	353894	1050				449	7.2
RLA-67	Pozo	AH	6300773	347377	560	90	75-90	17.4	1304	7.1
RLA-68	Spring	V-4	6308703	346500	650		?		663	7.5
RLA-76	Well	CGolf	6302359	352350	653	70	70 *	15.6	452	7.1
RLA-77	Well	CSIgn	6299836	351848	628	100	100 *	16.8	649	7.6
RLA-78	Well	Hipod	6303086	345288	518	65	65 *	17.1	1464	6.8
RLA-79	Well	HTrab	6298697	348424	560	100	99.2 *	16.3	914	7.1
RLA-83	Well	Entel	6298597	346220	587	96	74-85	26.0	984	7.5
RLA-85	Well	HRenca	6302659	343314	510	65	65*	17.7	1480	6.8
RLA-93	Channel	CC1	6301781	350496	700			12.4	732	7.9
RLA-94	Well	CCU-1	6307489	341660	521	80	70*	17.6	1443	7.1
RLA-95	Well	PLS	6302320	350785	620			15.1	422	7.1
RLA-96	Well	PB	6299996	349076	586			16.6	738	7.1
RLA-97	Well	78-LA	6304952	346681	510	100	16-61	16.8	1161	7.0
RLA-98	Well	HQ	6309826	344872	532			17.1	2065	7.4
RLA-104	Well	CC1	6307449	335958	474			20.3	423	9.1
RLA-107	Well	CC4	6307449	335958	474			18.8	1215	7.6
RLA-110	Tap water	SNGM	6299255	348376	580			18.8	845	7.6

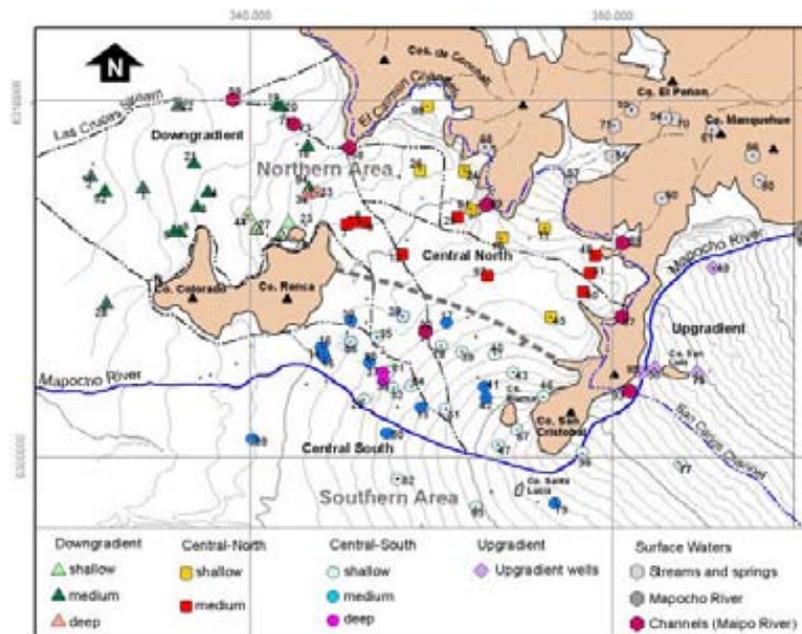


Fig. 1. Distribution of sampling sites.

Nitrogen-15 and oxygen-18 from nitrate dissolved in water were measured as gases, N₂ for ¹⁵N and CO₂ for ¹⁸O. The nitrogen gas (N₂) was analyzed by Mass Spectrometry, and the ¹⁸O/¹⁶O ratio was analyzed on a mass spectrometer. The analytical error is ± 0.4 ‰ for ¹⁵N and ± 0.4 ‰ for ¹⁸O. Samples for Nitrogen-15 and Oxygen-18 analyses were taken directly from available outputs in plastic containers from 1 L to 30 L, depending on the nitrate concentration. In order to preserve the sample for nitrate isotope analysis 1 ml of HgCl₂ was added for each liter of sample.

6. Hydrogeological setting

The groundwater system is strongly controlled by the predominant geological setting. Upper tertiary and quaternary alluvial deposits overlay mid tertiary volcanic and intrusive rocks. The sedimentary infill has variable geometry with low thickness toward the mountain ranges and increasing to the middle of the basin. At this area the main alluvial feature is the Mapocho River alluvial fan that covers almost the whole study area.

The main aquifers known are related to the sedimentary deposits (Figure 2). The older rocks recognized have relatively lower permeability and they are considered as impermeable basement. The major aquifers are associated to the alluvial deposits of Mapocho River and they have close relation to the sedimentary facies developed by the River. The axis of the Mapocho alluvial fan is close to east-west direction, being the topographically higher to the east and decreasing to the west.

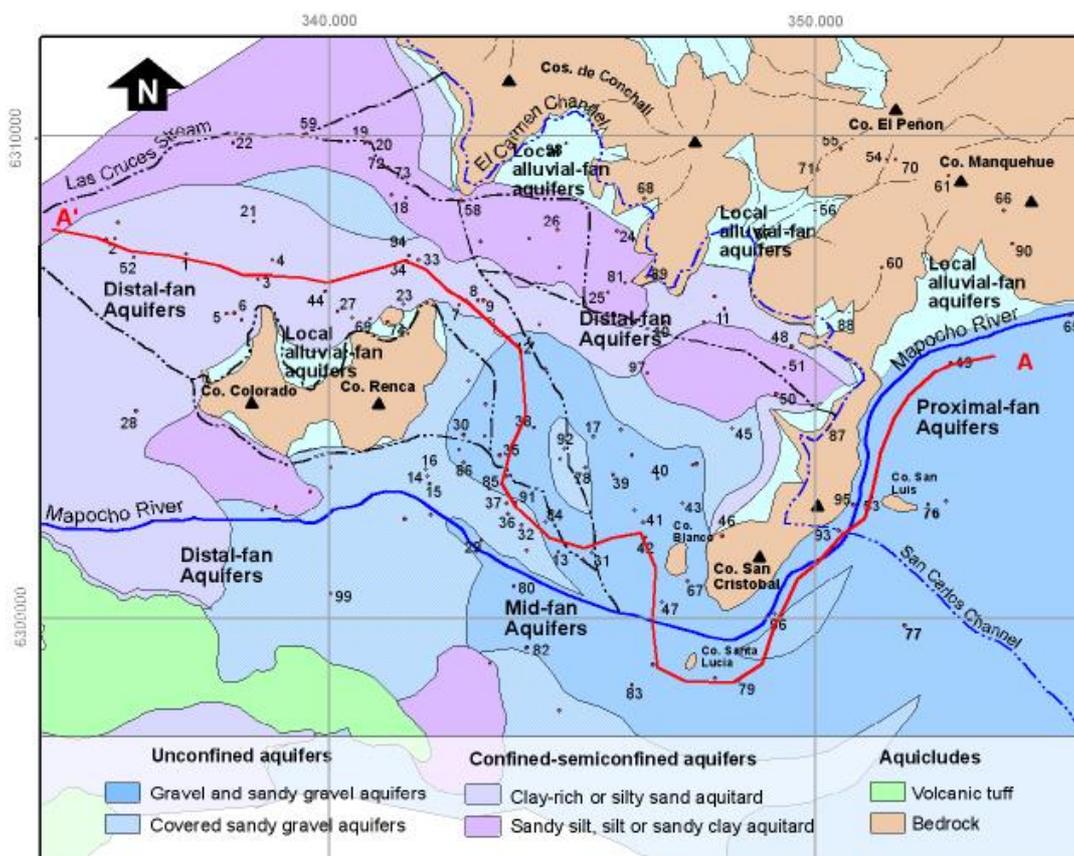


Fig. 2. Geological and hydrogeological units distribution.

At the east side it is developed a proximal fan aquifer characterized by sequence of interbedded layers of gravel, sand and occasional layers of silty sands (Figure 3). That aquifer is unconfined with saturated thickness ranging from 10 to 100 m. There is a local alluvial fan in the southern flank of Co. Manquehue, which is hydraulically connected to the main aquifer. The groundwater flow direction is close to parallel to the axis of the alluvial fan. To the central part of the study area there is a mid-fan aquifer compose by a sequence of sandy gravel layer interbedded with silty sandy and silty clayey layers. The upper part of the sequence is characterized by a coarse grain, composed primarily of gravel, coarse sand, and minor cobbles, within a medium-to-fine sandy matrix with low proportions of silt and clay. Estimated permeability values ranges between 10^{-2} to 10^{-4} $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. To bottom the sequence became progressively fine gained with medium and fine sand with abundant clay matrix, coarser grain sizes are found locally associated to channel facies (Figure 3). Although the high clay content and the increasing compaction with depth make this unit hydrogeologically unfavorable [11], the occurrence of discontinuous, coarse-grain, channel-type deposits define relatively thin aquifers that can be very productive. Estimated permeability ranges between 10^{-3} to 10^{-6} $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. That aquifer is mainly unconfined with saturated thickness from 100 to more than 300 m.

To the north, northwest and west of the study area the mid fan aquifer is hydraulically connected with distal fan aquifers. Sandy and sandy silt layers interbedded by clayey sedimentary units characterize the distal aquifers. The aquifer units may reach thickness up to 10 m in a multi-layer arrange of confined to semi-confined aquifers. These aquifer units present important lateral discontinuities mainly due to heterogeneous contributions from the mountain fronts and topographic heights. The high fine-grain content and discontinuity of these units constitute moderately productive aquifers. Hydraulic conductivity estimations range between 10^{-3} to 10^{-5} $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ for these aquifers units.

The described aquifer units constitute unconfined, semi-confined and confined aquifers, where the water level is located to variable depth depending on the location respect to the mountain front. Water levels between more than 100 m to less than 1 m are common in these aquifers. The general shape of the piezometric surface is similar to the topographic configuration of the ground surface (Falcon et al, 1970). However, both surfaces tend to be closer to the west away from the mountain front.

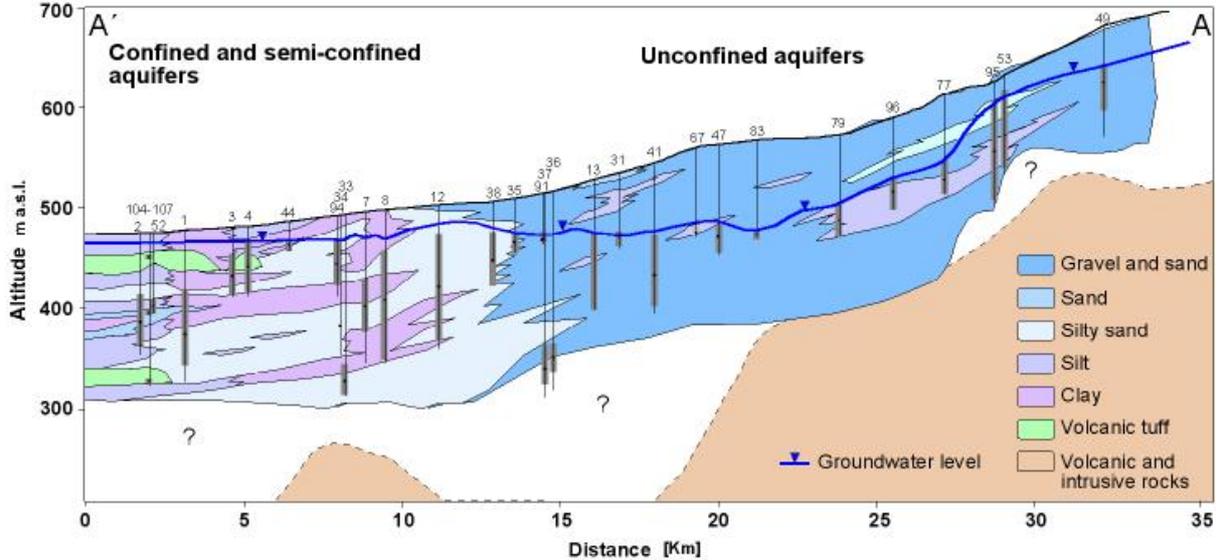


Fig. 3. Hydrogeological section trough AA' in Figure 2.

Natural recharge is only generated outside the urban area and is mainly due to: direct precipitation, subsurface inflow from mountain front, from rivers and ephemeral streams, and from upgradient aquifers. The only areas where direct precipitation may act as an effective mechanism of recharge is constrain to the surface of the local alluvial fans, piedmonts of the mountain fronts, and the riverbanks of Mapocho River. Recharge due to subsurface inflow from the mountain front is considered a minor source due to the step slope, poor soil development, and low degree of fracturing of the mountain front. Recharge from rivers and ephemeral streams can be significant where the streambed is fairly permeable, where the aquifer is unconfined, and the water table is deep enough to allow flow from the stream to the aquifer. Recharge associated to Mapocho River is efficient in the upper part of its alluvial fan, where the fluvial and alluvial deposits are more permeable and the water table is always deeper than 20 m. Streams from local watersheds only flow in winter associated to seasonal rains. Recharge from upgradient aquifers in the apex of the Mapocho River alluvial fan.

Urban recharge may occur as direct recharge (at the impact point), from leakage of drinking water, sewage, and storm water system, and irrigation channel loses. Direct recharge may occur only in open areas such as municipal parks, sport complexes and gardens, which also receive water from the water supply system or local groundwater. However most of the direct precipitation turns into runoff, which are drained to low lying areas or are incorporated into storm drains. The relatively high topographic gradients generated by the alluvial fan environment in Santiago City contribute to increase surface runoff and reduces the possibility of direct infiltration. Some depressed areas, mainly north or northwest of the study area, receive this surface runoff and may produce a localized recharge. The recharge due to leakage from the drinking water, sewage, and storm water systems has been well documented in many large cities to be a very important source of recharge [2, 3, 12]. The leakage is usually produced by defects on the pipelines or in the joints between lines. Considering most of the city in the study area is located over very permeable units, the water from leakage may easily reach the saturated zone. Leakage from sewage system tends to be considered a minor source of recharge [12], however it may be the main source of contamination in the urban environment. Recharge from infiltration channels passing through the city is generally classifies as a lineal recharge [2] and it is produced by loses at the base of the channels. In the study area, there is a wide network of irrigation channels that cross through the city.

The main groundwater quality problems in the study area are related to the high levels of sulfate and nitrate. However, relative high level of iron, manganese and chloride also presents some risks for drinking water purposes. More than 80% of the wells below the urban area exceeded the maximum concentration limit (MCL) of $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for sulfate, and more than 40% showed values of nitrate above the MCL of $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (following the Chilean regulations-NCh 409). Furthermore, relative high levels of iron and manganese may present local problems. More than 30% of wells exceed the MCL for iron (MCL Fe= $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and less than 10% for Mn (MCL Mn= $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Although Ca and Mg are not regulated in terms of its concentrations, their high concentrations in the groundwater are responsible for the high hardness of the water. About 80 % of the groundwater has concentration $> 180 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ as CaCO_3 and almost 50% of the waters have levels more than $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ as CaCO_3 .

Nitrate presents the highest problem for human health in this area. Excessive levels of nitrate in drinking water could cause serious illness and sometimes death in infants. Because nitrate in groundwater in urban environment is often associated to sewage waste, its presence is evidence of contamination. Sulfate above MCL can have laxative effects and also contribute to scale accumulation in boilers and heaters. High level of iron and manganese only has aesthetic and technical effects on groundwater. Iron usually produces a rusty color, a metallic taste in water, and a typical reddish or orange staining, while manganese produce a black to brown color, a bitter metallic taste in water, and a black staining.

The main sources of recharge are hypnotized to be infiltration from Mapocho River, local recharge from precipitation over adjacent watersheds, losses of water supply system and losses from irrigation channels.

Mapocho river is characterized by low conductivity values 250 to 290 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, neutral to slightly alkaline pH and dominated by calcium, bicarbonate and sulfate has major ions. The proportion between HCO_3^- and SO_4^{2-} is very similar during winter time but during summer time sulfate is increased. That relationship may be explained due to incorporation of sulfate from the upper catchment during snow melting. The other major components are usually low.

Springs and streams at the Cerros de Conchali - Manquehue range represents local recharge. Recharge is characterized by moderate to low conductivity values (450 to 660 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) and slightly alkaline pH. That water composition is calcium-carbonate type with relatively high values of NO_3^- (4 to 11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). The anomalous nitrate concentrations can be related to the activity of small cattle farms in this area. The other major components are usually low.

The water supply system in most of the area and the major irrigation channels come from Maipo River. These waters present moderately high conductivity values (730 to 850 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) and pH values slightly alkaline. They are characterized by high sulfate and calcium concentrations. Sulfate reaches values equal or higher than 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The waters are calcium sulfate type.

The hydrochemical signature of groundwater is distinct according to the geographical location and depth. The aquifer upgradient shows a good quality water low conductivity and equivalent proportions of sulfate and bicarbonate. Its chemistry and hydrogeological setting support the hypothesis of a close relation with Rio Mapocho waters. In the Central area deep water is closely related to upgradient water except for a relative increment of Na proportion probably related to a cation exchange mechanism. The medium and shallow aquifers are chemically different from upgradient aquifers, mainly due to increments in Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and NO_3^- concentrations. The increases of those elements must be related other sources of recharges, being highly probable losses of water supply and sewage system. To the northern area the chemical signature is not related to local recharge but similar to channel water composition. The high sulfate content must be related to processes of concentration due to evaporation in those poor drained areas. Downgradient area show different chemical composition depending on depth and westerly positions. Shallow water is highly sulfated with similar characteristic to those of northern area. However the more accentuated proportion of Na it appears to be affected by cationic exchange processes. Deep and/or western aquifers are low conductivity, high pH and high As concentrations [9].

7. Isotope characterization of surface water and groundwater

Hydrochemical characterization shows that some of the issues related to groundwater quality may be associated with the different sources of recharge experiences by the study area.

In order to determine each source and considering the physical, chemical and geographic characteristics of the sources of recharge, the use of stable isotopes may constitute a valuable tool to discriminate between them. Stable isotopes of the oxygen and hydrogen were used to evaluate the origin of the groundwater. Carbon 13 (^{13}C) was used to evaluate mechanisms of natural recharge. Radioactive isotopes as Tritium (^3H) and Carbon 14 (^{14}C) were used to dating groundwater and determine recharge sources and groundwater flowpaths. Due to the high concentrations of sulfate and nitrate isotopes of S, N, and O from the respective molecules can be used to determined origin from each source.

Isotopic data from stable and radioactive isotopes are shown in Tables 2 and 3.

TABLE 2. ISOTOPIC DATA FROM SURFACE WATER SAMPLES

Sample number	Sample type	Code	² H (H ₂ O) ‰	¹⁸ O (H ₂ O) ‰	³⁴ S (SO ₄) ‰	¹⁸ O (SO ₄) ‰	³ H TU
Drinking water - Central Sector							
RLA-110	Potable	SNGM	-119,7	-16,5			
Mapocho River							
RLA-65a	River	RM	-95,8	-12,9			
RLA-65b	Rio	RM	-101,1	-13,9	3,4		2,1 ± 0,5
Canal El Carmen / Canal San Carlos							
RLA-93	Channel	CC1	-114,5	-15,8	11,9	7,9	
Springs							
RLA-57	River	QLHA	-68,2	-9,5			
RLA-66	Spring	V-3	-66,6	-9,2			
RLA-68	Spring	V-4	-65,5	-8,9			

TABLE 3. ISOTOPIC DATA FROM GROUNDWATER SAMPLES

Sample number	Code	² H (H ₂ O) ‰	¹⁸ O (H ₂ O) ‰	¹⁵ N (NO ₃) ‰	¹⁸ O (NO ₃) ‰	³⁴ S (SO ₄) ‰	¹⁸ O (SO ₄) ‰	³ H TU	¹⁴ C pmc
Northern sector wells									
RLA-7	212-H	-103,7	-14,1	6,7	4,9	10,6		2,2 ± 0,7	
RLA-10	147-SV	-93,3	-12,7	8,9	4,4	9,5	6,0		
RLA-11	113-P	-106,4	-14,7	6,8	5,0				
RLA-12	149-JA	-117,8	-16,2	6,4	5,7	11,4	6,5		
RLA-26	SRH-2	-102,9	-14,0	12,3	5,2	9,8	6,6		
RLA-97	78-LA	-102,6	-14,1	5,1	4,0	9,9	6,4		
RLA-98	HQ	-102,8	-14,0	6,3	4,1	11,3		3,0 ± 0,5	
Upgradient sector wells									
RLA-49	CPolo	-94,1	-12,8			3,0	1,4	1,9 ± 0,5	
RLA-76	CGolf	-95,1	-12,9	7,3	8,9			1,6 ± 0,5	
RLA-77	CSIgn	-94,3	-12,8	6,1	2,9			2,4 ± 0,5	
RLA-95	PLS	-92,4	-12,8	3,7	7,2	3,1	0,3		
Central sector wells									
RLA-13	10-JAR	-105,3	-14,5	9,8	6,9			2,1 ± 0,5	
RLA-17	142-PC	-105,7	-14,4	9,9	5,1	10,8			
RLA-41	CGcre	-104,6	-14,0	7,6	4,0	10,5			
RLA-79	HTrab	-102,9	-14,0	8,8	4,4	9,3			
RLA-36	Ecusa3	-92,5	-12,7	5,0	3,7	7,0	3,6	<0,8 ± 0,5	
RLA-14	131-R	-107,7	-14,9	7,5	2,9	11,1			
RLA-31	RMel	-107,6	-14,7	11,8	5,2	12,0	7,7	2,4 ± 0,5	
RLA-38	PyC	-109,9	-14,7	9,6	3,5	11,6	6,4		
RLA-40	Cer	-106,3	-14,4	9,6	0,9			2,4 ± 0,5	
RLA-67	AH	-102,2	-14,1	5,6	5,5	9,8	5,6		
RLA-78	Hipod	-106,0	-14,4	9,4	2,4			1,9 ± 0,5	
RLA-83	Entel	-110,2	-15,2			11,0	6,5		
RLA-85	HRenca	-108,3	-14,7			3,4		2,1 ± 0,5	
RLA-96	PB	-95,6	-13,5	6,6	5,2	8,2	5,4		
Downgradient sector well									
RLA-33	CCU-9	-85,0	-11,4	5,7	4,2	8,4	4,8	<0,8 ± 0,6	70,4 ± 0,49
RLA-104	CC1	-87,6	-11,8						
RLA-1	194-Q	-93,4	-12,6	6,4	4,4	7,9			
RLA-2	202-Q	-83,5	-11,2	5,0	4,6	3,7	3,9	<0,8 ± 0,5	
RLA-3	179-Q	-101,7	-13,8	11,2		9,9			
RLA-4	175-Q	-104,5	-14,2						
RLA-20	GBn	-87,7	-11,7	11,7	9,0	9,1			
RLA-21	Bext	-105,6	-14,3						
RLA-44	Tehm	-104,5	-14,1						
RLA-94	CCU-1	-105,3	-14,3			10,0	6,1	2,4 ± 0,5	108,07 ± 0,67
RLA-107	CC4	-95,4	-13,1						85,7 ± 0,59

7.1.1. Stable isotope data in Water (^{18}O and ^2H)

Precipitation data was used from public data taken by IAEA (meteorological station located at 470 m.a.s.l in Aeropuerto Pudahuel Station from IAEA online database). The weighted mean average isotope composition of the precipitation corresponds to values of -9‰ and -60‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$, respectively [9] (Figure 4).

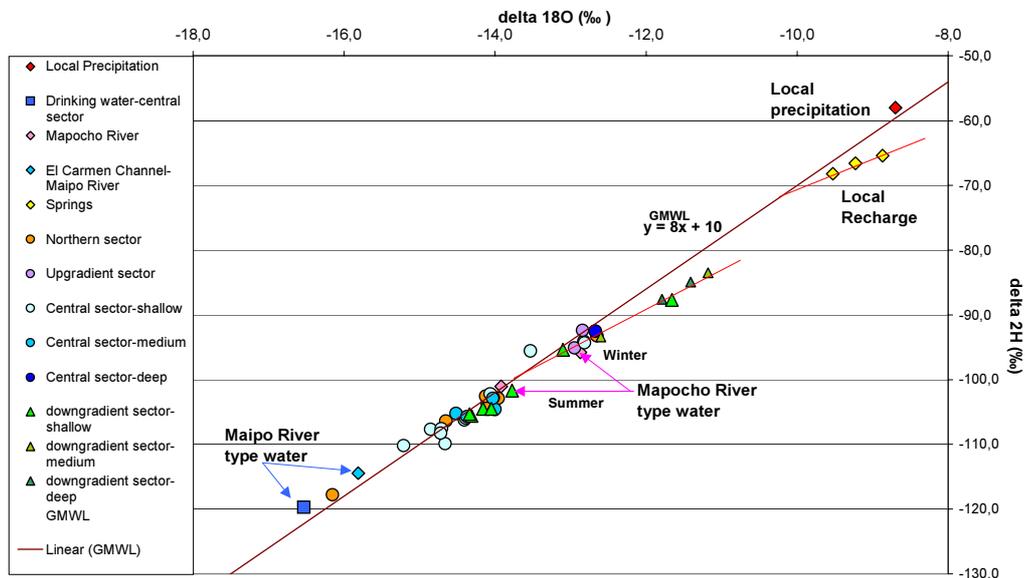


Figure 4. Stable isotope distribution (^{18}O and ^2H graph).

Surface waters related to the study area are: a) the Mapocho River, b) runoff associated to local watersheds (Pincoya and Huechuraba), c) and irrigations channels fed by the Canal San Carlos that carries water from the Maipo River. The isotopic composition measured in the Mapocho River during June 2002 was -13‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -96‰ for $\delta^2\text{H}$ (Table 6.1). However, seasonal variation in the isotope composition of the Mapocho River has been observed in previous studies [6, 8] ranging between -13‰ to -16‰ $\delta^{18}\text{O}$ and -96‰ to -124‰ for $\delta^2\text{H}$ (Figure 4). The highest δ values, -13‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -96‰ for $\delta^2\text{H}$, were obtained in winter (June-August), which is related to rain precipitated at an altitude around 1,000 to 1,500 m a.s.l. At altitudes above 2,000 m a.s.l, the winter precipitation is composed mostly of snow. The lowest isotopic values, -16‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -124‰ for $\delta^2\text{H}$, are related to the snowmelt water that corresponds to snow precipitated at high altitude.

The isotope composition of the local watersheds was evaluated analyzing nine ephemeral streams and permanent springs. The samples were taken at altitudes between 580 and 1,200 m.a.s.l. The δ values range from -8.9‰ to -10‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -65‰ to -73‰ for $\delta^2\text{H}$, which is consistent with the isotope value of the precipitation around 700 m a.s.l inferred from Figure 4.

The Canal San Carlos and the irrigation channels (feed by the Canal San Carlos) showed a narrow range of δ values between -15.5‰ to -16‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -113‰ to -116‰ for $\delta^2\text{H}$. However, the source of the Canal San Carlos, the Maipo River, showed significant seasonal isotopic variation. References [6, 8] report a winter-summer variation of more than 2‰ for $\delta^{18}\text{O}$, between -16‰ to -18‰. Similar to the Mapocho River, the more enriched values were observed in the winter and the more depleted during the summer (snowmelt effect). The isotope range for both rivers is represented on Figure 6.1 that showed that the more enriched isotopic composition of the Maipo River (Winter time) overlap with the most depleted isotopic values of Mapocho River (Summer time) (Figure 4).

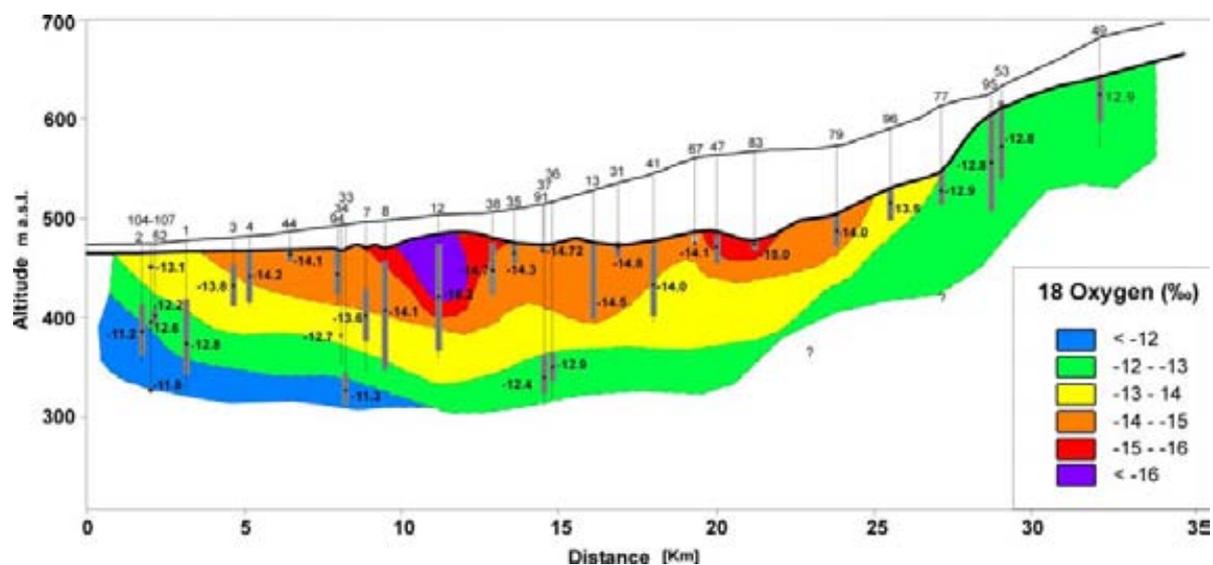


Figure 5. Isotopic distribution in AA' section.

The isotopic composition of groundwater shows a wide range of values from -9‰ to -16‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -70‰ to -120‰ for $\delta^2\text{H}$. Although the values plot close to the global meteoric water line (GMWL), there are some samples from the down-gradient area (Northern sector) that seems to show the effect of evaporation. In general, the groundwater in the Central-south (CS), Central-north (CN) and down-gradient areas shows the greatest range of isotope values. On the other hand, the isotopic composition of the up-gradient groundwater representing the groundwater present in the alluvial of the Mapocho River tends to be very constant, around -13‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -96‰ for $\delta^2\text{H}$. In the Central-south and down-gradient area, the isotopic composition is clearly controlled by depth (screen depth below water table). The shallow wells show much more depleted isotope values than the deep waters. In the Central-south area, the isotope composition of the deep wells showed a very constant value of range -12.5‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -93‰ for $\delta^2\text{H}$. The shallow wells showed an isotope range between -14‰ and -16‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -102‰ and -115‰ for $\delta^2\text{H}$ (Figure 5). A similar pattern is observed in the down-gradient area. This pattern has to be associated to an input of very isotopically depleted water into the aquifer. This source cannot be direct recharge by local precipitation, which is characterized by values of -9‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -60‰ for $\delta^2\text{H}$. The most probably source of this recharge could be associated to leakage of the drinking water distribution system and sewage system. The source for potable water and consequently for sewage water is the Maipo River that is characterized by isotope values between -15.8‰ to -18‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and -108‰ and -132‰ for $\delta^2\text{H}$. In the Central-north area, leakage by the irrigations channels that are also fed by the Maipo River water could also be a source of recharge to this area.

7.1.2. Tritium and Carbon 14

Tritium samples were taken along the flowpath from the upper part of the basin to the downgradient area. Tritium data range from 3 TU to < 0.8 TU (Figure 6). Although there is no precipitation data, it is assumed values around 3 TU correspond to the current (2002) tritium level of precipitation and main surface water.

In the upper part of the study area it is shown a decreasing trend of tritium levels from 2.1 TU, in the Mapocho River, to 1.6 TU approximately 6 km downgradient. However downgradient San Carlos Channel most the shallow and medium depth wells shows ^3H values above 2.1 TU, which is indicative to modern recharge. It is presented on Figure 6.3 that only deep wells and the westerly one present ^3H values below detection limit (<0.8 TU).

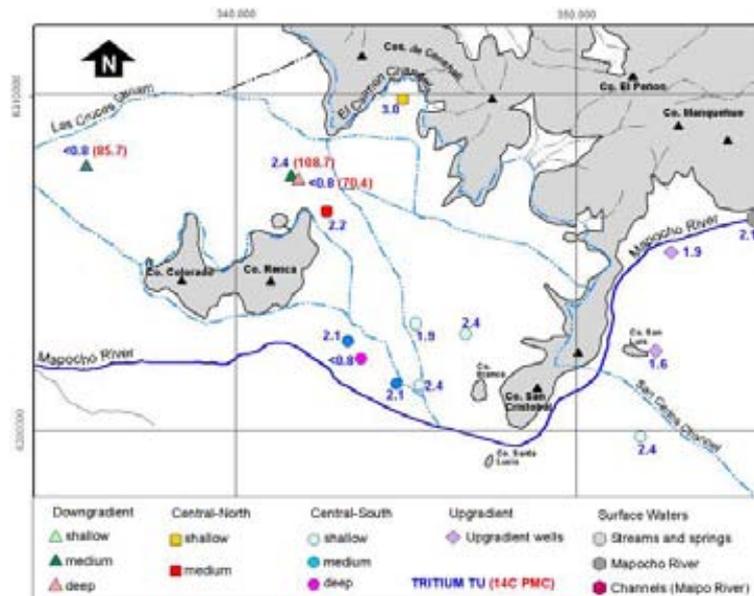


Figure 6. Tritium and ^{14}C distribution.

Considering the stable isotope results it is consistent that the relatively high tritium values in the central area are indicative to fast recharge from modern water from Maipo River through leakage of water supply system or channel losses. The very low values of tritium of deep wells are related to water from deep regional flowpath.

If it is assumed there is minimal recharge from Mapocho River in the upper part of the basin the decreasing values of tritium in this area are related to a natural decay. From a value of 2.1 TU take 1.8 to 4.8 years to reach the values obtained in the two wells located in that area (upgradient San Carlos Channel). These values gives a flow velocity between 3 to 4 $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$.

The Carbon 14 values, taken from specific wells, shows the shallow well in the downgradient area is recharge from modern water (108.7 pMC). Meanwhile a deep well located in the same area show a value close to 70 pMC. This value indicates an age of 3000 year for this deep water. The value of 85.7 pMC is interpreted as a mix between new water and old water in the discharge zone of Las Cruces Stream.

7.1.3. Stable Isotope data in Sulfate (^{34}S and ^{18}O)

In order to reinforce the chemical and isotopic evidence that indicate the high concentrations sulfate are mainly related to sources related to the Maipo River waters, others isotopic tools were also considered. Since the geological environments of the catchments areas of the main recharge waters, the Mapocho and Maipo Rivers, are completely different [9], the analysis of the isotopes of sulfate (^{34}S and $^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$) were considered useful to discriminate their sulfate contribution to the groundwater.

The main sources of sulfate of Maipo River are extended outcrops of gypsum related to Oxfordian marine evaporites located in the upper part of its catchments area. Otherwise, large outcrops of magmatic pyrite-bearing rocks associated to Miocene porphyry copper deposits and hidrothermal alteration zones are the main sources of sulfate in Mapocho River catchment area.

The isotopic compositions of sulfate derived from dissolution of gypsum and from oxidation of pyrite are extremely different [10, 13]. While the $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ values are close to 0‰ or negatives for sulfate from magmatic pyrite oxidation, those values for sulfate related to dissolution of gypsum are highly positive. Isotopic values for sulfate from the Mapocho are +1.94‰ for $\delta^{34}\text{S}$ and -1.42‰ for $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ (Table 3). For the Maipo river, the sulfate is characterized by values of +11.92 ‰ for $\delta^{34}\text{S}$ and +7.94‰ for $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ (Table 3). These results are consistent with the expected isotope values based on the geology and give enough differences to discriminate both sources in groundwater.

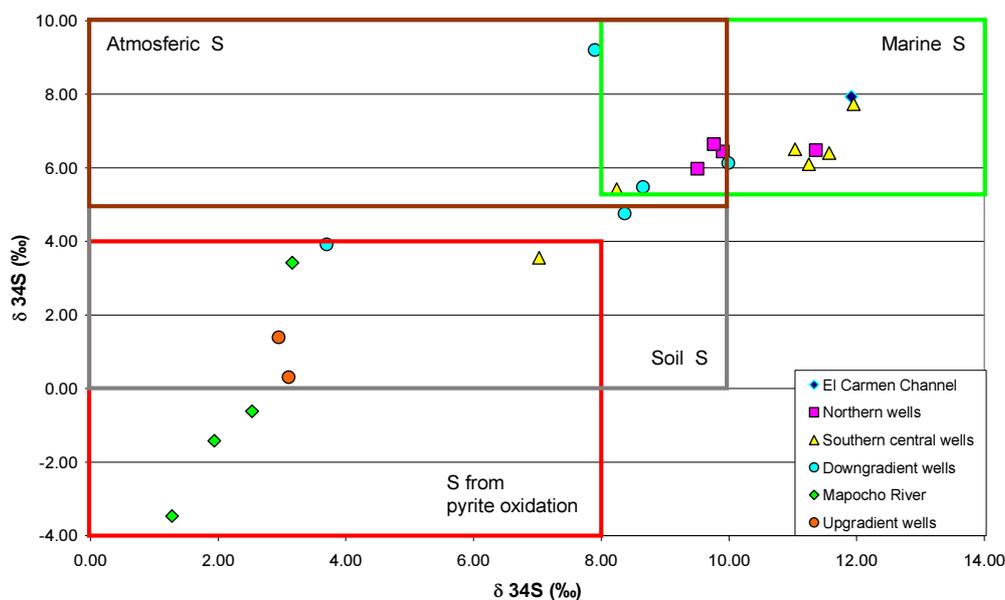


Fig. 7. Sulfate isotope composition (^{34}S vs ^{18}O).

The $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ data from groundwater (Table 4) showed the sulfate have an isotopic composition that falls between two extreme values characterized by Mapocho and Maipo Rivers water. The waters from up-gradient wells are very similar to Mapocho River and mainly produced by pyrite oxidation as expected, but they can have some influence of soil or atmospheric sulfur (Figure 6.3). On the contrary, the dissolved sulfate of shallow wells in the central part of the intermediate-south area show isotopic compositions related to dissolution of marine evaporites, similar to the Maipo River sulfate. Although the samples from intermediate-north wells also fall into the marine-sulfur field, they showed a slight displacement toward the atmospheric-sulfur field. This relationship is coherent with isotopic and chemical data that indicated some local water contribution to this sector. The deep samples show a not clear affinity. Considering that the isotopic composition (^{18}O , ^2H) of the deep groundwaters are very similar to the up gradient wells, it is possible that the slightly isotopically enriched sulfate observed in these waters can be associated to an small contribution of shallow groundwater and/or the occurrence of some sulfate reduction in the deep samples.

7.1.4. Stable Isotope data in Nitrate (^{15}N , ^{18}O)

Although the sources of nitrate in the study area appear to be mainly related to leakage from sewage system, some doubts still remains in areas where agriculture activities are still active or where there were agriculture activities a few decades ago.

It is well documented the differences in $\delta^{15}\text{N}$ values for nitrate from industrial fertilizers and nitrate associated to domestic and animal waste [10, 14]. Synthetic fertilizers produced by fixation of atmospheric N_2 have $\delta^{15}\text{N}$ values in the range of -4 ‰ to +4 ‰ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ values in the range of +18‰ to +22‰, reflecting its atmospheric source [14]. On the other hand, the typical range of $\delta^{15}\text{N}$ values in manure, septic systems, and sewage are in the range of +10 to +20‰ [15]. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ values in nitrate from these sources are controlled by the isotope composition of the oxygen and water. Laboratory studies have shown that biologically formed nitrate take one oxygen atom from the atmospheric oxygen and the others two from the water molecule [10].

The isotopic composition of nitrate in groundwater in the study area ranges between +3.7‰ to +12.5‰ for $\delta^{15}\text{N}$ and to 1.8‰ to 7.17‰ for $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$. Although there is not much variability between the $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ values, mostly range between 3‰ to 5‰, they appear to be more enriched than the expected values considering the original waters involved in the recharge processes are in the range of -

14‰ to -16‰ for $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$. A possible explanation for these enriched $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ values, assuming that most of the enriched $\delta^{15}\text{N}$ values are associated to nitrate from the sewage system, is the soil oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) that participate in the nitrification process is more enriched than + 22‰. This enrichment can be produced by oxygen consumption in the unsaturated zone by oxidation of organic matter associated to the sewage leakage.

Figure 8 shows that most of the shallow samples fell into the manure-sewage field, while the samples from the medium, deep, and up gradient wells fell into the soil-derived nitrate range. Some medium and shallow samples fell between both fields, indicating mix conditions. The only one sample that fell into the fertilizer field is located close to parks and sport complex that are usually fertilized.

The isotope data for sulfate and nitrate confirm the hypothesis postulated using the isotope (^{18}O , ^2H) and chemical data that the sources of contamination to the aquifer is associated to leakage of the water distribution and sewage network systems.

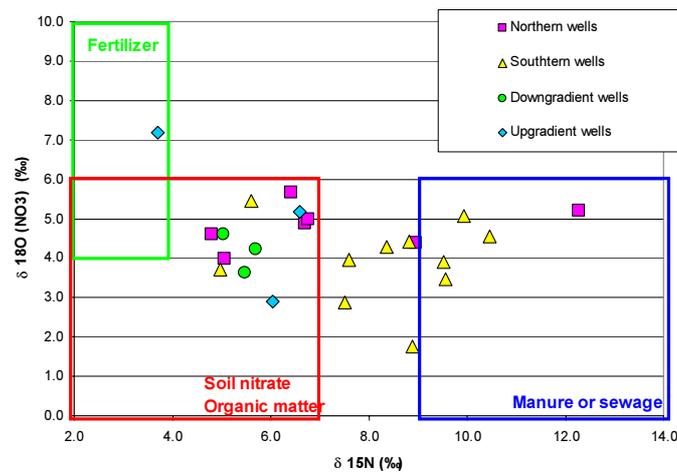


Fig. 8. Nitrate isotope composition (^{15}N vs ^{18}O).

8. Conclusions

The isotopic data shown a recharge model based on natural recharge sources and strong antropogenic recharge sources. The Santiago Norte aquifer receives natural recharge from the upper part of Mapocho River and from the proximal cordilleran front. There is no recharge from direct precipitation over the city. Urban recharge is clearly identified in the central area associated to water with the distinctive signature of Maipo River.

The isotopic data of the groundwater immediately below the urban area show a strong contrast respect of the chemical and isotopic composition of the natural recharge. The high sulfate and chloride content and the more depleted oxygen 18 and deuterium values observed in the urban areas groundwater show a strong affinity with the Maipo River type waters. This affinity was confirms with the sulfur-34 and oxygen-18 data in sulfate present in the groundwater below the city. The chemical and isotope data showed the sulfate in the shallow wells beneath the City comes from dissolution of marine evaporates that coincided with the origin of the sulfate of the Maipo River. Since the Maipo River feeds the drinking water distribution system and the sewage network, it is concluded the aquifer is been impacted by a subsurface recharge from leakage of these sources.

The highest nitrate concentration is also located below the city. Nitrogen-15 and oxygen-18 data obtained in the nitrate conclusive showed the nitrate come from animal sources (septic tanks, sewage system and manure). Although the nitrate contamination is not as spread as the sulfate contamination, its extension is large enough to discard a unique and point source. Possible nitrate sources are restricted to leakage from sewage system, the local Horse Race Field and its surrounded areas, the local cemeteries, and abandoned septic systems. However, based on the extension of the plume and

considering that the contaminant load has to be relatively high and continuous, the most probable source for nitrate contamination is leakage from the sewage system.

The water quality of Santiago Norte Aquifer is strongly modified by the urban recharge, understanding as urban recharge in this area leakage from the drinking water distribution system and the sewage network.

The leakage from the drinking water system produce the incorporation of high concentrations of several chemical compounds, including sulfate, chloride, calcium, and magnesium.

REFERENCES

- [1] Foster, S. 1990. Impacts of urbanization on groundwater. In: Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas. Massing, H., Packman, J., and Zuidema, F.C. (eds.). IAHS-AISH Pub. no. 198. Wallingford, UK.
- [2] Lerner, D. 1990. Groundwater recharge in urban areas. In: Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas. Massing H., Packman J., and Zuidema F.C. (eds.).
- [3] Foster S.S.D. Morris B.L. and Chilton P.J., 1999. Groundwater in urban development - a review of linkages and concerns. In: Ellis J.B. (ed), Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality, IAHS publ. 259, 3-12.
- [4] Dirección General de Aguas (DGA), 2000. Modelo de Simulación Hidrológicos Operacional Cuencas de los Ríos Maipo y Mapocho. Public report by Ayala, Cabrera y Asociados Ltda.
- [5] Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), 1999. Análisis de la contaminación de aguas subterráneas en la Región Metropolitana, por aguas servidas. Public report by Ayala, Cabrera y Asociados Ltda
- [6] Silva, A., Salazar, C., Merino, A., Pollastri, A., Aguirre, E. 1993. Aplicación de Técnicas Isotópicas en la Caracterización Preliminar de la Contaminación del Acuífero del Gran Santiago. In: Seminario regional sobre aplicaciones ambientales de los isótopos y de las radiaciones. Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) y Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- [7] Grilli, A., Tore, C., Aguirre, E., Moya, P. 2000. Cuidado con el Nitrato. Revista Vertiente, Año 5, N°5.
- [8] Tore, C. Grilli, A., Aguirre, E., Moya, P. 2001. Application of hydrochemistry d isotopic hydrology to identify recharge areas and characterize nitrate contamination in the Santiago Aquifer. In: III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Pucon-Chile. [CD-Rom].
- [9] Iriarte, S. 2003. Impact of urban recharge on long-term management of Santiago Norte Aquifer, Santiago-Chile. Master of Science thesis degree. University of Waterloo. Ontario. Pp. 196.
- [10] Clark, I., and Fritz, P. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology: New York, Lewis Publishers, 328 p.
- [11] Falcon E., Castillo O., Valenzuela M., 1970. Hidrogeología de la Cuenca de Santiago. Publicaciones Especiales No. 3. Instituto de Investigaciones Geológicas. Sección Hidrogeología. Corporación de Fomento de la Producción. Departamento de Recursos Hídricos.
- [12] Lerner, D. 2002. Identifying and quantifying urban recharge: a review. Hydrogeology Journal, 10(1): 143-152.
- [13] Krouse, H. and Mayer, B. 2000. Sulfur and oxygen isotopes in sulphate. – In: Environmental Tracers in Subsurface Hydrology (Cook, P. G. & Herczeg, A. L., eds.), pp.195 – 231. Kluwer Academic Press, Boston.
- [14] Kendall, C., and Aravena, R., 2000. Nitrate isotopes in groundwater systems, Chapter 9, In: P. Cook and Herczeg, A.L. (Eds.), Environmental Tracers in Subsurface Hydrology, Kluwer Academic Publishers, p. 261-297.
- [15] Kreitler, C. 1979. Nitrogen isotope ratios of soils and ground-water nitrate from alluvial fan aquifers in Texas, J. of Hydrol., 42, 147-170.

Estudio Hidrogeológico y Modelación del Acuífero Centro-Norte de Quito

V. Parreño^a, E. Pazmiño^a, T. Muñoz^a, C. Altamirano^b, G. Conlago^c, O. Yán^c

^a Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Quito - EMAAP-Q, Quito, Ecuador

^b Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica - CEEA, Quito, Ecuador

^c DMMA, Quito, Ecuador

Resumen El acuífero de Quito está constituido por dos subcuencas denominadas Sur y Centro-Norte. Por los requerimientos propios de la ciudad, la EMAAP-Q resolvió priorizar el estudio de la subcuenca Centro-Norte donde se realizaron la mayoría de las investigaciones recientes. A partir del año 1991 en que entra en funcionamiento el Proyecto Papallacta, la EMAAP-Q dejó de bombear los pozos del acuífero de Quito, y por recarga natural, se ha producido el almacenamiento de grandes volúmenes de agua subterránea provocando el ascenso de los niveles hasta cotas superficiales. Por ello se hace necesario su explotación para contribuir al abastecimiento complementario de agua potable para el Distrito Metropolitano de Quito, con un caudal superior a $800 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$; su aprovechamiento provocará descensos de los niveles freáticos, eliminando las afectaciones a los subsuelos de grandes edificaciones; y se constituirá en una alternativa estratégica permanente de abasto de agua en caso de desastres naturales o cuando los otros sistemas dejen de operar por cualquier causa. Una vez recopilada y evaluada la información disponible se definieron los requerimientos para configurar las características del Acuífero Centro-Norte y se planificó y ejecutó un programa de investigaciones.

Abstract. The Quito aquifer is composed of two sub-basins: one in the South and the second in the Central-North area. Due to the characteristics of the city, the local water company gave priority to the study of the Central-North sub-basin, where most of the recent studies have been carried out. Since 1991, when the Papallacta project was implemented, EMAAP-Q stopped groundwater extraction from the Quito aquifer, and due to natural recharge, large volumes of groundwater have been recharged, leading to the progressive rising of the water level, up to the surface. The current situation has forced the exploitation of the aquifer as a contribution to the water supply of the Metropolitan District of Quito, with a flow-rate above $800 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. This pumping will lead to the lowering of the water table, limiting the consequences of the high water levels to the basement of buildings, and at the same time, groundwater will become an strategic alternative of water supply, especially in cases of natural disasters or when surface water systems are not operative. After compilation and evaluation of the hidrological information, the main charactersitics of the Quito aquifer, mainly the Central-North sub-basin, were defined after completing a research programme.

1. Introducción

1.1. *Justificación y problemática*

La ciudad de Quito está situada en una franja lateral del callejón interandino entre las cotas 2750 y 3100 m.s.n.m., cuenta con una población próxima a los dos millones de habitantes que paulatinamente ha agotado sus fuentes de abastecimiento de agua superficial, dentro de la cuenca hidrográfica sobre la cual se asienta, por lo que se ha visto en la necesidad de captar caudales adicionales por medio de trasvases de cuencas hidrográficas cercanas que por unos años más garantizarán la demanda de agua potable de la comunidad. Si bien en la actualidad las aguas subterráneas no son un aporte significativo para el abastecimiento de agua potable de la ciudad, también es cierto que se debe contar con ellas como fuente alterna en circunstancias emergentes o para un futuro cercano.

Bajo la ciudad de Quito existe un acuífero constituido por dos subcuencas denominadas Sur y Centro-Norte, mientras que en los valles aledaños se encuentran los acuíferos de Tumbaco y Los Chillos. Por los requerimientos propios de la ciudad, la EMAAP-Q resolvió priorizar el estudio de la subcuenca Centro-Norte donde se realizaron la mayoría de las investigaciones recientes y constituye el objetivo del presente trabajo.

1.2. Objetivos

El aprovechamiento del acuífero de Quito tiene como objetivos básicos los siguientes: contribuir al abastecimiento complementario de agua potable para el Distrito Metropolitano de Quito, con un caudal estimado superior a $800 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$; su aprovechamiento provocará descensos de los niveles freáticos, eliminando las afectaciones a los subsuelos de grandes edificaciones; y, se constituirá en una alternativa estratégica permanente de abasto de agua en caso de desastres naturales o cuando los otros sistemas dejen de operar por cualquier causa.

Los objetivos específicos del estudio son: caracterizar hidrogeológicamente el acuífero, realizar una evaluación de las posibles reservas de explotación del agua subterránea de la subcuenca Centro-Norte y dar recomendaciones para una explotación racional y sostenible de esas reservas. La definición del modelo conceptual del acuífero es un objetivo prioritario del estudio.

1.3. Ubicación del proyecto

La zona de estudio se encuentra en la ciudad de Quito, capital de la República del Ecuador. La ciudad está localizada en la parte central de la Cordillera de los Andes y se caracteriza principalmente por estar rodeada por cinco volcanes. El territorio de estudio abarca un área total de unos 124 km^2 y coincide con áreas ocupadas por la ciudad, la cual se extiende en una longitud aproximada de 17 km.

El área de estudio del acuífero Centro-Norte de Quito se encuentra ubicada entre las coordenadas TM Quito 9975070 al sur y 9989010 al norte y de longitud entre 495000 al oeste y 506000 al este, área comprendida entre la quebrada de Pusuquí al norte, el Panecillo al sur, las laderas orientales del macizo montañoso Pichincha que pertenece a la Cordillera Occidental de los Andes Ecuatorianos al oeste y los levantamientos de Lumbisí- Batán – La Bota, al este.

2. Metodología utilizada

Se analizó la información geológica e hidrogeológica de la cubeta de Quito, proceso que sirvió para seleccionar los estudios del acuífero centro y norte de la ciudad. La información requerida para complementar el estudio se obtuvo de las campañas de perforaciones con recuperación de testigos, sondeos eléctricos verticales, muestreo y análisis químico del agua, monitoreo de niveles piezométricos, interpretación hidrogeoquímica e isotopía.

Con toda esta información se creó una base de datos y se elaboró el modelo conceptual del acuífero. Las principales herramientas que se utilizaron en la modelación del acuífero son: softwares avanzados tales como: MODFLOW, AQUACHEM, SURFER con resultados probados y avalados por expertos internacionales. En el análisis de la vulnerabilidad, los métodos utilizados fueron: GODS, DRASTIC, AVI y SINTACS de estos se seleccionó al GODS, como el más adecuado por la información disponible en el Acuífero de Quito.

3. Hidrometeorología

El objetivo del estudio hidrometeorológico es poder contar con parámetros como precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración, que permitan explicar y evaluar con una buena precisión el balance hídrico dentro de la zona de recarga y de almacenamiento del sistema acuífero de Quito. La información hidrometeorológica disponible proviene básicamente de la red instalada por el INAMHI, y complementada con información puntual de algunas estaciones que pertenecen a la EMAAPQ.

3.1. Climatología

El clima está fuertemente condicionado por la presencia de las cadenas montañosas que rodean a la zona de estudio y en forma general pertenece al tipo ecuatorial mesotérmico semi húmedo a húmedo para la zona baja; en su parte alta correspondería a un ecuatorial frío de alta montaña.

No obstante, factores físicos como el relieve, morfología, pendientes, latitud, exposición a las masas húmedas, dirección del viento, hacen que la zona de estudio presente una variedad de microclimas con una distribución espacial muy cambiante, condiciones que se evidencian en la variabilidad de la temperatura y lluvia.

3.2. Meteorología

Al igual que las precipitaciones, las temperaturas son muy variables en función de la altitud, encontrándose a nivel medio entre valores que pueden variar de 4°C a 15°C, valores medios que en las Laderas del Pichincha pueden oscilar alrededor de los 8°C. Con relación a temperaturas máximas y mínimas el rango de variación es muy grande, sobre todo para las zonas altas, pudiendo llegar a un valor máximo de 20°C.

Para la parte sur de la cuenca en estudio, considerando como representativa a la estación Izobamba los valores de humedad relativa se registran entre 73% y 84%, con una media del 80%; al norte en la estación Aeropuerto la humedad relativa se encuentra entre 64% y 78% con una media del 73%.

La actividad convectiva y la interacción de las masas de aire húmedo con el relieve determinan que la precipitación pluvial en la zona de estudio presente una gran variabilidad temporal y espacial, pues varía desde 600 mm anuales al noroccidente de Quito hasta valores que superan los 1400 mm en las partes altas del Volcán Pichincha. Temporalmente la precipitación presenta una distribución bimodal, con un máximo entre los meses de marzo y abril y otro en los meses de octubre a noviembre, mientras que la temporada seca se presenta entre junio a agosto.

En la Tabla 2 se presentan los datos obtenidos para las estaciones indicadas en la Tabla 1.

A pesar de que las restantes estaciones no disponen de períodos suficientemente largos ni simultáneos, estas permitieron validar los resultados, contrastando los resultados obtenidos con los registrados en estas estaciones. En función de la disponibilidad de la información, para el presente caso se utilizó procedimientos indirectos para la estimación de la evapotranspiración, recomendándose utilizar la fórmula de Thornthwaite, que fue desarrollada con base en numerosas determinaciones de la ETP para regiones húmedas del este de los Estados Unidos.

Para el análisis de la evapotranspiración potencial se consideró que la cuenca de recarga se encuentra entre las cotas 3000 a 3500msnm, resultados que fueron contrastados con las precipitaciones medias de la zona, estimándose que la evapotranspiración real (ETR) es del orden de los 631.3 mm·año⁻¹ en la zona de infiltración directa (condiciones medias), que significan el 48% de la precipitación de la zona de recarga.

TABLA 1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS EN EL ESTUDIO

Nombre	Codigo	X	Y	Latitud	Longitud	Altura
Cotocollao	M342	500700	9999300	0° 05' 50" S	78° 29' 41" W	2720
Quito- U. Central	M606	4999897	99886807	0° 13' 00" S	78° 30' 00" W	2870
Quito - Observatorio	M054	500000	99765951	0° 12' 40" S	78° 30'00" W	2820
Quito Aeropuerto	M055	501361	99844418	0° 8' 24" S	78° 29'06" W	2794
Izobamba	M003	494077	99889127	0° 21' 45" S	78° 33'11" W	3058
Quito INAMHI	M024	502000	9981500	0° 10' 0" S	78° 29' 0" W	2789

TABLA 2. RESUMEN DEL BALANCE HÍDRICO

Recarga

Recarga zona urbana (Uso de Suelo)

Area urbana	6 9400 000	m ²	
Area Neta (7.5%) de infiltración:	5 205 000	m ²	
Infiltración neta (%):	20		
Precipitación media anual urbana:	980	mm·año ⁻¹	
Recarga (1.1)	1 020 180	m ³ ·año ⁻¹ =	15 m ³ ·año ⁻¹ = 32 l/s

Recarga por infiltración de pérdidas en alcantarillado y agua potable

Agua potable Planta Bellavista:	1.59	m ³ ·s ⁻¹	
% Pérdida por distribución:	9		
Infiltración Agua Potable:	0.14	m ³ ·s ⁻¹	
Infiltración Alcantarillado (10% de Agua Potable):	0.01	m ³ ·s ⁻¹	
Total infiltrarse (60% de la pérdida)	0.095	m ³ ·s ⁻¹	
Recarga (1.2)	2,980,322	m ³ ·año ⁻¹ =	43 m ³ ·año ⁻¹ = 95 l/s

Recarga Lateral y Directa (Ladera oriental del Pichincha)

Infiltración neta zona lateral (%):	15		
Precipitación media anual zona lateral:	1320	mm·año ⁻¹	
Area recarga lateral:	24.70	km ²	
Infiltración neta zona directa (%):	25%		
Precipitación media anual zona directa:	1275	mm·año ⁻¹	
Area recarga directa:	29.80	km ²	
Recarga (1.3)	14 389 350	m ³ ·año ⁻¹ =	264 = 456 l/s
Recarga natural (1.1) + (1.3)	15 409 530	m ³ ·año ⁻¹ =	489 l/s
Recarga Total (1.1) + (1.2) + (1.3)	18 389 852	m ³ ·año ⁻¹ =	583 l/s

Caudales de extracción (Pozos mas más vertientes)

Total caudal extraído	472	l·seg ⁻¹	
Caudal de acumulación (2 cm/mes)	89	l·seg ⁻¹ . (Estimado)	
TOTAL	561	l·seg ⁻¹	

Balance hídrico acuífero

Volumen recarga (ingreso):	18 389 852	m ³ ·año ⁻¹	
	0.583	m ³ ·s ⁻¹	
Volumen salida:	17 699 545	m ³ ·año ⁻¹	
	0.561	m ³ ·s ⁻¹	
Diferencia ingreso - salida	0.022	m ³ ·s ⁻¹ (3.8 % de diferencia)	

La determinación del porcentaje de la precipitación que pasaría a conformar el escurrimiento superficial, se basó en mediciones de lluvias y crecidas simultáneas que la EMAAP-Q ha realizado en la Quebrada Rumihurco; para este efecto se separó el escurrimiento directo y subterráneo de hidrogramas de crecida disponible en la quebrada anteriormente indicada.

Para las condiciones existente en la Quebrada Rumihurco, el escurrimiento superficial directo alcanzaría el 26.9% de la precipitación total, valor que se le considera representativo para la zona de estudio y que a nivel medio alcanzaría un valor de 355.0 mm por año.

De los estudios realizados por la EMAAP-Q sobre agua no contabilizada, se ha estimado que las pérdidas totales ascienden a un valor entre el 25% y 30% del caudal suministrado en las plantas de tratamiento (informe interno, Departamento de Agua no Contabilizada).

3.3. Balance hídrico

Con la finalidad de estimar los valores de aportes (Tabla 2) y de pérdidas de agua en la cuenca de estudio, se realizó el cálculo del balance hídrico, análisis que permite contar con los datos de la recarga, información indispensable para la evaluación de reservas acuíferas.

La expresión general del balance hídrico es la siguiente:

$$P = R + ETR + I$$

donde:

<i>P</i>	altura de precipitación en mm
<i>R</i>	escurrimiento superficial expresada en mm
<i>ETR</i>	evapotranspiración real en mm
<i>I</i>	infiltración en mm

Con relación a la precipitación anual, porcentualmente el escurrimiento (R) se ha estimado en 27%, la evapotranspiración real (ETR) en un 48%, de lo que se deduce que el 25% de la precipitación correspondería a la infiltración, valor que se utilizó en las Laderas del Pichincha entre las cotas 3000 a 3500 msnm; para la zona ubicada sobre la 3500 msnm se asumió un valor de infiltración media del 15%; en cambio, para la zona urbana se estimó un valor de infiltración del 20% de la precipitación media.

4. Características geológicas e hidrogeológicas

Las formaciones Machángara, Cangahua y depósitos La Carolina involucran tanto el basamento hidrogeológico como el relleno de la zona que comprende el Acuífero de Quito. Las rocas que corresponden al basamento son un conjunto de lavas andesíticas con fracturas subhorizontales intercaladas con flujos piroclásticos. El relleno de la cuenca, se ha desarrollado con productos volcano sedimentarios, depositados en diferentes ambientes.

De acuerdo a los parámetros obtenidos en las perforaciones de investigación, pruebas de bombeo y al análisis de permeabilidad y conductividad teóricas de las rocas se ha podido caracterizar al acuífero Centro Norte de Quito, como un acuífero único multicapa en el que constan dos niveles con buenas características hidrogeológicas.

El acuífero se ha desarrollado en depósitos que por las características morfológicas y geológicas de la cubeta de Quito, adoptan formas de acuerdo al ambiente de depositación y a la posición estratigráfica, es así que se han identificado tres tipos de depósitos en los que se han desarrollado los niveles acuíferos, el primer depósito, el más superficial asociado directamente a los conos de deyección que toman formas cónicas, éstos íntimamente relacionados con los inferiores que se presentan en el segundo tipo de depósitos, en forma de lentes de arena y grava dentro de una matriz limo arcillosa; cabe destacar que este segundo tipo se encuentra dentro de la Fm. Cangahua; y, el tercer depósito en forma de una capa pseudo horizontal, perteneciente a la Fm. Machángara.

4.1. Parámetros hidrogeológicos

4.1.1. Subcuenca Centro-Norte

La permeabilidad por estratos es muy variable. Las pruebas de permeabilidad efectuadas no aportan datos que caractericen los parámetros reales de los estratos acuíferos debido a que las mismas, tanto en los bombeos como en los vertimientos, provocaron abatimientos y ascensos de los niveles en magnitudes muy pequeñas en relación con las presiones de los estratos acuíferos reflejadas en columnas de agua, sobre todo de los estratos acuíferos más profundos (entre 22 y 122 m de columna-2.2-12.2 kg/cm²).

Los valores de permeabilidad reflejados por el coeficiente de filtración calculado con base en los datos de las pruebas efectuadas, predominan en magnitudes inferiores a $0.1\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$, lo que no corresponde totalmente con la litología existente. Para comprobar estos resultados se recalcularon los valores de permeabilidad por el coeficiente de filtración aplicando la metodología establecida por Erquin para ascenso de niveles al culminar los bombeos o cubeteos. Los datos obtenidos confirman los valores reflejados por el coeficiente de filtración. Estos resultados obedecen a que los diámetros de las perforaciones de investigación son pequeños, por lo que no se pudo realizar las pruebas de abatimiento de los niveles.

Para resolver esta incoherencia se tomaron datos asumidos para la litología existente y en correspondencia con valores expuestos en literatura en donde se puede observar los valores medios teóricos de permeabilidad y transmisibilidad. Estos valores fueron asumidos para los cálculos del presente estudio.

La profundidad media del nivel piezométrico compensado de las aguas en la actualidad oscila entre 5 y 17 m. Llegando a 43 m en la zona del aeropuerto, debido a que los pozos en su construcción no consideraron el aislamiento de estratos en el proceso de perforación, por lo que la presión de los horizontes artesianos fue difundida en los estratos con menor presión o freáticos, con lo que en esas perforaciones no fueron detectadas las presiones de los acuíferos artesianos.

La dirección del flujo sub-superficial (horizonte acuífero de sedimentos lacustres y de la formación Cangahua), presenta en el centro del subcuenca dos direcciones que se derivan a partir de la divisoria de agua de la subcuenca de la quebrada El Batán y la cuenca del río Machángara, con dirección del flujo hacia el Noreste y Sureste respectivamente con una dirección final Este.

En el horizonte más profundo formado por sedimentos de la formación Machángara, predomina un flujo con dirección hacia el Norte Noreste debido a que el basamento se encuentra a profundidades inferiores a la base de drenaje de la Quebrada El Batán y del río Machángara; a su vez este basamento tiene pendiente y se profundiza hacia el Norte, hasta cotas mucho más bajas de su posición y del relieve del terreno.

La dirección del flujo subterráneo en la parte norte de esta subcuenca presenta un régimen confluyente desde el Sur y predominantemente desde el Oeste en dirección al centro del subcuenca desde donde predomina un flujo en dirección al Norte-Noreste, concordante con la cuenca del río Monjas, con descarga en esta dirección, todo lo cual ha sido ratificado con el mapa de hidroisopiezas, campaña Julio 2004.

Por sus características de acuosidad, los dos horizontes se relacionan con acuíferos poco permeables a medianamente permeables, variando horizontal y verticalmente.

4.1.2. Subcuencas en los conos de deyección

La litología existente en el tramo conocido es de arena con gravas y bloques con una matriz algo limosa, de tal forma, los valores de transmisividad y del coeficiente de filtración obtenidos no coinciden con la litología existente.

Las aguas subterráneas en el cono de deyección hasta una profundidad de 50 metros en los distintos estratos acuíferos son freáticas (sin presión) y con presiones pequeñas. Entre 50 y 150 m de profundidad, presentan presiones considerables de hasta $18\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ (aguas artesianas). En los estratos y lentes yacientes a profundidades superiores a los 150 m presentan surgencias con magnitudes hasta 10 metros por encima de la superficie del terreno. Las mayores presiones se detectan en los estratos que yacen bajo capas y lentes de litología limosa que sirven de sello a estratos de mayor permeabilidad que los subyacen.

A pesar de la estratificación y variedad litológica presente en el corte se debe considerar que todo el paquete de sedimentos forma un “acuífero multicapa” compuesto por la secuencia de estratos que

tanto en la parte superior del corte (aguas freáticas), como a mayores profundidades (aguas artesianas), las distintas capas están interrelacionados hidráulicamente ya sea en algunos puntos donde ellos se acuñan o por filtración (goteo) de un acuífero a otro de forma directa o a través de estratos intermedios menos permeables.

La permeabilidad en corte es muy variable entre estratos; predominan permeabilidades bajas a medias con un valor promedio de $2 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ (asumidos en función de la litología existente).

Durante este trabajo las permeabilidades no han sido confirmadas debido a que las pruebas ejecutadas no han podido desarrollar los abatimientos del nivel del agua (niveles piezométricos) necesarios para caracterizar los parámetros hidrogeológicos de los distintos estratos acuíferos artesianos.

El espesor del horizonte acuífero perforado en este subcuenca es superior a los 200m; lo confirman los datos de sondeos eléctricos verticales SEV4 y SEV8 que detectan estratos acuíferos potenciales con espesores muy superiores a los 200 m.

La alimentación del acuífero en este subcuenca proviene de las laderas del Pichincha, entre las cotas 3000 y 3500 m.s.n.m. (según la interpretación de los datos isotópicos) además del área que corresponde a las cotas superiores aunque con una infiltración menor y que tienen como vía de drenaje la infiltración por área de afloramiento de rocas permeables que alimentan a los acuíferos de la Cubeta de Quito. Como parte de la alimentación del acuífero podemos considerar también el flujo subterráneo proveniente del Subcuenca Centro Norte hasta profundidades superiores a los 150 m. presentes en rocas de las formaciones Cangahua y Machángara, alimentados igualmente por el drenaje de las laderas del Pichincha.

5. Características hidrogeoquímicas y calidad de las aguas

5.1. *Quimismo de las aguas subterráneas*

5.1.1. Subcuenca Quito Central

El quimismo de las aguas subterráneas es estable en tiempo y espacio, con mineralización por sólidos totales disueltos menor de $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ correspondientes a aguas bicarbonatada, grupo Magnésica. Por su pH, la acidez de las aguas varía de débilmente ácidas a débilmente básicas (pH de 5.5 a 8). El agua en general es potable, aunque esporádicamente se nota la presencia de nitrito. En algunos sitios las aguas también tienen contenido de metales pesados, por lo que en estos casos deben ser correlacionados con las normas existentes en el país para definir su posible uso como agua potable. Desde el punto de vista bacteriológico las aguas están dentro de las normas, aunque existen puntos con contenido de bacterias.

5.1.2. Subcuenca Quito Norte.

El quimismo de las aguas subterráneas en esta subcuenca es relativamente estable, con mineralización y contenido de algunos elementos en rangos similares a los encontrados en las aguas de lluvias, esto puede deberse a que las rocas por las que transitan las aguas de lluvias en la zona de alimentación, tránsito, acumulación y descargas del acuífero son de edades geológicas antiguas con matriz de rocas antiguas, en formaciones geológicas mas jóvenes, lo que conjugado con las características del relieve, del nivel del agua y estratos acuíferos (altas pendientes) y de permeabilidad, han permitido el lavado de las rocas en tiempo y espacio; además en la actualidad los elementos solubles en la matriz rocosa de los acuíferos son bastante estables por lo que la mineralización de las aguas por sales solubles disueltas es predominantemente menor de $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, bicarbonatada, grupo magnésicas. En el Pozo E3, las aguas a profundidades próximas a los 200 metros son bicarbonatadas cálcicas, correspondiendo a aguas subterráneas de poca mineralización retenidas en los acuíferos durante periodos de tiempo relativamente cortos.

Se debe señalar que los resultados de análisis químicos demuestran que el bicarbonato se encuentra en contenidos que predominan en valores superiores al 80 % entre los aniones y el contenido del calcio y magnesio oscila entre el 20% y 50% entre los cationes y en menor proporción el sodio de 20-30 %. Por su pH, la acidez de las aguas varía de débilmente ácidas a neutras (pH de 5,5 a 8).

Por el contenido de macro componentes, mineralización y dureza total, el agua es potable, sin embargo existen algunos puntos con contenidos de nitrito.

Las aguas de esta subcuenca contienen en algunos puntos elementos como hierro y manganeso cuyos contenidos deben ser analizados en correspondencia con las normas existentes para agua potable. Bacteriológicamente las aguas son satisfactorias, aunque existen pocos puntos con contenidos bacterianos en proporciones considerables, por lo que en estos casos las aguas deben ser cloradas para su uso potable.

5.2. Características isotópicas

El presente análisis se basa en información recolectada sobre datos isotópicos para el acuífero Centro – Norte de la ciudad Quito. Partiendo de la información ambiental y de un análisis crítico de los datos existentes se actualizó la interpretación isotópica, para validar de esa manera las hipótesis que sirvieron de base en la definición del modelo conceptual del acuífero.

La información recopilada hasta el momento es importante, ya que se disponen datos del año 1984, posteriormente en el período comprendido entre 1997 y 1999 se efectuaron nuevas toma de datos, información que obligó a dividir el estudio en dos fases. La primera fase consistió en interpretar los datos de la campaña de 1984, en la que se ejecutaron 17 análisis de isótopos estables. Adicionalmente, se realizaron 16 pruebas de tritio y se concluyó con 6 ensayos de carbono-14 y carbono-13, los que se ubicaron 2 en la parte Norte y 4 en la parte central. La segunda etapa interpretó los resultados obtenidos de la campaña de 1997 a 1999, que consistió en el estudio de 21 muestras de isótopos estables, 14 de tritio y 6 de carbono-14.

5.2.1. Metodología y criterios de análisis

De las primeras interpretaciones isotópicas, tanto para la zona de abastecimiento del acuífero, como en las direcciones de flujo, el modelo conceptual asumido para el acuífero Centro-Norte de Quito y presentado en el numeral 6 de este informe parece adecuado, requiriéndose precisar las áreas de recarga y el tiempo de residencia media del agua, con base en el presente análisis.

En el estudio del acuífero Centro-Norte de Quito, el factor más importante para explicar variaciones de composición isotópica de la lluvia parece ser la altura. Por eso se ha definido una relación entre composición isotópica de la lluvia y altura, relación que servirá para evaluar la altura media de la recarga del acuífero.

5.2.2. Análisis de la información y resultados

En lo que se refiere a la campaña de 1984, no existen mediciones de composición isotópica de lluvia, por lo que se utilizó una correlación mensual de la lluvia en la estación pluviométrica de Izobamba (estación GNIP del OIEA – 3058 m de altura) ubicada a 13 km al sur-oeste de Quito. Complementariamente se empleó los valores isotópicos de manantiales tomados entre 2400 y 3400 m.s.n.m dentro del acuífero y en la vertiente del volcán Pichincha. Cabe indicar que existe la posibilidad de presentarse errores en la relación isótopos vs altura, ya que la estación Izobamba no es representativa a las condiciones imperantes en la ladera occidental del volcán Pichincha; adicionalmente no se conoce sobre la variación mensual de la composición isotópica de los manantiales.

Es importante indicar que la composición isotópica del agua en el acuífero representa la composición isotópica media de la recarga en algunos años, por lo que para comparar el agua del acuífero con la lluvia se necesita al menos un ciclo anual completo de mediciones isotópicas, debido a las variaciones importantes que puede presentarse durante el año (más del 10%).

En lo que se refiere a la campaña de 1997 - 1999, los seis pluviómetros instalados para mediciones isotópicas, no permiten realizar una relación confiable entre isótopos y altura, ya que no se logró precisar la cantidad de lluvia y así no se pudo calcular la composición media ponderada de las lluvias.

Afortunadamente desde abril 2001, la estación Iñaquito forma parte de la red del GNIP del OIEA, donde existen datos mensuales entre abril 2001 y enero 2004, lo que permite tener referencia isotópica a largo tiempo a nivel de la ciudad de Quito. Para completar este modelo, desde octubre del 2004 fueron instalados seis pluviómetros entre 2800 y 4300 m de altitud, para recolección mensual del agua en un período comprendido entre uno a dos años, para disponer de una medición media ponderada con respecto a la altura.

Isótopos estables oxígeno-18 y deuterio.

De la información disponible para isótopos estables de lluvia en la zona del proyecto, los puntos de muestreo (43 mediciones mensuales) de la estación Iñaquito, se ubican cerca de la Recta Meteorológica Mundial y tienen una variabilidad mensual muy importante, entre -4.51‰ y -20.27‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y deuterio entre -23.4‰ y -150.4‰ para el $\delta^2\text{H}$.

La composición isotópica ponderada de la lluvia sobre la totalidad del período de medición en la ciudad de Quito (estación Iñaquito) es de -12.22‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y -87.5‰ en $\delta^2\text{H}$. El año 2002 muestra un valor ponderado anual muy empobrecido que puede reflejar condiciones particulares. Si eliminamos los datos del 2002, la composición isotópica ponderada de la lluvia sobre el período es de -11.45‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y -80.5‰ en $\delta^2\text{H}$, observándose poca variación. Podemos considerar este valor como referencia a la composición isotópica de la recarga teórica a largo tiempo en la altura de Quito.

En lo que refiere a los isótopos estables del agua del acuífero, en las campañas de 1984 o de 1997 a 1999 sus valores se encuentran entre -10.66‰ y -12.68‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y -77.5‰ y -91.4‰ en $\delta^2\text{H}$, con una media de -11.58‰ en $\delta^{18}\text{O}$ y -84.1‰ en $\delta^2\text{H}$ (36 puntos). Estos puntos se ubican sobre la Recta Meteorológica Local. Los de la parte Norte y Central del acuífero no se pueden diferenciar ya que presentan una alta homogeneidad. Veintiséis de 38 puntos están situados entre -11‰ y -12‰ en $\delta^{18}\text{O}$.

Esta homogeneidad de valores muestra, por una parte, un origen común del agua y de su circulación y por otra parte permite definir una zona de recarga sobre la vertiente del volcán Pichincha poca elevada. Si se toma un gradiente aproximativo del -0.25‰/100 m para $\delta^{18}\text{O}$ y el valor medio en la estación de Quito, la altura media teórica puntual de recarga debería ser del orden de 3300 m. Esta altura corresponde a una zona de disminución de pendiente del volcán Pichincha, que podría favorecer la infiltración del agua de los ríos y de la lluvia. Evidentemente este resultado debe ser corregido ya que la recarga no es puntual y la zona de recarga directa podría ubicarse entre los 3000 y 3500 m. Valores superiores a -11‰ podrían sugerir la posibilidad de recarga puntual en la zona del acuífero.

La existencia de una contaminación a partir de la red de agua potable y alcantarillado de la ciudad de Quito fue analizada. El suministro de agua potable proviene directamente de zonas de alturas de approx. 4000 m. La composición isotópica de esta agua debería ser isotópicamente más empobrecida, entre -14‰ y -15‰ en $\delta^{18}\text{O}$ considerando un gradiente teórico de 0.25‰/100 m y considerando que no hay almacenaje al aire libre en Quito que permitiría que se reequilibre la composición isotópica a la altura de la ciudad. Para confirmar esta hipótesis, se debe realizar un análisis isotópico en la Planta de Tratamiento de Bellavista y en uno o dos puntos de mediciones en la red de agua potable de la ciudad. Para verificar la posibilidad de pérdida, se podría hacer en una zona densa de la red una perforación del suelo de hasta 1.0 m bajo la red y hacer análisis isotópicos del agua del suelo.

Tritio

De la campaña de 1984 se logró estimar que el valor anual de tritio en la atmósfera para la estación de Izobamba se encuentra próxima a 10 UT. En realidad, el contenido promedio anual en 1983 -1984 está entre 5 UT y 6 UT, confirmado con datos de Bogotá estación GNIP. Durante las campañas 1997-1999, los contenidos en tritio del acuífero estaban más bajos que en 1984, debido al decrecimiento del tritio en la atmósfera. Se encuentra entre 0.2 UT y 2.4 UT con valor promedio de 1.4 UT en la parte Central (seis muestras en los límites del error de medición) y entre 0 UT y 2.2 UT con valor promedio de 0.4 UT en la parte Norte (6 muestras en los límites del error de medición). En el año 1998 se hizo tres mediciones de tritio de lluvia, correspondiendo a los meses de marzo, abril y noviembre. La media de los valores obtenidos es de 2.3 UT. Infortunadamente no es un valor medio anual, pero es el único punto de referencia regional.

Aunque no hay muchos puntos de medición para el acuífero, parece que existe una relación entre el contenido en tritio y la dirección de flujo. Se puede observar, sobre todo en la campaña de 1984, que las aguas cuyos contenidos en tritio son elevadas están ubicadas en la parte oeste del acuífero o en las laderas del Pichincha, las aguas con valores más débiles están ubicadas al este. Existe una excepción, en la vertiente de la quebrada El Volcán, ubicada al este, que muestra una circulación rápida, presenta también una anomalía con valores enriquecidos por una altura de 2931 m con relación a los restantes puntos; se podría deber a un escurrimiento poco profundo.

Con relación a la edad de las aguas del acuífero se puede intentar una modelación partiendo de los métodos extremos (flujo tipo pistón y mezcla total). Para el efecto se necesita una reconstrucción aproximada de los niveles del tritio, en la atmósfera de Quito, lo que se elaboró a partir de los datos de la estación de Izobamba en Quito y de la información obtenida para Bogotá - Colombia, obteniéndose los siguientes resultados. Según el modelo Piston flow, en el que se tienen aguas con valores inferiores a 5 UT, se tiene un tiempo de residencia superior a 25 años y para las aguas entre 5 UT y 9 UT, se estima un tiempo de residencia inferior a 20 años. Para el modelo Mezcla total, con valores inferiores a 5 UT se tiene un tiempo de residencia superior a 50 años, y para aguas entre 5 UT y 9 UT, se considera un tiempo de residencia inferior a 20 años.

Los resultados de las campañas 1997-1999 muestran que, con en el modelo flujo tipo pistón, los valores inferiores a 2 UT corresponden a un tiempo de residencia superior a 40 años y los valores entre 2 UT y 2.5 UT a un tiempo de residencia inferior a 20 años. Para el modelo Mezcla Total, los valores inferiores a 2 UT corresponden a un tiempo de residencia superior a 50 años, los valores entre 2 UT y 2.5 UT a un tiempo de residencia inferior a 20 años.

Los diferentes modelos muestran dos tipos de circulación en el acuífero. El primero, representado por pocos puntos, es un tipo muy rápidos (tiempo de residencia inferior a 20 años) y el segundo con tiempo de residencia de 40 a 60 años. Sin embargo, es importante anotar que debido a la imprecisión de la función de entrada de la lluvia, sería interesante volver a analizar los puntos muestreados en el año 1984, especialmente en los puntos con altos contenidos de tritio y hacer eventualmente otras mediciones simultáneas de tritio y carbono-14.

Carbono-14 y carbono-13

Durante la campaña de 1984 para el proyecto se realizaron 6 muestras de carbono-14, 4 en la parte Norte y 2 en la parte Central. Los valores presentan una actividad de carbono-14 que está entre 81,4 pCM y 92 pCM con valor promedio de 90 pCM en la parte Central y 62.8 pCM a 92.5 pCM con un valor promedio de 80.3 pCM en la parte Norte.

Los valores de carbono-13 están entre -13.6% y -15.8% vs VPDB. El CO_2 en relación con el agua del acuífero al momento de la infiltración tenía un valor entre -23% y -26% , característica de un origen únicamente biogénico propio de las laderas del volcán Pichincha. Consecuentemente no se puede correlacionar los valores de ^{14}C , excepto si hay presencia de carbonato secundario de origen

biogénico. Los valores de tritio están en buena concordancia con el ^{14}C , de lo que puede significar que la circulación es compleja con una mezcla de agua joven con una de unos cientos de años.

Durante la campaña de 1997 a 1999, se tomaron seis muestras de carbono cuyos resultados son sospechosos, seguramente por problema de contaminación de las muestras.

Con relación al carbono-13 disponemos de 5 datos, 3 parecen tener concordancia con los valores de 1984 (entre -16.9% y -18.3%), los dos restantes son más enriquecidos. La confiabilidad de estos datos es dudosa lo que dificulta su interpretación. No obstante se concluye que eventualmente se podría tener mezclas puntuales con carbonato de origen mineral (costras calcáreas en la formación Cangahua), pero la incertidumbre persiste y es necesario aclarar estos valores con un nuevo muestreo.

Se puede indicar que la zona de recarga se ubica sobre la ladera, a poca altura respecto a la ciudad, entre las cotas 3000 a 3500 m.s.n.m., con un abastecimiento por infiltración directa de la lluvia o de los ríos de las vertientes del Pichincha; presenta una dirección de flujo que va de las laderas al lado este del acuífero al extremo oeste del mismo, con dos tipos de circulación en el acuífero, la primera muy rápida con tiempos de residencia inferior a 20 años y una segunda con tiempo de residencia más largo, entre 40 y 60 años.

Recomendaciones para mejorar la interpretación de la información isotópica

La información obtenida es bastante confiable, pero deberá ser afinada en lo relacionado a la recarga y a los tiempos de residencia del agua, ya que ciertas incertidumbres persisten, las mismas que deberán ser plenamente aclaradas.

Para análisis mensuales de la lluvia con respecto a la altura, es necesario mejorar la red de pluviómetros tanto en cantidad como en ubicación, se recomienda realizar mediciones y muestreos para un período de por lo menos 2 años, mes a mes entre los días 28 del último mes y 2 del mes siguiente.

Para el conocimiento de la variación isotópica, se aconseja tener un punto de medición a alturas más elevadas (entre 4500 m y 4700 m), en este punto se podría muestrear una vez al año (sistema de tanque de 1.5 m de altura con abertura de 1000 cm^2).

Con la finalidad de ratificar la recarga o la posible contaminación a la que está sujeto el acuífero por la presencia de la red de agua potable y alcantarillado, se requiere verificar la composición isotópica de esta agua en 2 ó 3 puntos de la red, se recomienda hacer una perforación hasta 1 metro bajo la red, para recuperar muestras de suelo para análisis de la composición isotópica de su agua.

Con relación al tritio se recomienda rehacer los 3 puntos (Quebrada Volcán, Hacienda Atucucho, Urban, El Pinar) de la campaña de 1984, donde se presentaron un fuerte contenido de tritio. Adicionalmente para afinar el modelo de edad, sería interesante disponer de una estadística de tritio de uno o dos años en la estación GNP de Quito-Iñaquito, para calibrar la variación del contenido actual del tritio en la lluvia. Una muestra anual tomada en el pluviómetro ubicado entre los 4500 y 4700 m podría ser suficiente.

Para el carbono 14 y carbono 13, se debe complementar las mediciones para disponer de información más confiable. Se recomienda rehacer los puntos de la campaña de 1997-1999 para comprobar la calidad de esos datos. Debido a la poca información existente en la parte central del acuífero, se recomienda muestrear en 2 a 4 puntos adicionales.

Es recomendable ejecutar un análisis en la vertiente La quebrada El Volcán, para eliminar o confirmar la anomalía presentada en el contenido de tritio del muestreo de 1984. Para confirmar ausencia de contaminación se podría muestrear aguas profundas aprovechando el pozo artesiano al norte de Quito. Realizar 3 análisis en la zona de descarga, al este del acuífero para verificar si tiene concordancia entre la edad y la dirección de flujo, aprovechar la galería de Guápulo cuando la obra esté terminada. En los

nuevos puntos de ser posible se recomienda realizar un análisis químico, un análisis de isótopos estables y de tritio. De ser posible realizar un muestreo de carbono 14 y carbono 13 en muestras en sitios con presencia de costras calcáreas de la Formación Cangahua, para verificar una nueva eventual contribución de los bicarbonatos del acuífero.

Es conveniente estudiar las vertientes de las Laderas del Pichincha, que puedan abastecer al acuífero, en especial en lo relacionado con la definición de caudales, químicas básicas y conductividad, lo que permitirá controlar las contribuciones según la temporada.

6. Modelo conceptual

Durante la realización del proyecto anterior, Estudio Hidrogeológico Isotópico del Acuífero de Quito (IAEA-RLA/8/023 ARCAL XXI) se planteó un modelo hidrogeológico conceptual que definió tres subcuencas denominados Norte, Centro y Sur con tres niveles acuíferos. Además se estableció que la dirección de flujo en el subcuenca Centro tenía una dirección Oeste-Este y en el Subcuenca Norte un flujo orientado Sur-Norte.

A la luz de las nuevas investigaciones realizadas durante el año 2004 se ha establecido como un solo subcuenca los acuíferos Centro-Norte, multicapa con dos niveles interconectados, uno en la Formación Cangahua y otro en la Formación Machángara, con una dirección de flujo preferencial Sur-Norte y, dirección superficial Oeste – Este en la parte Central del Acuífero que drena por la Quebrada El Batán.

En la figura se muestra la representación gráfica sinóptica del Modelo Conceptual establecido para el Acuífero Centro Norte de Quito en el cual se indican: distribución de las formaciones geológicas, zonas preferenciales de recarga y direcciones de flujo.

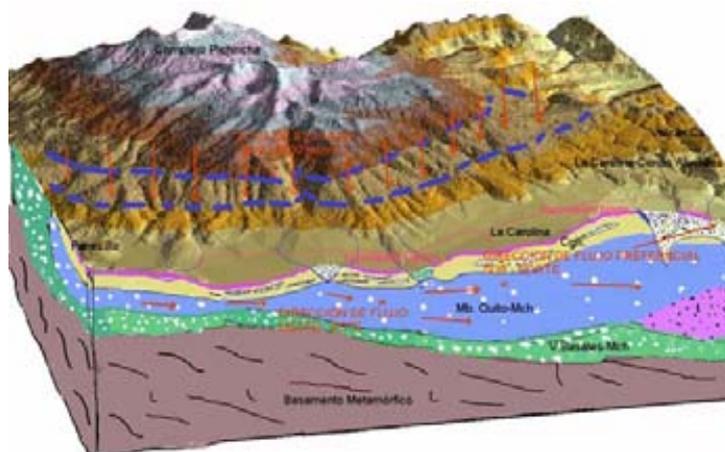


FIGURA. Modelo conceptual del acuífero Centro-Norte de Quito.

7. Conclusiones

El estudio del acuífero de Quito realizado durante el año 2004 ha permitido establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones

- Actualmente se dispone de parámetros geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos confiables, que permiten definir un modelo conceptual del Acuífero, en el que se pueden establecer los espesores de la zona saturada y el basamento, entre otros aspectos. El modelo actual difiere de los modelos que hasta el año 2000 se venían manejando.

- Comparando la recarga estimada con el caudal valorado para la salida, se observa que existe una diferencia que estaría del orden de error (3.9%), por lo que se considera que una buena aproximación para el caudal de la recarga sería el asumir $580 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, valor que considera la recarga natural en las laderas del Pichincha, la zona misma de acumulación y la infiltración por pérdidas en el sistema de distribución de agua potable y alcantarillado.
- Las formaciones que involucran tanto el basamento hidrogeológico como el relleno de la zona que comprende el acuífero de Quito son: Machángara, Cangahua y Depósitos La Carolina. El basamento se halla compuesto por rocas andesíticas, producto del desarrollo eruptivo del volcán Ruco Pichincha. El relleno de la cuenca se ha desarrollado con productos volcano sedimentarios, depositados en diferentes ambientes: eólicos, fluviales, aluviales, lacustres, palustres y depósitos netamente volcánicos.
- Se ha podido caracterizar al acuífero Centro Norte de Quito, como un acuífero único multicapa en el que constan dos niveles con buenas características hidrogeológicas, los mismos que están relacionados entre sí, ya que casi todos los sedimentos presentes son permeables.
- La dirección del flujo sub-superficial, presenta en el centro del subcuenca dos direcciones que se derivan a partir de la divisoria de agua de la subcuenca de la quebrada El Batán y la cuenca del río Machángara, con dirección del flujo hacia el Noreste y Sureste respectivamente con una dirección final Este.
- En el horizonte más profundo formado por sedimentos de la formación Machángara, predomina un flujo con dirección hacia el Norte-Noreste mientras que en la parte norte de este subcuenca presenta un régimen confluyente desde el Sur y predominantemente desde el Oeste en dirección al centro del subcuenca desde donde predomina un flujo en dirección al Norte-Noreste, concordante con la cuenca del río Monjas.
- En algunos subcuencas de conos aluviales ubicados al pie de las laderas del Pichincha (El Condado en particular), hasta una profundidad de 50m. Los distintos estratos acuíferos son freáticos. Entre 50 y 150m de profundidad, presentan presiones considerables de hasta $18 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ (aguas artesianas). Los estratos y lentes yacientes a profundidades superiores a los 150m presentan surgencias con magnitudes hasta 10 metros por encima de la superficie del terreno.
- La química del agua es bastante estable en tiempo y espacio. Predominan las aguas muy dulces con mineralización menor de $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. Las aguas principalmente son bicarbonatadas-magnésicas, potables por su composición de macro componentes, aunque existen puntos donde están presentes iones de nitrito. Existen pocos puntos con alto contenido bacteriológico y con alto contenido en nitratos.
- La homogeneidad de la composición isotópica, muestra por una parte un origen común del agua con relación a la lluvia actual y a su circulación. Por otra parte se puede interpretar que la zona de recarga se ubica sobre las laderas del volcán Pichincha a poca altura respecto a la ciudad, estimándose que la zona de recarga principal se ubica entre las cotas 3000 y 3500 m, con un abastecimiento directo de la lluvia por infiltración o por infiltración de una parte del agua proveniente de los ríos de las vertientes del Pichincha.
- Del contenido de tritio se concluye que la dirección de flujo va de las laderas del Pichincha al lado oeste del acuífero, al extremo este del mismo. Adicionalmente se puede indicar que existen dos tipos de circulación en el acuífero, una rápida (tiempo de residencia inferior a 20 años) y una más lenta (tiempo de residencia de 40 a 60 años).
- El modelo numérico generado para la simulación del movimiento de aguas subterráneas en el Acuífero de Quito permitió confirmar la dinámica de flujo, los volúmenes de carga y descarga, y las velocidades de circulación de las aguas. Del balance hídrico realizado se estableció que el volumen de carga y descarga alcanza los 50000 m^3 al día. La velocidad de flujo está en un rango que varía de 0.2 a $2 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$, lo que determina que el agua tiene un tiempo de circulación del orden de los 25 años, período semejante al establecido en el estudio isotópico realizado en este proyecto

- En esta etapa se pudo llegar a modelar la dinámica de flujo en régimen permanente, llegando a un error del 10.6%, porcentaje que se encuentra dentro del margen de precisión de los resultados, por lo que se considera satisfactorio
- La amenaza a la contaminación del Acuífero de Quito se localiza en términos generales en las zonas que drenan hacia las descargas y quebradas, con una propagación del contaminante para el primer nivel acuífero que va desde el eje de la cuenca urbana hacia los cuerpos de descarga, en torno a las líneas de flujo, teniendo como descarga la quebradas El Batán, El Colegio y Río Monjas.
- Para niveles acuíferos inferiores, si bien la amenaza no es mayor, por funcionar como un elemento de almacenamiento, con un tiempo de viaje relativamente extenso, conlleva a concluir que de producirse un gran transporte de contaminante, la afectación sería grave e irreparable, debiéndose suspender el bombeo de aquellos pozos privados o públicos afectados, de lo que se deduce que la prevención constituye la única alternativa factible para evitar los daños al acuífero.

En los distintos capítulos de este informe se ha sugerido varias recomendaciones, sin embargo resaltamos las más importantes.

— Subcuenca Centro-Norte

El recurso disponible en este subcuenca alcanza los $765 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ que podría explotarse en unos 25 años. Sin embargo es necesario procurar el descenso del nivel freático en menor tiempo, motivo por el cual se recomienda la siguiente propuesta de explotación.

— Subcuenca Sur

Aún no se ha intensificado su estudio pero de las evaluaciones realizadas se tendría una reserva de $407 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, de las cuales la EMAAP-Q explota actualmente $63 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ y otras entidades alrededor de $150 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$.

Un caudal de $870 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ puede explotarse por alrededor de 16 años hasta que el nivel freático descienda 20 m. Posteriormente, solo se podrá explotar el recurso establecido en el balance hídrico ($580 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$)

Estudio del Acuífero Aluvial del Valle de Esteli, Nicaragua

D. Corrales Perez^a, V. Delgado Quezada^b

^aEstudiante Maestría en Ciencias del Agua. Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua, Managua

^bCentro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua., Managua

Resumen El Valle de Estelí, localizado en la parte norte central del país, tiene una población de 115,033 habitantes; en donde el acuífero aluvial provee el principal suministro para agua potable (80% de la población depende de ella) e irrigación. El acuífero del Valle de Estelí tiene una extensión de 71.62 Km², y se encuentra en condiciones freáticas o localmente semi-confinadas o artesianas. La hidroquímica básica, indica que las aguas se consideran aptas para consumo humano y para riego. Se determinó que no existe variación estacional en la composición hidroquímica e isotópica del agua; lo que indica que el acuífero no está siendo recargado por el río o por la infiltración directa del agua de lluvia. Los resultados de ¹⁸O, ²H y ³H indican que el acuífero aluvial es recargado en la parte de las serranías que circundan al Valle de Estelí. Los resultados bacteriológicos y agroquímicos indican que algunas fuentes de agua en el Valle presentan impactos producto de las actividades antrópicas.

Abstract The Valley of Estelí, located in the central North part of the country, has a population of 115,033 inhabitants; in where the alluvial aquifer provides the main provision for potable water (80% of the population depends on it) and irrigation. The aquifer has an extension of 71.62 Km², and is under unconfined conditions, or locally semi-confined conditions or artesian conditions. The base water chemistry, indicates that the water is considered apt for human consumption and irrigation. There is no seasonal variation in water chemistry and isotopic composition; which indicates that the alluvial aquifer is not being recharged by the river or by direct infiltration of rain water. ¹⁸O, ²H and ³H results, indicate that the alluvial aquifer is recharged in the mountainous area surrounding the Valley of Estelí. Bacteria and agrochemical results indicate that some water sources in the Valley are impacted product of human activity.

1. Introducción

La actual degradación que presentan los recursos hídricos superficiales y las aguas subterráneas en el país, se debe principalmente a la actividad antropogénica. Nicaragua es un país en donde más de un 70% de la población depende del agua subterránea para el suministro de agua potable; y cuya principal actividad económica es la agricultura, lo que conlleva al uso de aguas superficiales y subterráneas para la irrigación en época seca y al uso intensivo de agroquímicos para garantizar una adecuada producción; produciendo serios impactos en el ambiente.

En la parte alta de la subcuenca del Río Estelí, los recursos hídricos se encuentran en degradación progresiva, arriesgando la disponibilidad futura de agua en la región. En la actualidad, en el Valle de Estelí existe un total de 395 pozos (perforados y excavados; [1]); de los cuales, 16 pozos perforados son administrados por la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL-Estelí). El suministro total de agua potable en el Municipio de Estelí fue de 6.4 MMCA (152 L/día/hab).

Existen muy pocos estudios hidrogeológicos a detalle del acuífero aluvial del Valle de Estelí ([2; 1] entre otros). A pesar de la información existente y dispersa, todavía no se cuenta con un modelo conceptual completo del acuífero, ni se conoce con exactitud los límites de explotación del mismo. Es por esto, que con el objetivo de: 1) evaluar la disponibilidad de agua y la calidad del agua (para fines potables y agrícolas) del acuífero aluvial del Valle de Estelí; y 2) evaluar la contaminación agrícola y urbana generada por la actividad antrópica en la calidad del agua subterránea del Valle de Estelí; se

utilizaron técnicas convencionales e isotópicas (^{18}O , ^2H y ^3H) para la caracterización hidrogeológica; así como también hidrogeoquímica básica, la cual fue complementada con análisis bacteriológico y de agroquímicos.

El presente estudio, es un esfuerzo conjunto del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua), a través del Programa de Maestría en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua coordinado dentro de la Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos (Red CARA), con el financiamiento de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), a través del Proyecto Regional RLA/8/031. Asimismo, se contó con la valiosa colaboración de la Unión Europea, a través del Proyecto Integrado Estelí-Ocotol [3].

2. Marco General del Estudio

2.1. Localización

El Valle de Estelí se encuentra localizado en la cuenca del Río Coco, en la parte alta de la subcuenca del Río Estelí; entre las coordenadas geográficas 13°05' latitud Norte y 86°21' latitud Oeste; y entre los 800 y 1,230 m.s.n.m. (Mapa 1). La ciudad de Estelí, se encuentra asentada en una planicie de suelos aluviales y coluviales de vocación agropecuaria (tabaco y hortalizas; y ganadería de doble propósito en las áreas pedregosas); entre los 800 y 900 m.s.n.m, con una extensión territorial de 23 km².

2.2. Hidrometeorología

2.2.1. Clima

La zona de Estelí, presenta dos estaciones durante el año; un período seco de Noviembre a Abril (Verano), y un húmedo de Mayo a Septiembre (Invierno). En los meses de Julio y Agosto, existe un período seco conocido como *Canícula*.

El clima se clasifica como del tipo Sabana Tropical de altura [4].

2.2.2. Precipitación, Temperatura, Evaporación y Humedad Relativa

Estelí se caracteriza por presentar valores bajos de precipitación (máximos en Mayo y Septiembre; [5]). El régimen de precipitación promedio anual varía de 700.1 a 1,866.4 mm; registrándose estos últimos para el año del Huracán Mitch (1998).

La temperatura media anual varía de 26.8°C a 29.4°C; presentándose los mínimos valores en Diciembre y Enero; y los máximos en Abril. Los valores medios mensuales más altos de evaporación (1971-1988), se registran en Marzo (228 mm), y los menores en Septiembre (118 mm). La humedad relativa en la región varía entre el 56% en Abril y el 80% en Septiembre.

2.3. Geología

El Valle de Estelí se encuentra en la Provincia Central del país. Es una estructura del tipo depresión tectónica o graben simétrico inverso; con un relieve montañoso muy variable en forma de mesetas inclinadas y en cuesta. Muestra una estructura monoclinal cuarteada por una intensa red de fallas y fracturas con orientación predominantemente NE. El drenaje es dendrítico [6].

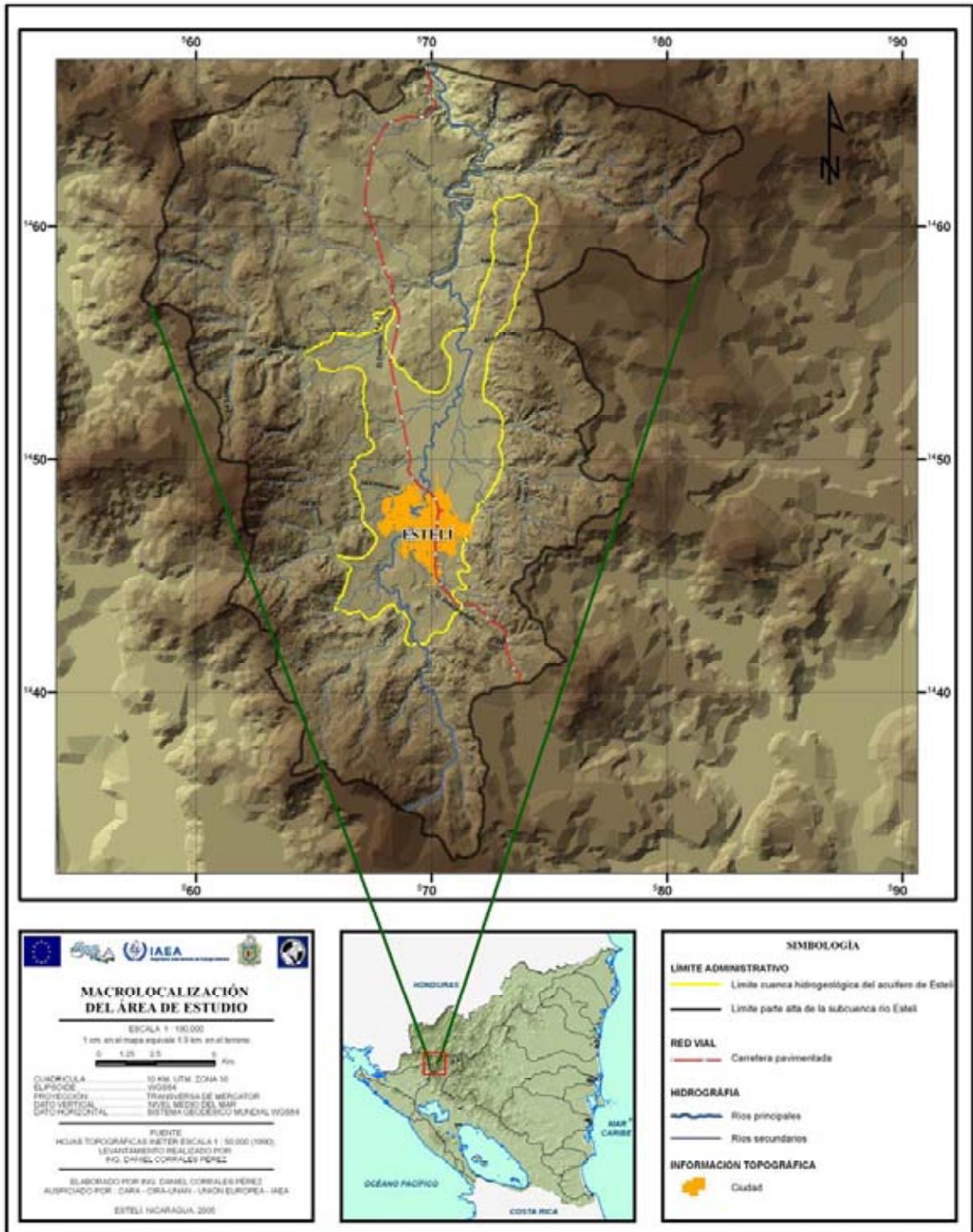


FIG 1. Localización del Área de Estudio.

El Valle comprende planicies con depositaciones mixtas de materiales aluviales, coluviales y de suelos residuales del sistema Cuaternario (conglomerados, gravas, arenas, arcillas y limos). Los depósitos cuaternarios posan discordantemente sobre las rocas sedimentarias del Cretácico y Terciario (Grupos Matagalpa y Coyol). Las rocas terciarias más comunes son: basaltos, andesitas, dacitas, tobas e ignimbritas.

3. Hidrogeología

EL acuífero se encuentra en condiciones generalmente freáticas, o localmente semiconfinadas o artesianas. En la zona sur del Valle, se presentan las mayores condiciones de confinamiento producidas por pequeñas capas de arcilla en la parte superior del acuífero y extensas capas de arcilla en la parte inferior; dando lugar a surgencias en algunos pozos perforados. El confinamiento se reduce a condiciones semiconfinadas a medida que se avanza hacia el sector norte del Valle.

La profundidad media a la que se encuentra el nivel freático está entre los 5 y 10 metros. En las zonas de explotación intensa, el nivel del agua puede encontrarse a unos 40 metros de profundidad.

Los perfiles litológicos de los pozos existentes en el Valle, manifiestan un sistema multicapas; conformado por una superposición de estratos permeables por porosidad (arena y gravas, alternantes con arcillas y limo) y estratos preferentemente permeables por grietas y fisuras.

Las transmisividades para los pozos de ENACAL-Estelí, oscilan entre 40-7,698.4 m²·d⁻¹; con cargas específicas de 2.38-571 gpm/pie [1].

4. Enfoque Metodológico

El agua subterránea es la principal fuente de suministro de agua (potable y para irrigación) en Estelí; de ahí que el conocimiento de su disponibilidad, tanto en cantidad como en calidad, es necesario.

Con tal fin, se recopiló y analizó la información existente del área de estudio, generada por diversas instituciones y organismos; con el fin de definir: la red de monitoreo de calidad de agua, delimitar la ubicación de pluviómetros, seleccionar la red hídrica de aforos, selección de comunidades a encuestarse, selección de sitios para pruebas de infiltración y selección de pozos para monitoreo de niveles freáticos.

Se realizaron reconocimientos en: Geología, Geomorfología, Hidrología, Hidrogeología, Edafología. Asimismo, se realizaron dos campañas de muestreo físico-químico e isotópico en verano e invierno; y bacteriológico y agroquímicos en invierno.

5. Resultados

5.1. Caracterización Hidrogeológica

5.1.1. Pluviometría

La principal fuente de recarga de los acuíferos son las aguas meteóricas. Los datos de lluvia colectados en los pluviómetros ubicados en las comunidades de Llano Redondo (1232 m.s.n.m.), La Thompson (811 m.s.n.m.) y San Roque (991 m.s.n.m.), indican que los meses más lluviosos son Julio y Septiembre, con 129 mm y 246 mm, respectivamente (Tabla 1).

Se observa que el régimen pluviométrico en la zona, es irregular, con baja magnitud y frecuencia, por lo que la recarga es muy poca debido a las altas tasas de evaporación y esorrentía

TABLA 1. REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS (MM) EN VALLE DE ESTELÍ, 2004

Comunidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agost	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Llano Redondo	0	2	6	2	61	98	177	23	295	83	21	0	769
San Roque	1	0	12	11	78	76	139	55	268	45	35	1	721
Thompson	2	0	14	0	70	75	70	36	174	130	26	0	597
Media	1	1	11	5	70	83	129	38	246	86	0	0	696
Maxima	2	2	14	11	78	98	177	55	295	130	35	1	769
Minima	0	0	6	0	61	75	70	23	174	45	21	0	597

5.2. Monitoreo de Niveles Estáticos del Agua (NEA) y Piezometría

Se evaluaron las variaciones estacionales en los niveles de agua en 31 pozos (excavados y perforados), desde Enero a Octubre 2004. El nivel del agua va desde la surgencia y 5 metros (sector norte del Valle: Paso León, La Thompson, Los Chilamates) hasta los 20 metros en el sector sur (La Chácara, La Tunosa, Las Quiatillas). En los sitios de San Pedro, Villa Nueva y Villa Vieja, en donde se localizan las tabacaleras, el nivel se localiza hasta los 29 metros, debido a la influencia de los conos de abatimiento, producto de la explotación intensiva del agua subterránea en esa zona.

Como consecuencia de los volúmenes de agua extraídos en las zonas tabacaleras, la producción de los pozos excavados ubicados en un radio de 1.5 km de las mismas, se ve afectada hasta el punto de volverse improductivos.

Del monitoreo de niveles estáticos del agua, se obtuvieron los mapas estacionales de equipotenciales (Mapas 2 y 3); en donde se observa que las líneas de flujo de agua subterránea, en ambas estaciones, tiene una dirección de sur a norte, y de los extremos hacia el centro del Valle. Se observa que los mayores gradientes piezométricos se encuentran en las fronteras del acuífero, disminuyendo en el centro del valle, en concordancia con el desnivel del terreno. En la zona sur del Valle, la dirección del flujo se acentúa hacia el NE, como resultado de la extracción de agua para consumo humano, de los pozos de ENACAL en ese sector.

5.2.1. Balance Hidrogeológico

Los cálculos realizados para estimar si el acuífero está siendo sobre-explotado o no, indican que la tasa total estimada de escorrentía subterránea en el acuífero es de 2.68 MMCA. La escorrentía subterránea estimada, descarga en el Río Estelí (carácter efluente); lo que se corrobora con el flujo constante en ciertos sectores del cauce principal del río. Las concentraciones de hierro total detectadas en el manantial La Chácara ($2.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), en el pozo excavado Las Quiatillas ($0.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y en el Río El Porvenir ($0.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), confirman este comportamiento. Es probable que esta relación efluente entre el agua superficial y subterránea, sea una vía de depuración de los contaminantes presentes en el acuífero.

5.2.2. Régimen de flujo de la Red Hídrica

Los ríos son alimentados principalmente por la precipitación y la escorrentía superficial directa; mientras que las pérdidas se deben por infiltración y evaporación.

El Río Estelí y sus afluentes, se clasifican como temporalmente intermitentes. El Río Estelí, recibe una descarga promedio de $1000 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ de las pilas de oxidación. Los aforos realizados en los principales tributarios del Río Estelí, indican que el régimen de flujo es muy reducido.

La relación hidráulica agua superficial-agua subterránea; en este caso, del Río Estelí y el acuífero, es de carácter efluente; representando una casi nula fuente de transporte de contaminantes al acuífero.

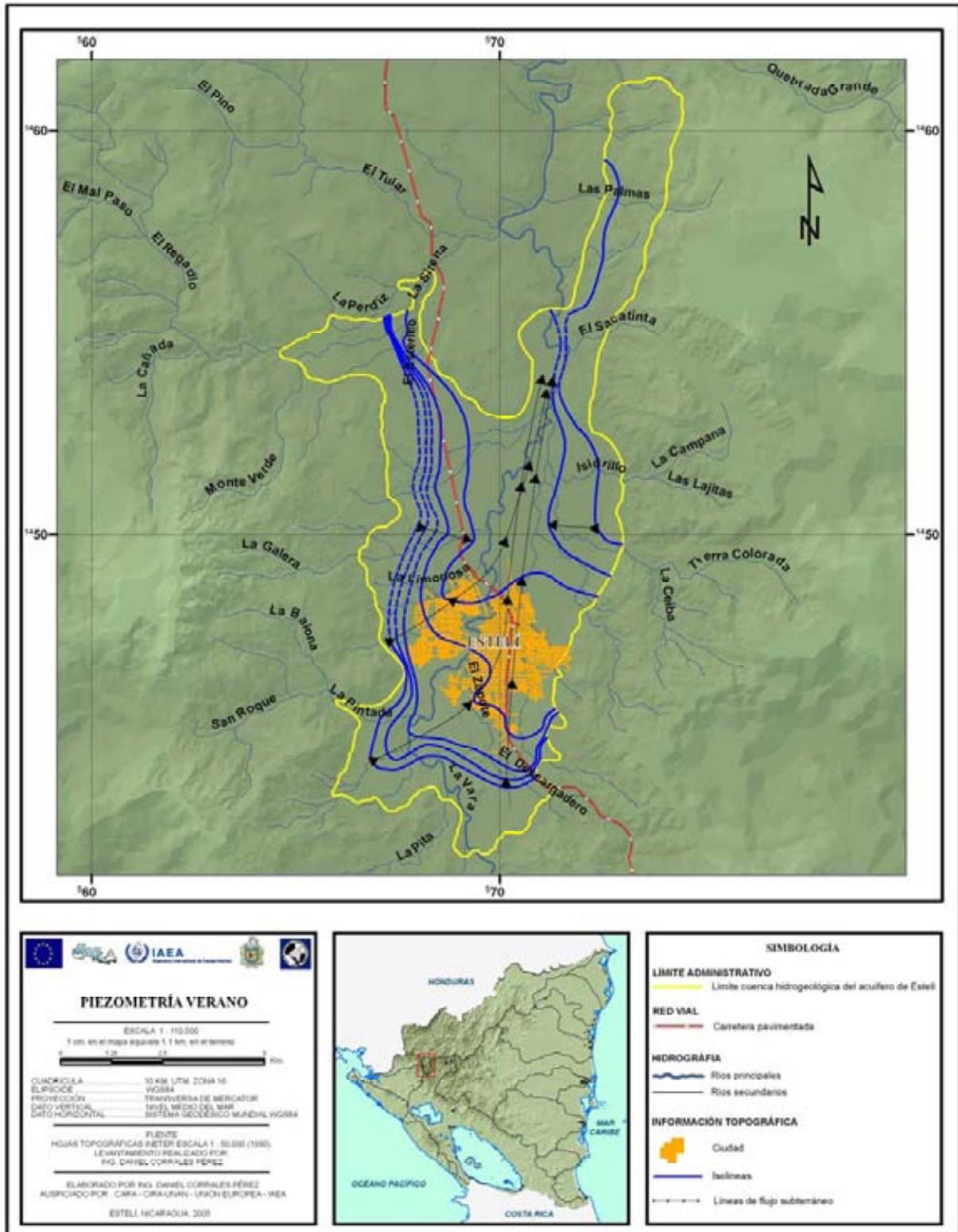


FIG 2. Piezometría de Verano Valle de Estelí 2004.

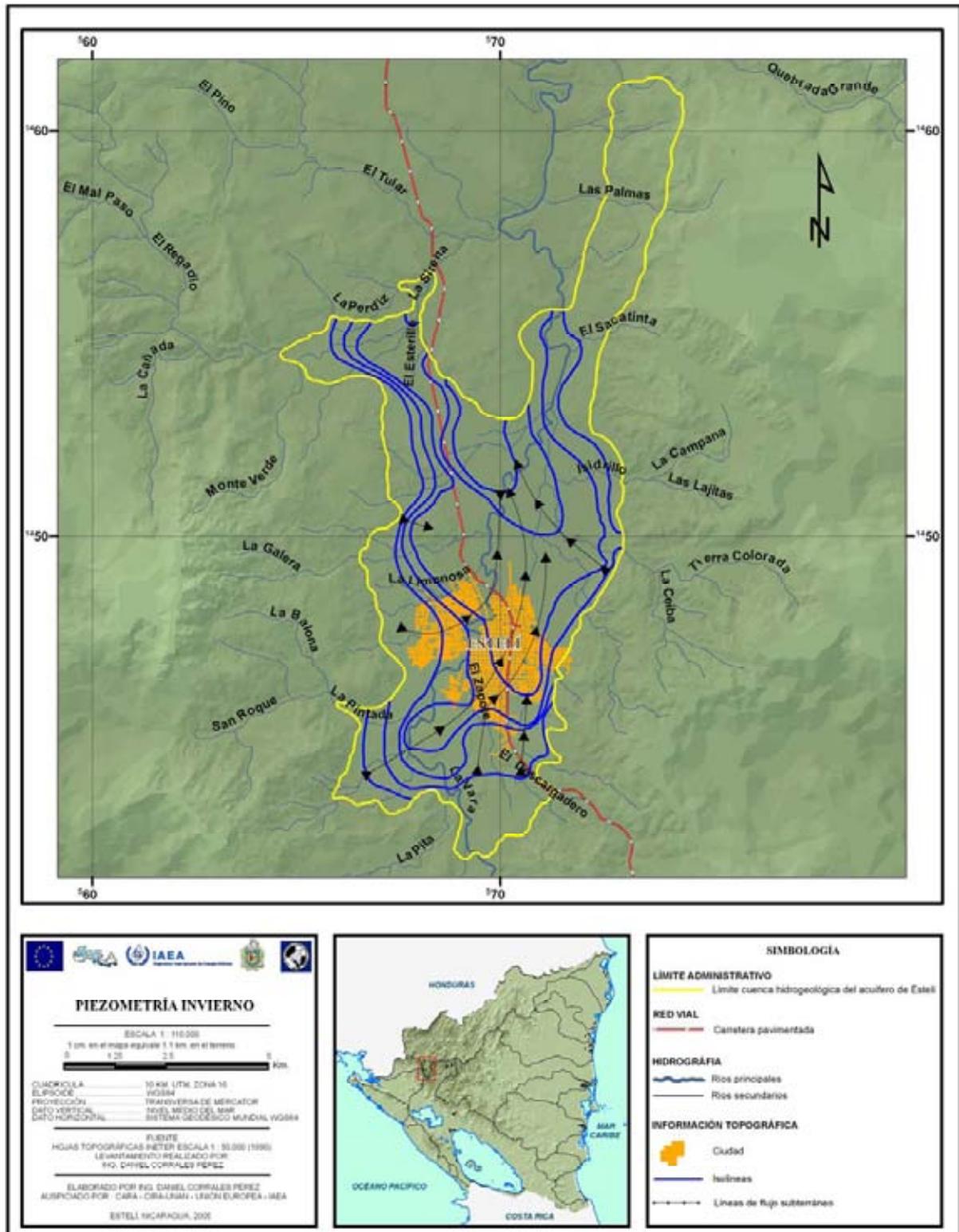


FIG 3. Piezometría de Invierno Valle de Esteli 2004.

5.2.3. Descarga Artificial de Agua Subterránea

La extracción total anual de agua del acuífero del Valle de Estelí, fue de 11.44 MMCA; de los cuales, el 67% (7.62 MMCA) de la extracción anual es para el abastecimiento potable en las zonas urbana y rural (Tabla 2); y el 26% de la extracción total, se le atribuye al riego por gravedad del cultivo de tabaco.

5.2.4. Recarga del Acuífero

Está condicionada fuertemente por la infiltración de agua en la zona no saturada, como respuesta a una precipitación dada en una cuenca. Los suelos del área de estudio, en relación a la textura; son arcillosos, muy porosos y con una alta retención de humedad, lo que reduce la capacidad de infiltración, presentando bajas velocidades de infiltración ($2.2-10.7 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$; Tabla 3); y por ende, una alta tasa de escorrentía; disminuyendo la recarga del acuífero. En adición a esto, se debe considerar el área urbanizada (23 km^2), cuya impermeabilización disminuye la infiltración.

La recarga natural en el Valle de Estelí, calculada a través del balance hídrico de suelo, es del orden de $30,365 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$; mientras que la recarga artificial, procedente de retornos por riegos y fugas de la red de agua potable, es de $620,000 \text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$; lo cual indica que la recarga procedente de las precipitaciones es muy baja (Tabla 4); indicando que la recarga natural se ve afectada por las altas tasas de escorrentía y evapotranspiración. En lo que respecta a fugas por el sistema de suministro de agua potable, éstas son en la zona no saturada; por lo que la recarga artificial no se ve afectada.

La abundancia de fallas y fracturas (permeabilidad secundaria) en las serranías que bordean el Valle, las características morfológicas de los materiales volcánicos de éstas y su origen, son los principales factores que contribuyen a la recarga regional.

TABLA 2. VOLUMEN DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN EL VALLE DE ESTELÍ, 2004

Actividad	Volumen Extraído (MMCA); 2004	Porcentaje (%)
Tabaco ^a	3.00	26
Consumo humano (urbano) ^b	7.22	63
Consumo humano (rural) ^b	0.40	4
Pastos ^a	0.48	4
Hortalizas ^a	0.31	3
5.2.4.1.1. Total	11.44	100

^a: Época de riego

^b: Anual

TABLA 3. CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN Y PARÁMETROS FÍSICOS DE MUESTRAS DE SUELO, VALLE DE ESTELÍ – 2004

Lugar	Capacidad de Infiltración		Lugar	Densidad		Porosidad	Retención de Humedad			Textura
	mm/h	mm/día		Dap	Dr		CC	%H	PMP	
La Chácara	8.7	208.8	La Chácara	1.48	2.13	30.52	53.36	33.00	25.61	Arcilloso
La Tunosa	7.2	172.8	La Tunosa	1.19	2.14	44.39	38.26	31.00	18.36	Arcilloso
Villa Vieja	3.7	88.8	Villa Vieja	1.17	2.27	48.46	35.33	19.00	16.95	Arcilloso
El Rosario	2.2	52.8	El Rosario	1.30	2.12	38.68	28.70	20.00	28.70	Arcilloso
La Thompson	10.7	256.8	Los Chilamates	1.42	2.10	32.38	47.35	34.30	22.72	Arcilloso
Las Limas	5.1	122.4	Las Limas	1.17	2.14	45.33	45.82	21.00	22.30	Arcilloso
Isidriño	4.1	98.4	Isidriño	1.43	2.10	31.90	43.97	2.50	21.11	Arcilloso
Paso León	2.4	57.6	Paso León	1.55	2.27	31.72	47.14	22.00	22.62	Arcilloso
Media	6.3	132.3								

Dap: Densidad Aparente

Dr: Densidad relativa

CC: Capacidad de Campo

%H: Porcentaje de humedad

PMP: Punto de marchitez permanente

TABLA 4. RECARGAS NATURAL Y ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE ESTELÍ, 2004

Recarga Natural (MMCA)	
Valle	0.03
Serranías	13.56
Recarga Artificial (MMCA)	
Retorno por riego	0.19
Fugas de red de agua potable	0.43
Total (MMCA)	14.21

5.2.5. Entradas por Límites Geológicos

La geología estructural del Valle de Estelí, sus características hidráulicas y las proyecciones de las fallas regionales, permitieron identificar pozos de la red de ENACAL-Estelí, que se encuentran alimentados por fallas (Tabla 5). Sin embargo, la composición isotópica y el régimen actual de precipitaciones, indican que éstas no tienen un efecto significativo en la recarga del acuífero. En adición, las concentraciones de tritio (Tabla 7), sugieren que son aguas relativamente viejas (infiltradas antes de 1952).

Se estima que existe una recarga al acuífero somero de 29.6 MMCA, como resultado del agua almacenada a mayores profundidades en el acuífero secundario, la cual asciende por presión entre fallas y fracturas. Sin embargo, el balance hidrogeológico, indica que hay una variación de 29.65 MMCA en el almacenamiento del acuífero; por lo que la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero no queda bien definida, ya que el acuífero se explota a una profundidad promedio de 100 metros.

Las características hidrogeológicas del acuífero, indican que hasta profundidades de 400 metros, existe disponibilidad de agua en el reservorio; las cuales se infiltraron antes de 1952.

5.3. Caracterización Isotópica

5.3.1. Precipitación Pluvial

De las tres estaciones pluviométricas instaladas en San Roque, Llano Redondo y La Thompson, se colectaron muestras compuestas mensuales de precipitación para ^{18}O y ^2H , durante el período de Invierno. La composición isotópica de dichas muestras se indica en la Tabla 6. Se puede observar que el contenido isotópico en las muestras del mes de Julio, para los 3 sitios, se encuentra bastante enriquecido, producto de las elevadas temperaturas en ese mes debido a la Canícula; y por ende, se traduce en evaporación de la muestra. De igual manera, las muestras del mes de Octubre se encuentran enriquecidas (evaporación), debido a la finalización del período húmedo e inicio del período seco.

5.3.2. Pozos Excavados y Perforados, Manantiales y Ríos

Se colectaron muestras de agua de manantiales, pozos excavados y perforados, y aguas superficiales en Verano e Invierno. La composición isotópica de ^{18}O y ^2H en las diferentes fuentes monitoreadas en ambas campañas, no difiere significativamente. El rango de $\delta^{18}\text{O}$ es de -7.9‰ a -5.0‰ ; mientras que el $\delta^2\text{H}$ va de -55.2‰ a -39.0‰ (Tabla 6). En cuanto al isótopo radioactivo tritio (^3H), se colectaron muestras de agua superficial, manantiales y de pozos excavados y perforados. El ^3H se encuentra presente desde 0.0-0.9 U.T. (Tabla 7).

TABLA 5. RECARGA POR SISTEMA DE FALLAS LOCALIZADAS EN POZOS DE LA RED ENACAL-ESTELÍ – 2004.

Lugar	T (m ² /día)	NEA (ft)	ND (ft)	s (m)	Tiempo (min)	Área de Falla (m ²)	Volumen (MMCA)
Las Cuevas	7698.4	115.5	118.4	0.9	1.0	1500000.0	1.4
Fé y Alegría	4183.0	131.9	132.8	0.3	1.0	1500000.0	0.4
El Parque	1229.2	61.4	75.1	4.3	14.0	1500000.0	6.4
La Cabaña	996.4	19.6	41.2	6.7	1.0	1500000.0	10.1
Media				3.1		1500000.0	4.6
Oscar Gámez	751.6	88.2	96.0	2.4	1.0	1500000.0	3.6
La Chiriza	2251.2	92.5	94.4	0.6	14.0	1500000.0	0.9
Media				1.5		1500000.0	2.2
La Montañita	4207.5	82.4	85.7	1.0	1.0	1500000.0	1.5
Las Porras	6280.8	149.7	154.2	1.4	5.0	1500000.0	2.1
El Rosario	10371.0	74.2	80.9	2.1	1.0	1500000.0	3.2
Media				1.5		1500000.0	2.3
5.3.2.1.1. TOTAL							29.6

T: Transmisividad
s: Abatimiento

NEA: Nivel estático del agua

ND: Nivel dinámico

TABLA 6. COMPOSICIÓN ISOTÓPICA MUESTRAS COMPÓSITAS MENSUALES PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN EL VALLE DE ESTELÍ – 2004

Código	Altitud (m.s.n.m)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	PP mensual (mm)	Pprom. $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	P prom. $\delta^2\text{H}$ (‰)
LL-R/May	1232	-8.2	-57.8	61.40	-5.07 (1.91)*	-32.30 (14.67)*
LL -R/Jun		-5.6	-39.3	97.74		
LL -R/Jul		-2.9	-17.2	176.97		
LL -R/Ago		-5.0	-32.2	23.26		
LL -R/Sep		-6.2	-39.2	294.90		
LL -R/Oct		-3.0	-13.1	83.00		
SR /Abr	991	-3.0	-12.2	11.40	-5.53 (1.60)*	-35.53 (15.27)*
SR /May		-6.7	-47.7	77.60		
SR /Jun		-7.0	-52.5	75.60		
SR /Jul		-4.0	-22.4	139.00		
SR /Ago		-5.0	-32.6	55.10		
SR /Sep		-6.2	-38.9	268.00		
SR /Oct	-3.4	-16.3	45.40			
L-Th/May	811	-7.8	-55.6	69.70	-5.66 (1.49)*	-37.40 (11.15)*
L-Th/Jun		-6.6	-49.4	75.10		
L-Th/Jul		-3.8	-25.6	69.80		
L-Th/Ago		-6.5	-47.3	36.40		
L-Th-Sep		-6.3	-40.7	174.20		
L-Th/Oct		-4.0	-19.9	130.00		

*La desviación estándar se encuentra entre paréntesis.

TABLA 7. COMPOSICIÓN ISOTÓPICA MUESTRAS DE AGUA VALLE DE ESTELÍ – 2004

Código	Altitud (m.s.n.m)	Estación de Muestreo				
		Verano		Invierno		Verano
		¹⁸ O (‰)	² H (‰)	¹⁸ O (‰)	² H (‰)	³ H (U.T.)
PP-ECH	862	-7.25	-51.69	-7.20	-51.65	0.2
PP-EOG	856	-7.50	-53.87	-7.49	-53.51	0.0
PP-EP	840	-7.18	-51.54	-7.18	-51.35	0.6
PP-VV	830	-7.13	-51.50	-7.04	-51.21	Nspa
PP-VN	835	-6.89	-49.89	-7.14	-51.74	Nspa
PP-Pt	826	-6.94	-50.05	-6.91	-51.27	Nspa
PP-In	824	-6.97	-50.98	-6.99	-50.18	Nspa
PP-AV	818	-7.28	-51.63	Nc	Nc	Nspa
PP-EC	810	-7.23	-51.30	-7.22	-52.12	0.4
PP-LG	820	-7.38	-51.53	-7.40	-52.47	Nspa
PP-SSI	821	-7.05	-51.11	Nc	Nc	Nspa
PP-SSII	820	-7.26	-52.89	Nc	Nc	Nspa
PP-SP	851	-7.07	-51.47	-7.01	-51.93	0.9
PP-FD	816	-7.48	-51.54	-7.48	-53.04	Nspa
PP-Chil	990	-7.30	-52.43	-7.29	-52.93	Nspa
PE-SOS	840	-7.02	-50.17	-6.90	-48.80	Nspa
PE-Qui	870	-7.11	-51.18	-6.88	-48.66	Nspa
PE-AR	853	-7.49	-53.83	-7.45	-52.25	Nspa
PE-Pit	967	-7.54	-50.98	-7.52	-50.87	Nspa
PE-Lag	1252	-6.02	-42.49	-5.22	-36.68	Nspa
PE-Esq	1100	-7.51	-51.13	-7.90	-53.70	Nspa
S-Rv	1020	-7.92	-55.19	-7.49	-50.96	0.9
S-Ch	880	-7.39	-52.50	-7.43	-53.37	Nspa
S-SP	896	-7.42	-53.90	-6.87	-48.42	0.0
S-Cy	959	-7.76	-54.47	-7.86	-55.88	Nspa
R-Pin	901	-6.78	-48.88	-6.69	-45.03	0.8
R-Vrs	835	-5.44	-38.99	-6.25	-41.52	Nspa
R-PL	802	-6.33	-47.37	-6.47	-42.59	Nspa
R-Est	1005	Nspa	Nspa	Nspa	Nspa	0.3

Nspa: No seleccionado para análisis

Nc: No colectado

Se observa que la composición isotópica de ¹⁸O y ²H del agua, no varía mucho con la profundidad de muestreo; esto probablemente se deba a que es un acuífero multicapas, conformado por estratos permeables por porosidad y estratos permeables por grietas y fisuras, provocando la mezcla de aguas del acuífero somero con el acuífero profundo [2].

Los manantiales presentaron los valores más empobrecidos; mientras que las aguas superficiales – debido a la evaporación, presentaron los valores más enriquecidos. Se puede observar que la composición isotópica de δ¹⁸O y δ²H de las muestras de precipitación pluvial, presenta valores enriquecidos y empobrecidos, como se puede observar en la línea meteórica local del agua (LMLA; Gráfica 1). Asimismo, se observa que la mayoría de las fuentes de agua monitoreadas (pozos excavados y perforados, manantiales y ríos) presentan valores empobrecidos de ¹⁸O y ²H; lo cual indica que los valores enriquecidos de precipitación no estarían recargando al acuífero, ya que su composición isotópica es diferente a la de las fuentes monitoreadas. Sin embargo, la precipitación pluvial con composición isotópica empobrecida, es la que está recargando al acuífero (similitud de composición con las diferentes fuentes monitoreadas); siendo el contenido isotópico de los manantiales, el mejor exponente de que el agua de lluvia está recargando al acuífero.

El contenido isotópico de las fuentes monitoreadas en la parte alta de la subcuenca, indica que el área de recarga principal del acuífero se localiza en la parte alta de las sierras que bordean al Valle de Estelí.

En cuanto a los resultados de ^3H , las fuentes monitoreadas presentan valores menores que 1.0 U.T. (Tabla 7). Los más altos valores se reportaron en los manantiales localizados en la parte alta del Valle. En el Río Estelí, se encontró ^3H . Un poco de ^3H se encontró en las aguas subterráneas. Las bajas concentraciones de ^3H indican que los ríos son alimentados por aguas subterráneas, y que la recarga reciente no es significativa (bajos valores de ^3H en agua subterránea). Es probable que esta agua se haya infiltrado antes de 1952.

5.3. Caracterización Hidroquímica, Agroquímica y Bacteriológica

5.3.3. Hidroquímica

El carácter hidroquímico de las aguas subterráneas y manantiales monitoreados en el Valle de Estelí, es principalmente del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$, seguido del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ y un mínimo del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$. En cuanto a las aguas superficiales, se determinaron 2 tipos: $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ y $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ (Gráfica 2; Anexo 1).

En cuanto al carácter hidroquímico de la muestra de lluvia, ésta es del tipo $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$, la cual difiere con el tipo predominante de las muestras de agua monitoreadas en el Valle ($\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$). Esta diferencia se debe al probable intercambio catiónico de magnesio por sodio en las formaciones geológicas del acuífero.

Se midieron in situ, los parámetros que indican las condiciones predominantes en el acuífero (pH, temperatura, potencial de oxidación-reducción, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica). De esta manera, el pH se encuentra en un rango de 6.36 a 7.85 unidades de pH, indicando que las aguas se clasifican entre ligeramente ácidas y ligeramente alcalinas. Asimismo, el rango de pH (en adición con los resultados analíticos de laboratorio), indican que el agua del acuífero es mayoritariamente bicarbonatada (la cual se genera en el rango de pH de 7 a 10 unidades).

En este medio (pH de 7 a 10 unidades), la sílice se encuentra presente en menores concentraciones a las que se encontraría con valores de pH mayores de 10 unidades. No obstante, las fuentes que presentan un mayor contenido de sílice, puede deberse a la meteorización de silicatos presentes en la formación geológica (mayor tiempo de residencia del agua en el acuífero).

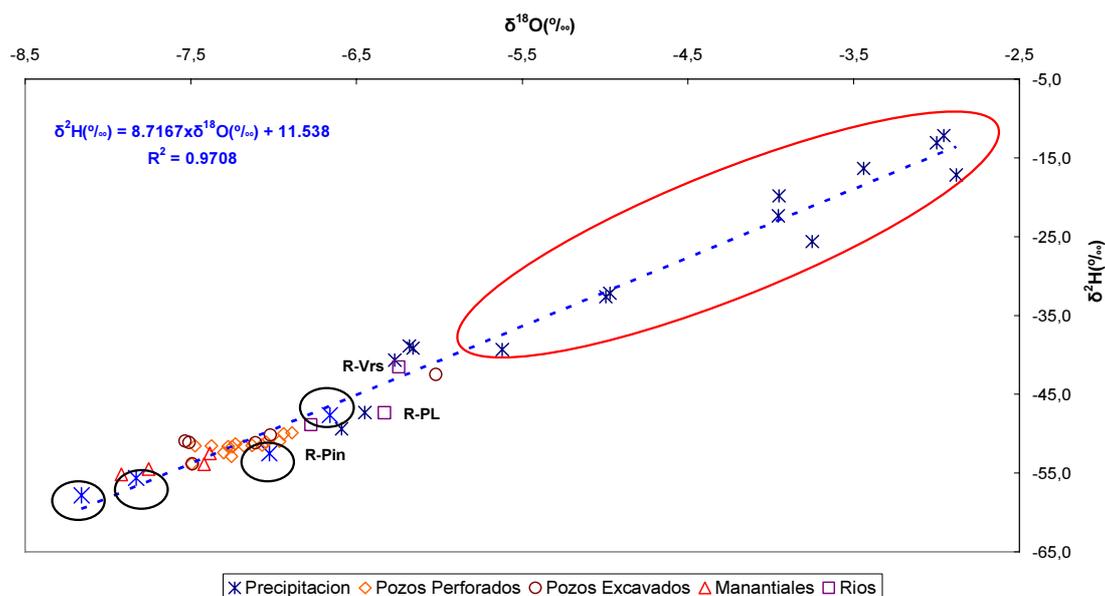


FIG 1. Diagrama de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ de las Fuentes de Agua monitoreadas en el Valle de Estelí – 2004.

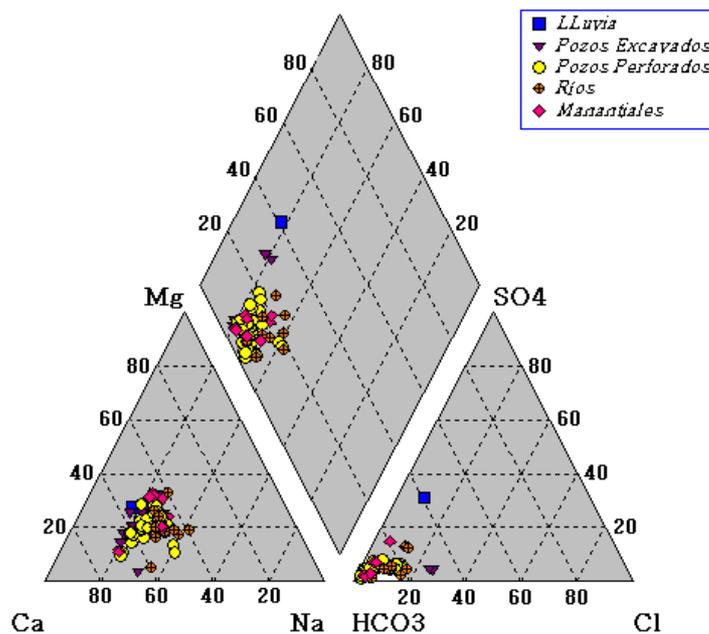


FIG 2. Caracterización Hidroquímica de Fuentes de Agua Monitoreadas en el Valle de Estelí.

Al relacionar los valores de pH, oxígeno disuelto (OD) y potencial de oxidación-reducción (Eh o potencial REDOX), se pueden determinar las condiciones predominantes en el acuífero; y de esta manera determinar el tipo de reacción química que domina los procesos en el sistema de agua subterránea. De esta manera, los resultados obtenidos en el campo, indican que el reservorio de agua presenta unas marcadas condiciones oxidantes (Eh con valores positivos), lo cual se corrobora con el rango de pH (alcalino en su mayoría) y un ambiente aeróbico (OD con valores predominantemente arriba de los $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Por lo que se considera que las reacciones de oxidación son predominantes en el acuífero. Es preciso indicar, que al existir reacciones de oxidación, también se llevan a cabo las reacciones de reducción (equilibrio del sistema).

La relación de NO_3^- -N vs. OD es directamente proporcional (aumento de concentraciones de NO_3^- -N con aumento de los niveles de OD); indicando que el proceso de nitrificación (condiciones aeróbicas) se está llevando a cabo en el acuífero. Sin embargo, algunas fuentes monitoreadas (PP-VN, PP-FU, PP-FD, PE-FU, PP-It, PPAV, PP-JG, PP-LG y PP-EC) no presentan este comportamiento.

La presencia de compuestos nitrogenados (NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+), corrobora que en el acuífero predominan las reacciones de oxidación-reducción.

En los puntos RE-I y RE-II (localizados a 1 y 4.5 Km de distancia de las pilas de oxidación; respectivamente), los valores de NH_4^+ y Fe total se encuentran por arriba de los valores guías establecidos por las normas de calidad de agua [7;8]). Es probable que estas elevadas concentraciones de NH_4^+ se deban al elevado contenido de compuestos nitrogenados (heces fecales y orina) en las aguas tratadas, las cuales son posteriormente vertidas al Río Estelí. El punto RE-II presenta menor concentración de NH_4^+ , debido al recorrido de dichos compuestos en el río; en donde experimentan: dilución, oxigenación (oxidando el NH_4^+ a NO_2^- y NO_3^-), entre otros procesos químicos; como resultado de la purificación natural del río.

Las elevadas concentraciones de Fe total (por arriba de los valores guías de las normas de calidad de agua), producen sabor y color no deseables en el agua. Las fuentes (RE-I, RE-II, R-Por, S-Ch y PE-Qui) presentan valores de Fe total por arriba de los valores guía de las normas de calidad de agua. En el caso del pozo y los manantiales, el contenido de Fe total se puede deber al contacto del agua con los materiales máficos de las rocas del Grupo Coyol Superior.

En cuanto a la calidad el agua subterránea para uso potable, a manera general, y basados en los resultados físico-químicos para pozos perforados (4 son para uso potable público); ésta se considera apta para el consumo humano. En algunas de estas fuentes monitoreadas tanto en Verano como Invierno, se reportaron valores de conductividad eléctrica y temperatura (valores máximos de 581 $\mu\text{S}/\text{Cm}$ y 31.9°C; respectivamente) por arriba de los valores guías de las normas para calidad de agua potable; sin embargo, la salud de las personas no se ve afectada por ingerir agua proveniente de estas fuentes. En algunos casos, se detectaron concentraciones de Fe Total por arriba de los valores guía. Esto puede ser producto de la oxidación de tuberías y rejillas del pozo. En el caso de pozos excavados, debido a diversos factores (ubicación, profundidad, diseño y construcción del pozo, limpieza y manejo del mismo); éstos son más factibles a presentar un número mayor de indicadores por arriba de los valores guías para agua potable. En consecuencia, algunos de ellos no se utilizan para agua potable, y son destinados para riego u otras necesidades. De las fuentes monitoreadas, el PE-SOS presenta valores elevados de contaminación, cuya fuente potencial es el cauce natural cercano al pozo, en donde se descargan desechos orgánicos y aguas grises de la población circundante, debido a la ausencia de alcantarillado sanitario en ese sector. El 100% de los pozos excavados monitoreados, presentan una buena calidad para uso agrícola; mas no para agua potable.

En cuanto a la calidad del agua subterránea para uso agrícola, basados en la relación de absorción de sodio y la conductividad eléctrica (Anexo 2), y utilizando el diagrama para la clasificación de las aguas de riego; se determinó que el 86% de las fuentes monitoreadas son aptas para el riego, y el 14%, son utilizables para riego pero con precauciones.

5.3.4. Agroquímica

El desarrollo de la actividad agrícola llevada a cabo en los últimos 50 años en el Valle de Estelí, se enfoca principalmente al cultivo de tabaco (a pesar de los bajos precios en el mercado internacional); y granos básicos y hortalizas en menor escala; aplicándose altas dosis de agroquímicos en los cultivos, produciendo impactos negativos en el ambiente y salud de la población. Aunado a esto, se tiene el avance de la frontera agrícola en las serranías que circundan el Valle, el cual es impresionante.

Con base en las encuestas realizadas en el Valle de Estelí, se determinó que el tipo de agroquímico empleado en los cultivos en la zona, son los plaguicidas organofosforados y carbamatos, principalmente.

Los plaguicidas son aplicados en varias formas, dependiendo del propósito y los recursos disponibles. En términos generales, los plaguicidas se aplican en estado líquido o en forma de polvos mojables o en forma sólida. Pueden ser utilizados directamente al suelo, a los cuerpos de agua o rociados hacia los cultivos en general. Una vez aplicado, cada molécula de plaguicida o de sus metabolitos tóxicos, representan un potencial de contaminación para el agua subterránea [9].

La colecta de muestras y los análisis para plaguicidas carbamatos y organofosforados fueron realizados de acuerdo a los protocolos de muestreo y análisis del CIRA/UNAN-Managua.

La red de monitoreo de calidad agroquímica del agua, la conformaron 13 fuentes entre pozos perforados y excavados, manantiales y aguas superficiales. Dentro de los pozos perforados, se seleccionó un pozo de ENACAL que se ubica en el centro de la ciudad, y suministra agua potable al municipio.

No se detectaron residuos de plaguicidas organofosforados (13 analitos) en las muestras de agua de las fuentes seleccionadas; probablemente debido a las características químicas de estos compuestos; a los suelos presentes en la región (textura y contenido de materia orgánica); a las condiciones ambientales (precipitación, humedad, temperatura, dirección y velocidad del viento); y a las prácticas agrícolas (forma, época, frecuencia y volumen de aplicación).

Los resultados analíticos de carbamatos (5 analitos), determinaron residuos de metomil en un 54% de las fuentes monitoreadas; seguido por aldicarb en 31%; y aldicarb sulfón y carbaryl con 15% y 8%,

respectivamente (Tabla 8). Los pozos excavados, como se mencionó con anterioridad, son más propensos a presentar varios indicadores; en este caso, el 100% de pozos excavados presentan residuos de carbamatos. Las aguas superficiales, presentan residuos de carbamatos, producto principalmente de la escorrentía superficial; siendo los puntos muestreados sobre el Río Estelí (RE-I y RE-II) los que presentan las mayores concentraciones de metomil (1,107.73 µg/L y 5,301.46 µg/L, respectivamente). En el caso de los manantiales de El Coyolito (625.17 µg·L⁻¹ de metomil) y San Pedro (2947.45 µg·L⁻¹ de aldicarb).

En cuanto a la calidad de las fuentes de agua monitoreadas, desde el punto de vista tóxico, no se puede generalizar si son o no aptas para el consumo humano; de tal forma que las aguas superficiales no se consideran aptas para el consumo humano; los manantiales de El Coyolito y San Pedro no son aptos para consumo humano; el agua proveniente de pozos excavados no es apta para consumo humano; y el agua proveniente de pozos perforados ubicados en las zonas tabacaleras, no es apta para consumo humano. El agua proveniente del pozo perforado de ENACAL (localizado en el Parque de la ciudad de Estelí) es apta para el consumo humano.

TABLA 8. RESULTADOS ANALÍTICOS CARBAMATOS EN MUESTRAS DE AGUA DEL VALLE DE ESTELÍ – SEPTIEMBRE, 2004. [8;6;10]

No.	Código	Lugar	Tipo de Fuente	Carbamatos (µg/L)				
				Aldicarb Sulfón	Metomil	Aldicarb	Carbofurán	Carbaryl
1	HG-01	Río Estanzuela	R	47.28	nd	<ld	nd	nd
2	HG-02	Manantial La Chácara	M	nd	nd	nd	nd	nd
3	HG-03	PP ENACAL El Parque	PP	nd	nd	nd	<ld	nd
4	HG-04	Río Estelí I	R	nd	1 107.73	nd	nd	nd
5	HG-05	Manantial El Coyolito	M	nd	625.17	nd	nd	nd
6	HG-06	Río Estelí II	R	nd	5 301.46	nd	nd	nd
7	HG-07	PPJohny Gay	PP	<ld	nd	nd	nd	nd
8	HG-08	PE Alcalá Valenzuela	PE	nd	151.89	nd	nd	nd
9	HG-09	PP La Joya Intermedio	PP	nd	94.20	505.66	nd	nd
10	HG-11	PE Familias Unidas	PE	96.55	29.59	nd	nd	nd
11	HG-12	PE Aldea S.O.S	PE	nd	nd	499.58	nd	nd
12	HG-13	PE Las Quiatillas	PE	nd	59.89	738.62	nd	19.99
13	HG-14	Manantial San Pedro	M	nd	nd	2 947.95	nd	nd
LIMITE DE DETECCIÓN (µg/L)				15.00	17.22	24.75	10.00	10.00
Normas de		CAPRE (1994)		nr	nr	10	5	nr
Calidad del		EPA (1996)		nr	nr	3	40	nr
Agua		WHO (1996)		nr	nr	10	5	nr
		ECC (1996)		nr	nr	nr	nr	nr
R: Río					< ld: Trazas			
PP: Pozo perforado					nd: no detectado			
PE: Pozo excavado								
M: Manantial								

5.3.5. Bacteriológica

En la ciudad de Estelí, sólo el 50% de la población cuenta con alcantarillado sanitario; por lo que la población ha cubierto sus necesidades en este aspecto, construyendo letrinas y fosas sépticas (ubicadas inadecuadamente); y en la mayoría de los casos, vertiendo las aguas negras y grises a los cauces naturales y ríos. Una parte de la población rural cuenta con letrinas, mientras que el resto defeca al aire libre.

De esta manera, las soluciones inmediatas generadas por la población, se convierten en fuentes puntuales de contaminación para las aguas superficiales y subterráneas de la región; debido a que los lixiviados se infiltran en la zona no saturada hasta alcanzar el acuífero. De igual manera, la variación en los niveles de agua, produce la mezcla de lixiviados presentes en la zona no saturada, los cuales son transportados en el agua subterránea.

Los indicadores monitoreados para la calidad del agua fueron: coliformes fecales, coliformes totales, estreptococos fecales y Scherichia Coli. Se monitorearon un total de 13 fuentes entre pozos perforados y excavados, manantiales y aguas superficiales.

Estos indicadores no se deben de encontrar presentes en el agua potable para consumo humano y actividades domésticas. La presencia de dichos indicadores en el agua potable, manifiestan la presencia de heces fecales; y por ende se deduce que el tratamiento en el sistema de abastecimiento de agua fue inadecuado o de que se produjo la contaminación posteriormente.

Los resultados analíticos (Tabla 9), indican que en la mayoría de las fuentes monitoreadas, existe presencia de estos indicadores bacterianos. En el caso de los pozos excavados y de algunos pozos perforados (PP Johny Gay), la presencia de estos indicadores se debe al manejo inadecuado de dichas fuentes de agua. En el caso de los ríos, los puntos monitoreados en el Río Estelí, presentan las más altas concentraciones de estos indicadores, producto de los vertidos de las lagunas de oxidación de la ciudad de Estelí.

TABLA 9. RESULTADOS BACTERIOLÓGICOS DE FUENTES DE AGUA MONITOREADAS EN EL VALLE DE ESTELÍ – SEPTIEMBRE, 2004 [8;6;10]

No.	Código	Lugar	Tipo de Fuente	Parámetros Microbiológicos (NMP/100 mL)			
				Coliformes Totales	Coliformes Termotolerantes	Escherichia Coli	Estreptococos Fecales
1	HG-01	Río Estanzuela	R	3.00 E +03	3.00 E +03	5.00 E +02	3.30 E +02
2	HG-02	Manantial La Chácara	M	8.00 E +02	8.00 E +02	5.00 E +01	3.00 E +02
3	HG-03	ENACAL El Parque	PP	< 2	< 2	< 2	< 2
4	HG-04	Río Estelí I	R	2.40 E +05	1.30 E +05	1.30 E +05	3.50 E +04
5	HG-05	Manantial El Coyolito	M	1.30 E +02	1.30 E +02	1.40 E +01	3.00 E +02
6	HG-06	Río Estelí II	R	1.30 E +04	8.00 E +03	3.00 E +03	1.10 E +03
7	HG-07	Johny Gay	PP	5.00 E +01	5.00 E +01	1.70 E +01	7.00 E +00
8	HG-08	Alcalá Valenzuela	PE	5.00 E +02	5.00 E +02	7.00 E +01	3.00 E +02
9	HG-09	La Joya Intermedio	PP	2.30 E +01	1.30 E +01	4.00 E +00	< 2
10	HG-10	Fernando Delgado	PP	2.00 E +02	< 2	< 2	2.00 E +02
11	HG-11	Familias Unidas	PE	2.30 E +03	5.00 E +02	5.00 E +02	3.00 E +02
12	HG-12	Aldea S.O.S	PE	1.70 E +03	8.00 E +02	2.20 E +02	3.00 E +03
13	HG-13	Las Quiatillas	PE	3.00 E +03	3.00 E +03	3.00 E +03	2.40 E +03
14	HG-14	Manantial San Pedro	M	3.00 E +03	2.10 E +02	2.10 E +02	1.70 E +03
15	HG-15	Carlos Valenzuela	PP	2.00 E +00	2.00 E +00	2.00 E +00	2.00 E +00
¡MITE DE DETECCIÓN (NMP/100 mL)				<2	<2	<2	<2
Normas de Calidad del Agua	CAPRE (1994)			0	0	nr	nr
	EPA (1996)			0	0	nr	0
	WHO (1996)			0	0	nr	0
	ECC (1996)			0	nr	nr	0

R: Río

PP: Pozo perforado

PE: Pozo excavado

M: Manantial

nd: no detectado

nr: no reportado

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.4. Conclusiones

Es un acuífero aluvial, conformado por multicapas; localmente confinado o semi-confinado. La dirección del flujo subterráneo es principalmente de Sur a Norte del Valle; de acuerdo a la topografía. La dirección de flujo subterráneo, presenta un ligero cambio de suroeste a noreste por la influencia de los pozos de explotación municipal. La profundidad del agua en el acuífero se encuentra desde la surgencia y los 5 metros en el sector Norte del Valle, hasta los 20 metros en el sector Sur; en las zonas donde se localizan las tabacaleras (como Villa Vieja), el nivel se encuentra hasta los 29 metros, producto de los conos de abatimiento.

El acuífero del Valle de Estela, presenta excelentes características hidráulicas, con transmisividades desde 40 hasta 10,371 m²·d⁻¹.

La relación hidráulica entre el río y el acuífero en época de estiaje es de carácter efluente; con una descarga del flujo subterráneo de 7 L·s⁻¹ a 38 L·s⁻¹.

El balance hidrogeológico determinó que la disponibilidad potencial de agua en el acuífero es del orden de 29.65 MMCA. Con base en las proyecciones de fallas regionales, se estimó que el 68% de ingreso de agua en el acuífero, se debe al ascenso de aguas profundas a través de las fallas locales. La permeabilidad secundaria (fallas y fracturas) y las características morfológicas de los materiales volcánicos que predominan en las serranías que circundan el Valle, influyen en la recarga regional de 13.56 MMCA. La recarga local (30,365 m³·a⁻¹), no tiene ningún efecto significativo en la recarga del acuífero; sin embargo, la recarga artificial (620,000 m³·a⁻¹) tiene mayor relevancia. Solamente existe una zona de recarga por lluvia importante en el acuífero, y es la proveniente de las serranías que circundan al Valle de Estela. En cuanto a la descarga artificial del acuífero, el 67% es debida al abastecimiento de agua potable (rural y urbana); y el 33% restante al sector agrícola.

La composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de las fuentes monitoreadas es diversa. Las muestras de precipitación pluvial presentan una amplia variación, desde muestras enriquecidas hasta empobrecidas. Sin embargo, la precipitación no tiene ninguna influencia en la recarga del acuífero; con excepción de las muestras empobrecidas, que presentan similar composición isotópica con las muestras de agua subterránea. Los resultados de ³H, indican que la recarga reciente en el acuífero no es significativa, ya que las aguas actuales del acuífero se infiltraron antes de 1952 (aguas relativamente viejas).

Las condiciones aeróbicas, predominantes en el acuífero, contribuyen a que las reacciones de oxidación-reducción sean las dominantes en el sistema acuífero. La presencia de NO₃⁻, NO₂⁻ y NH₄⁺ en el agua subterránea lo corroboran; al igual que los valores de pH, oxígeno disuelto y Eh (potencial de oxidación-reducción).

El carácter hidroquímico de las fuentes de aguas monitoreadas es del tipo HCO₃⁻-Ca⁺²-Na⁺ predominantemente y HCO₃⁻-Ca⁺²-Mg⁺². Desde el punto de vista hidroquímico, la calidad del agua para consumo humano se considera apta en la mayoría de las fuentes de agua subterránea; con excepción del PE-SOS, que no cumple con los valores guías de las normas para agua potable. En cuanto a las aguas superficiales, éstas no cumplen con los valores guías para las normas de calidad del agua para fines de protección de la vida acuática y estética. En cuanto al uso agrícola, el 86% de las fuentes son aptas para riego; y el 14% son utilizables para riego con precauciones.

La mayoría de las fuentes de agua monitoreadas para bacteriológico y agroquímico, se encuentran impactadas: las aguas superficiales, producto de las escorrentías; los pozos excavados y manantiales, debido a inadecuadas prácticas de manejo; y los pozos perforados, debido a la infiltración de lixiviados de la zona no saturada.

5.5. Agradecimientos

Al co-financiamiento del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), a través de los Proyectos Regionales en América Latina; y de la Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos (Red CARA), a través de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI).

Al esfuerzo conjunto del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua) y la Red CARA a través del Programa de Maestría en Ciencias del Agua, con énfasis en Calidad del Agua; por todo el apoyo logístico, académico y analítico.

A la Unión Europea, a través del Proyecto Integrado Estelí-Ocotol [1], por su valioso apoyo logístico y operacional.

REFERENCIAS

- [1] PRIESO, 2003. **Informe de los resultados del censo de pozos efectuado en 60 Km² del valle de Estelí**. PRAC/N/SE/01/039, Noviembre, Estelí.
- [2] Sequeira, L. 1998. **Estudio geofísico del acuífero del Valle de Estelí**. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, Instituto de Geofísica.
- [3] PRIESO, 2002. **Estudio preliminar de los recursos hídricos actuales de los Municipios de Estelí y Ocotal e individualización de las fuentes alternativas, con nivel temporal al año 2020**. Realizado por Mangano, F. PRRAC N°/N/SE/01/039. Estelí, 2002.
- [4] Köppen, W., Geiger, R., 1928. **Map of World Climates**.
- [5] INETER, 2004. **Dirección de Meteorología**. Managua, Nicaragua.
- [6] Hodgson V. G., 1983. **Generalidades de la geología de Nicaragua. Primer seminario de hidrogeología**. Asociación Nacional de Geólogos y Profesionales Afines. CONAPRO “Héroes y Mártires”. Managua, J. R., Nicaragua. Noviembre. p. 7-15. Informe.
- [7] EPA, 2002. **National Primary Drinking Water Regulations**. In Current Drinking Water Standards.
- [8] Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica (CAPRE, 1994). **Normas de calidad del agua para consume humano**. Primera edición, Septiembre 1993.
- [9] Briemberg, D. J., 1994. **An Investigation of Pesticide Contamination of Groundwater Sources for Urban Water Distribution Systems in the Pacific Region of Nicaragua**. Final Report CIDA Awards for Canadians.
- [10] WHO, 1990. **Guidelines for Drinking Water Quality**. Extracted from Guidelines for Drinking-Water quality. Second Edition. Vol. 2. Health Criteria and Other Supporting Information, 1996 (p. 940-949) and Addendum to Vol. 2, 1998 (p. 281-83).

Anexo 1

Resultados Físico – Químicos de Pozos excavados – Verano 2004

Código	pH	CE µS/cm	T ° C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ -N	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	NO ₂ -N	NH ₄ ⁺	Fe T	F ⁻	B ⁺³	BI %
PP-CV	7,05	277	25,70	28,5	8,2	23,2	2,26	3,3	0,75	6,5	<2	177,7	90,6	0,0009	0,037	<0,04	0,11	0,23	0,60
PP-EB	7,46	426	26,50	59,5	5,8	22,9	1,08	6,0	2,06	5,1	<2	253,7	67,3	0,0009	0,055	<0,04	0,22	0,2	1,27
PP-HSD	7,63	584	28,20	59,4	10,2	56,1	1,91	24,4	4,31	19,3	<2	304,0	62,8	0,0009	0,026	<0,04	0,18	0,09	0,74
PP-ECH	7,32	297	27,30	31,3	7,3	20,5	2,42	5,0	1,16	5,6	<2	178,1	88,9	0,0009	0,043	<0,04	0,11	<0,02	2,30
PP-EOG	7,12	263	27,80	25,3	7,8	16,6	2,92	4,2	0,66	4,2	<2	161,2	92,8	0,0009	0,004	<0,04	0,12	<0,02	3,50
PP-EP	7,02	471	26,70	51,3	12,6	24,4	3,90	23,4	4,03	14,6	<2	235,3	88,9	0,0009	0,033	<0,04	0,05	0,06	3,54
PP-VV	7,30	506	25,90	64,2	11,1	27,9	1,77	16,8	4,25	14,6	<2	279,4	80,8	0,0009	0,093	<0,04	0,20	0,12	2,60
PP-VN	7,05	434	26,20	46,8	10,6	26,6	2,76	17,9	6,28	9,4	<2	207,6	89,4	0,0009	0,053	<0,04	0,18	0,16	1,30
PP-LG	7,32	326	26,40	29,3	9,6	20,4	4,93	5,4	0,22	8,5	<2	176,8	102,4	0,0009	0,033	<0,04	0,22	0,05	0,91
PP-HB	7,66	284	31,70	28,5	7,7	20,0	5,63	2,2	0,24	1,8	<2	182,0	97,9	0,0009	0,072	<0,04	0,16	0,12	0,45
PP-SSI	7,60	460	26,00	58,7	10,6	23,3	3,65	5,9	2,12	11,6	<2	264,0	97,5	0,0009	0,038	<0,04	0,18	0,12	1,72
PP-FD	7,18	220	27,40	22,6	7,0	16,9	4,35	2,0	0,26	1,6	<2	156,1	116,0	0,0009	0,113	<0,004	0,05	0,12	2,22
PP-SSII	7,78	448	26,10	61,0	8,7	26,8	3,45	5,3	4,79	10,4	<2	284,5	96,8	0,0009	0,051	<0,04	0,19	0,13	1,62
PP-In	7,19	413	25,40	49,2	8,7	27,0	2,07	4,7	3,96	10,5	<2	238,3	95,7	0,0009	0,036	<0,04	0,26	0,12	1,63
PP-Pt	7,16	466	26,30	55,5	12,0	26,8	3,35	6,4	3,68	18,1	<2	279,4	95,6	0,0009	0,057	<0,04	0,21	0,15	3,72
PP-AV	7,44	336	29,70	31,9	11,1	20,6	5,59	2,1	0,30	8,0	<2	209,6	98,7	0,0009	0,028	<0,04	0,12	0,07	1,73
PP-JG	7,65	320	26,20	30,3	11,1	19,4	6,48	2,3	0,17	5,0	<2	204,5	102,7	0,0009	0,065	<0,04	0,12	0,07	1,44
PP-FU	7,46	302	30,80	29,3	10,0	19,6	7,20	2,3	1,40	7,6	<2	200,2	96,9	0,0009	0,039	0,14	0,09	0,05	2,98
PP-EC	7,28	319	27,10	30,9	8,8	18,1	5,28	6,5	1,46	11,6	<2	179,4	97,8	0,0009	0,038	<0,04	0,13	<0,02	4,30
CAPRE (1994)	6,5-8,5	400	30	100	30	≤ 200	10	250	10	250	nr	nr	nr	1	0,5	0,3	1,5	nr	
WHO (1996)	< 8	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	≤ 500	nr	nr	nr	1	1,5	0,3	1,5	0,5	
EPA (2000)	6,5-8,5	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	250	nr	nr	nr	1	nr	0,3	4	nr	
VAN(%)	0,0	47,4	10,5	0	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0		
MINIMA	7,0	220,0	25,4	22,6	5,8	16,6	1,1	2,0	0,2	1,6	0,0	156,1	62,8	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	
MAXIMA	7,8	584,0	31,7	64,2	12,6	56,1	7,2	24,4	6,3	19,3	0,0	304,0	116,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,2	
MEDIA	7,4	376,4	27,2	41,7	9,4	24,1	3,7	7,7	2,2	9,2	<2	219,5	92,6	<0,003	0,1	<0,04	0,2	<0,02	

Anexo 1

Resultados Físico-Químicos de Pozos Excavados – Verano 2004

Código	pH	CE µS/cm	T ° C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ⁻²	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Fe T	F ⁻	B	BI %
PE-AR	7,0	253	25,3	27,3	6,1	17,0	2,1	2,3	0,97	6,0	< 2	154,7	90,82	0,001	0,032	<0,04	0,13	0,07	2,6
PE-SOS	7,1	925	24,7	122,0	26,9	50,4	3,2	96,8	10,52	22,5	< 2	436,6	97,20	0,004	0,162	0,44	0,10	0,17	2,5
PE-AV	7,4	479	26,2	53,9	19,2	27,4	2,7	17,2	1,70	14,4	< 2	289,4	113,56	0,001	0,120	0,06	0,14	0,23	1,2
PE-FU	7,5	311	24,1	31,8	10,8	23,8	5,6	5,1	0,77	4,0	< 2	206,9	115,66	0,003	0,165	0,10	0,07	0,14	1,8
PE-Q	7,5	368	25,3	57,2	7,7	19,6	0,9	3,1	1,65	6,4	< 2	255,1	76,90	0,002	0,072	1,55	0,16	0,17	0,2
CAPRE (1994)	6.5-8.5	400	30	100	30	≤ 200	10	250	10	250	nr	nr	nr	1,0	0,5	0,3	1,5	nr	
WHO (1996)	< 8	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	≤ 500	nr	nr	nr	1,0	1,5	0,3	1,5	0,5	
EPA (2000)	6.5-8.5	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	250	nr	nr	nr	1,0	nr	0,3	4	nr	
VANI(%)		40	0	20	0	0	0	0	20	0	nr	nr	nr	0	0	20	0	40	
MINIMA	7,0	253,0	24,1	27,3	6,1	17,0	0,9	2,3	1,0	4,0	0,0	154,7	76,9	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	
MAXIMA	7,5	925,0	26,2	122,0	26,9	50,4	5,6	96,8	10,5	22,5	0,0	436,6	115,7	0,0	0,2	1,6	0,2	0,2	
MEDIA	7,3	467,2	25,1	58,4	14,1	27,6	2,9	24,9	3,1	10,6	<2	268,5	98,8	0,0	0,1	0,5	0,1	0,2	

nr : no registrado VAN : Valor Arriba de la Norma BI: Balance Iónico

Anexo 1

Resultados Físico-Químicos de Ríos y Manantiales – Verano 2004

Código	pH	CE	T	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Fe T	F ⁻	B ⁺³	BI
	Und	µS/cm	°C	mg/L												%			
S-Ch	7,44	351	25,1	49,3	5,1	17,1	1,7	4,0	0,11	3,7	<2	226,2	63,3	0,0012	0,05	2,04	0,04	0,03	3,4
S-SP	7,11	359	26,1	34,5	8,8	26,6	3,1	6,4	0,26	13,1	<2	206,7	83,9	0,0009	0,06	<0,04	0,15	<0,02	3,3
S-R	7,72	245	25,2	23,8	9,6	12,5	1,6	3,4	0,07	2,0	<2	154,6	84,8	0,0332	0,51	0,12	0,05	0,02	2,5
S-Cy	7,23	434	24,8	41,2	18,2	23,2	3,7	6,8	0,16	17,1	<2	269,1	76,9	0,0015	0,04	0,06	0,06	0,08	3,6
R-Es	7,8	215	18,2	19,8	4,7	15,9	4,0	4,5	0,01	1,4	<2	129,0	67,9	0,0009	0,09	0,18	0,13	0,04	2,3
R-P	7,86	223	19,9	21,0	7,0	13,0	3,2	5,0	0,01	1,4	<2	133,2	69,2	0,0009	0,03	0,16	0,12	0,08	1,8
R-Por	8,22	224	24,4	18,2	9,1	14,3	3,4	5,3	0,01	1,3	<2	142,3	52,2	0,0009	0,04	0,64	0,15	0,07	2,9
R-EI	7,45	776	nr	46,7	13,7	57,5	15,8	38,8	0,01	7,7	<2	344,1	98,6	0,0146	26,53	0,44	1,06	0,07	4,0
R-EII	7,81	674	24,4	52,3	13,0	53,9	13,3	35,0	0,05	13,2	<2	280,7	94,5	0,1050	14,44	2,96	0,71	0,1	3,9
CAPRE (1994)	6,5-8,5	400	30	100	30	200	10	250	10	250	nr	nr	nr	1	0,5	0,3	1,5	nr	
WHO (1996)	< 8	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	500	nr	nr	nr	1	1,5	0,3	1,5	0,5	
EPA (2000)	6,5-8,5	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	250	nr	nr	nr	1	1,5	0,3	4	nr	
VAN(%)	0,0	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	22,2	0,0	0,0	0,0				0,0	22,2	44,4	0,0	0,0	
MINIMA	7,1	215	18	18,2	4,7	12,5	1,6	3,4	0,0	1,3	0,0	129,0	52,2	0,001	0,03	0,06	0,04	0,02	
MAXIMA	8,2	776	26	52,3	18,2	57,5	15,8	38,8	0,3	17,1	0,0	344,1	98,6	0,105	26,53	2,96	1,06	0,10	
MEDIA	7,6	389	24	34,1	9,9	26,0	5,5	12,1	0,1	6,8	<2	209,5	76,8	0,018	4,64	0,83	0,27	0,06	

nr : no registrado VAN : Valor Arriba de la Norma BI: Balance Iónico

Anexo 1

Resultados Físico-Químicos de Pozos Perforados – Invierno 2004

Código	pH	CE µS/cm	T ° C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺	Fe T	F ⁻	B ⁺³	BI %
PP-CV	7,25	288	26,4	31,7	7,5	25,6	2,26	3,3	0,68	7,6	<2	191,0	92,5	<0,003	0,426	<0,04	0,21	0,18	0,96
PP-EB	7,44	379	27,1	58,3	5,1	21,7	0,97	5,1	1,80	6,1	<2	251,3	69,3	<0,003	0,072	<0,004	0,24	0,34	2,53
PP-HSD	7,52	584	28,1	65,4	8,9	63,6	1,86	28,1	4,51	19,7	<2	325,6	66,3	<0,003	0,059	<0,005	0,23	0,35	0,39
PP-ECH	7,40	278	28,0	31,3	11,5	18,6	2,26	4,5	1,17	6,3	<2	178,2	90,6	<0,003	0,118	<0,004	0,22	0,53	1,76
PP-EOG	7,39	235	26,4	25,4	7,9	18,1	2,93	2,2	0,62	4,9	<2	164,1	43,9	<0,003	0,018	<0,04	0,20	0,16	2,08
PP-EP	7,16	425	26,0	48,4	13,0	26,0	3,67	22,4	3,54	13,6	<2	230,8	91,0	<0,003	0,010	<0,04	0,18	0,22	2,51
PP-VV	7,06	502	26,0	65,8	11,8	26,8	1,60	12,6	3,98	20,5	<2	279,4	212,6	<0,003	0,052	0,2	0,08	0,23	1,66
PP-VN	7,31	404	28,2	44,4	10,8	30,4	3,30	15,8	5,44	8,4	<2	210,2	92,2	<0,003	0,036	0,45	0,07	0,16	0,60
PP-LG	7,73	291	30,3	28,4	9,0	20,3	7,12	2,0	0,14	4,1	<2	205,0	101,6	<0,003	0,027	0,16	<0,03	0,09	4,32
PP-HB	7,70	271	31,9	29,2	7,1	18,5	5,73	1,9	0,05	3,2	<2	182,0	102,8	<0,003	0,052	0,53	0,05	0,09	0,02
PP-NP	7,52	467	26,0	59,3	19,9	26,6	4,48	3,9	2,15	11,7	<2	294,1	98,9	<0,003	0,200	<0,04	0,13	0,26	4,85
PP-FD	7,39	228	25,8	23,4	6,4	16,8	4,44	1,8	0,15	3,1	<2	153,8	104,6	<0,003	0,031	<0,04	<0,03	0,04	2,14
PP-In	7,09	397	25,4	49,1	9,9	24,8	1,30	5,4	3,98	14,1	<2	238,4	102,1	<0,003	0,042	0,17	0,14	0,17	2,89
PP-SP	7,28	358	24,3	43,6	9,9	21,8	0,95	6,6	3,46	8,6	<2	203,8	100,5	<0,003	0,070	0,28	0,09	0,04	0,02
PP-Pt	7,30	453	26,1	53,8	11,6	26,9	2,88	6,4	3,04	10,8	<2	276,8	93,7	<0,003	0,019	<0,04	0,14	0,21	2,80
PP-JG	7,57	301	27,8	29,6	8,7	20,3	6,53	2,2	0,09	3,3	<2	199,9	103,6	<0,003	0,160	0,05	0,07	0,09	2,54
PP-FU	7,26	290	26,0	29,7	9,4	18,2	4,85	4,8	1,31	9,0	<2	174,3	112,8	<0,003	0,231	<0,04	0,08	0,14	1,57
PP-EC	7,58	303	27,5	30,9	9,4	19,0	4,85	6,3	1,38	7,3	<2	182,0	97,1	<0,003	0,015	<0,04	<0,03	<0,02	2,17
CAPRE (2000)	6,5-8,5	400	30	100	30	≤ 200	10	250	10	250	nr	nr	nr	1	0,5	0,3	1,5	nr	
WHO (1996)	< 8	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	≤ 500	nr	nr	nr	1	1,5	0,3	1,5	0,5	
EPA (1996)	6,5-8,5	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	250	nr	nr	nr	1	nr	0,3	4	nr	
VAN(%)	0,0	33,3	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				0,0	0,0	11,1	0,0	0,0	
MINIMA	7,06	228,0	24,3	23,4	5,05	16,8	0,95	1,78	0,0	3,11	0,00	153,8	43,93	0,00	0,01	0,05	0,05	0,04	
MAXIMA	7,73	584,0	31,9	65,8	19,93	63,6	7,12	28,14	0,0	20,46	0,00	325,6	212,64	0,00	0,43	0,53	0,24	0,53	
MEDIA	7,39	358,6	27,1	41,5	9,87	24,7	3,44	7,52	2,1	9,01	<2	218,9	98,66	<0,003	0,10	<0,04	0,14	< 0,02	

nr : no registrado VAN : Valor Arriba de la Norma BI: Balance Iónico

Anexo I

Resultados Físico-Químicos de Pozos Excavados – Invierno 2004

Código	pH	CE µS/cm	T ° C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Fe T	F ⁻	B	BI %
PE-AR	7,2	240	28,8	35,3	1,2	19,5	2,1	2,2	1,04	6,5	<2	156,4	91,36	0,001	0,028	<0,04	0,23	0,15	1,4
PE-SOS	7,1	1085	26,6	132,4	36,8	47,0	3,6	104,8	10,04	27,5	<2	515,6	93,22	0,006	0,046	0,12	0,14	0,49	3,7
PE-AV	7,4	525	26,0	59,2	17,7	28,4	1,7	18,9	1,78	16,6	<2	307,6	101,26	0,001	0,144	0,04	0,17	0,22	3,0
PE-FU	7,5	321	24,8	31,7	10,3	21,0	5,3	4,7	0,75	5,4	<2	205,3	106,56	0,013	0,216	0,05	0,03	0,16	2,4
PE-Lag	7,7	164	24,3	15,6	7,3	10,6	1,1	3,2	0,37	4,7	<2	101,2	27,38	0,002	0,073	0,22	0,13	0,05	0,2
PE-Qui	7,9	339	25,3	46,7	8,0	16,4	1,0	3,4	1,69	7,4	<2	217,9	64,68	0,001	0,032	<0,04	0,13	0,15	2,8
CAPRE (1994)	6.5-8.5	400	30	100	30	≤ 200	10	250	10	250	nr	nr	nr	1,0	0,5	0,3	1,5	nr	
WHO (1996)	< 8	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	≤ 500	nr	nr	nr	1,0	1,5	0,3	1,5	0,5	
EPA (2000)	6.5-8.5	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	250	nr	nr	nr	1,0	nr	0,3	4	nr	
VAN(%)	0,0	50,0	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	0,0	16,7	0,0	nr	nr	nr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
MINIMA	7,1	164,0	24,3	15,6	1,2	10,6	1,0	2,2	0,0	4,7	0,0	101,2	27,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	
MAXIMA	7,9	1085,0	28,8	132,4	36,8	47,0	5,3	104,8	0,0	27,5	0,0	515,6	106,6	0,0	0,2	0,2	0,2	0,5	
MEDIA	7,5	445,7	26,0	53,5	13,6	23,8	2,5	22,9	2,6	11,3	<2	250,7	80,7	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	

nr : no registrado VAN : Valor Arriba de la Norma BI: Balance Iónico

Anexo I

Resultados Físico-Químicos de Ríos y Manantiales – Invierno 2004

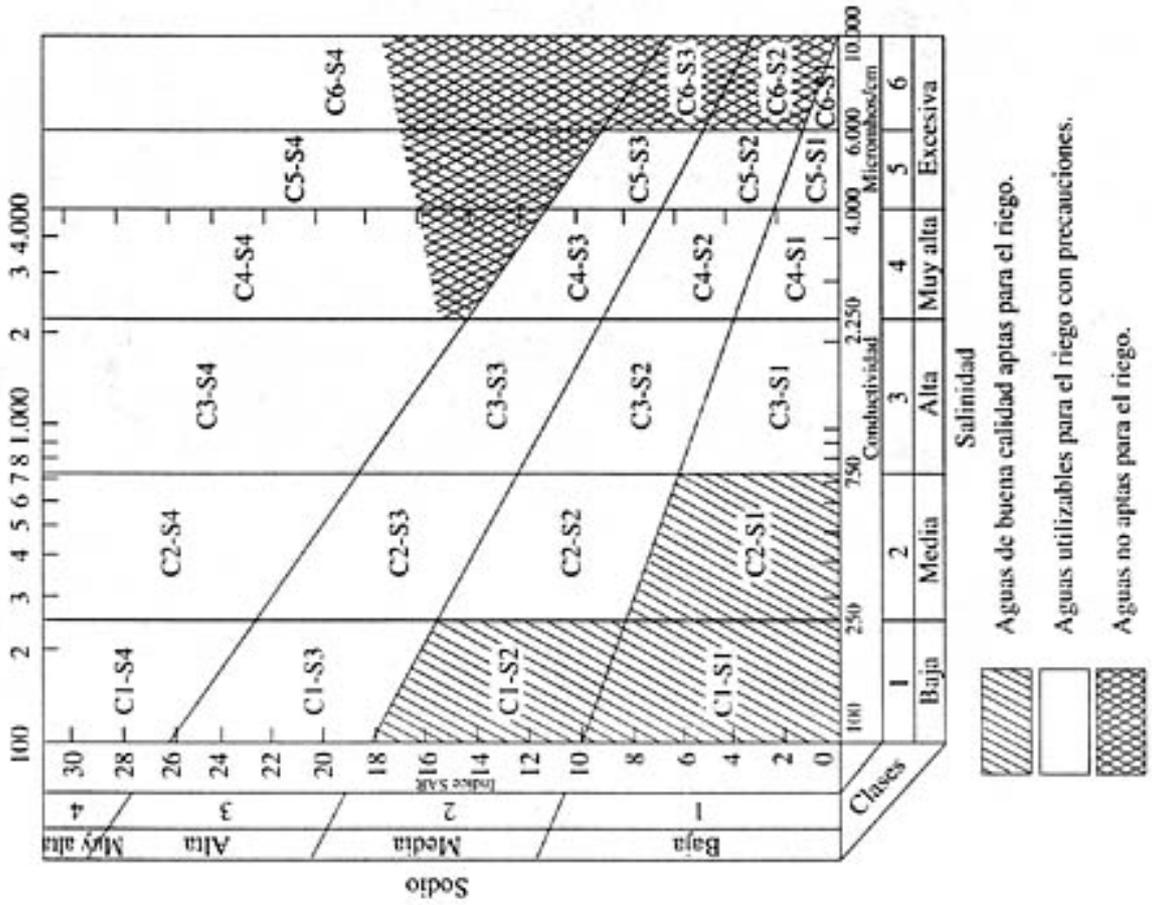
Código	pH	CE µS/cm	T ° C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Fe T	F ⁻	B ⁺ 3	BI %
LL-SR	5,68	8,31	21,2	0,79	0,2	0,3	0,1	<0,2	0,26	1,1	<2	2,56	1,62	0,0100	0,201	0,04	<0,03	0,008	4,9
S-Ch	7,54	315,00	25,9	49,80	4,8	17,4	1,3	3,4	0,73	4,3	<2	217,84	141,15	<0,003	0,10	1,35	0,190	0,280	1,8
S-SP	7,15	394,00	24,9	40,04	10,3	30,3	3,8	8,6	0,96	30,9	<2	210,15	85,41	0,0130	0,02	0,17	0,140	0,160	1,8
S-Rev	7,67	231,00	21,2	21,80	9,6	15,6	1,3	4,6	0,34	3,6	<2	148,64	79,59	0,0160	0,07	11,71	0,130	0,080	1,4
S-Coy	7,21	421,00	23,6	40,89	17,8	24,3	3,7	6,5	0,73	16,3	<2	263,98	76,45	<0,003	0,09	0,05	0,060	0,160	2,1
R-Est	7,65	121,00	20,9	17,09	0,9	11,5	3,6	5,3	0,15	3,2	<2	71,08	56,11	0,0490	0,13	32,94	<0,03	0,100	4,5
R-Pin	7,73	151,00	20,9	14,67	4,6	10,1	5,0	6,4	0,40	4,6	<2	84,57	44,51	0,0390	0,04	6,65	<0,3	0,090	0,6
R-Por	7,84	235,00	27,3	18,26	3,5	12,7	4,7	5,9	0,05	4,2	<2	99,00	48,98	0,0200	0,12	4,44	0,180	0,080	0,2
R-EI	7,34	140,00	nr	12,68	3,4	11,9	5,0	6,1	0,66	8,7	<2	64,07	32,36	0,0720	1,02	30,45	<0,030	0,040	3,5
C-Dde	7,48	115,30	22,0	9,62	3,2	8,0	2,2	5,3	0,05	2,1	<2	52,54	46,80	0,0100	0,15	0,51	0,070	0,060	4,0
R-EII	7,32	207,00	24,4	19,47	4,7	13,1	6,0	9,5	0,51	11,7	<2	89,70	39,55	0,1680	2,35	8,00	<0,03	0,040	2,3
CAPRE (1994)	6,5-8,5	400	30	100	30	200	10	250	10	250	nr	nr	nr	1	0,5	0,3	1,5	nr	
WHO (1996)	< 8	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	500	nr	nr	nr	1	1,5	0,3	1,5	0,5	
EPA (2000)	6,5-8,5	400	nr	nr	nr	200	nr	250	10	250	nr	nr	nr	1	1,5	0,3	4	nr	
VAN(%)	0	9,091	0	0	0	0	22	0	0	0				0	9,1	72,7	0,0	0,0	
MINIMA	7,2	115,3	20,9	9,6	0,9	8,0	1,3	3,4	0,1	2,1	0,0	52,5	32,4	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	
MAXIMA	7,8	421,0	27,3	49,8	17,8	30,3	6,0	9,5	1,0	30,9	0,0	264,0	141,2	0,2	2,3	32,9	0,2	0,3	
MEDIA	7,5	233,0	23,5	24,4	6,3	15,5	3,7	6,2	0,5	9,0	<2	130,2	65,1	0,0	0,4	9,6	0,1	0,1	

nr : no registrado VAN : Valor Arriba de la Norma BI: Balance Iónico

Anexo 2

Clasificación de las Aguas para Riego en Verano – 2004. N

Nº	Código Local	RAS	CE(uS/cm)	Clasificación
1	PP-CV	5,41	277	C2 - S1
2	PP-EB	4,01	426	C2 - S1
3	PP-HSD	9,52	584	C2 - S2
4	PP-ECH	4,66	297	C2 - S1
5	PP-EOG	4,08	263	C2 - S1
6	PP-EP	4,32	471	C2 - S1
7	PP-VV	4,55	506	C2 - S1
8	PP-VN	4,97	434	C2 - S1
9	PP-LG	4,61	326	C2 - S1
10	PP-HB	4,70	284	C2 - S1
11	PP-SSI	3,96	460	C2 - S1
12	PP-FD	4,40	220	C1 - S1
13	PP-SSII	4,55	448	C2 - S1
14	PP-In	5,03	413	C2 - S1
15	PP-Pt	4,62	466	C2 - S1
16	PP-AV	4,44	336	C2 - S1
17	PP-JG	4,26	320	C2 - S1
18	PP-FU	4,42	302	C2 - S1
19	PP-EC	4,07	319	C2 - S1
20	PE-AR	4,17	253	C2 - S1
21	PE-SOS	5,84	925	C3 - S1
22	PE-AV	4,53	479	C2 - S1
23	PE-FU	5,16	311	C2 - S1
24	PE-Q	3,43	368	C2 - S1
25	R-Es	4,54	215	C1 - S1
26	R-P	3,49	223	C1 - S1
27	R-Por	3,86	224	C1 - S1
28	R-EI	10,46	776	C3 - S2
29	R-EII	9,44	674	C2 - S2



Hidrología Isotópica para Optimizar la Gestión de los Recursos Hídricos en el Norte del Perú: El Acuífero Alto Piura - Perú

I. Benavent,^a W. Castillo,^b M. Farías de Reyes^a, A.M. Chávez^a,
C. Távara E.^a, E. Calderón S.^a, J.C. Alcas^a, M.S Dunín-Borkowski^a

^aInstituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura

^bPrograma de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura

Resumen. En el período enero 2001 - diciembre 2004, en el marco del proyecto regional del OIEA RLA 8/031, se llevó a cabo el estudio de la región más productiva del acuífero del Alto Piura, Noroeste del Perú con el objetivo final de establecer un modelo numérico de su comportamiento que permitiera a los administradores del agua llevar a cabo la gestión sostenible del mismo. El estudio lo realizó la Universidad de Piura. Sobre la base de la geología e hidrogeología regionales se aplicaron procedimientos de hidroquímica e isotopía, llegándose a obtener un modelo conceptual preliminar del acuífero y estableciendo las pautas para el seguimiento del estudio hasta su culminación. Se concluyó que el acuífero del Alto Piura es un sistema heterogéneo formado por la interdigitación de material fluvio-aluvial que genera condiciones de almacenamiento que califican este acuífero como semi-confinado. Se identificó una recarga lateral significativa desde los macizos metamórficos e ígneos al NE con alto grado de meteorización y fracturamiento. Los abanicos de piedemonte al NE constituyen una zona de transferencia desde los tributarios del río Piura, hacia el acuífero. No es evidente la conexión hidráulica del acuífero SW con el acuífero objetivo. Hacia el lado SW las aguas son cloruradas-sódicas y sulfatadas-sódicas con conductividades $>1000\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Hacia el lado NE las aguas son bicarbonatadas cálcicas y sódicas, con conductividades $<1000\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, procedentes de las zonas alteradas de los macizos. Se observó una gran variabilidad en la composición isotópica en lluvias, ríos y acuífero, haciéndose difícil establecer un efecto de altura con la composición isotópica. Como alternativa se propone analizar la composición isotópica de manantiales a distintos niveles.

Abstract. During the period January 2001-December 2004, a study of the more productive areas of the Alto Piura aquifer, NW Peru, was carried out as part of the IAEA's regional project RLA8/0/41. The final objective of the project was to establish a numerical model of the aquifer that can be used for a sustainable management of water resources. The study was conducted by the University of Piura. Based on regional geology and hydrogeological information, isotope and hydrochemical techniques were applied to obtain a preliminary conceptual model of the aquifer, and set the premises to achieve the objectives of the study. The studies showed that the Alto Piura aquifer is an heterogeneous system, consisting of alluvial and fluvial sediments, constituting a semi-confined aquifer. A significant lateral recharge from the heavily weathered and fractured igneous metamorphic massifs was identified at the NE sector of the study area. The alluvial fans in the NE region represent a transition area from the tributaries of the Piura river to the local aquifers. The hydraulic connection between surface and groundwater is not evident in the SW area. In this area, groundwater is of the type sodium-chloride and sodium-sulphate, with electrical conductivity values higher than $1000\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. In the NE area, waters are of the type calcium to sodium bicarbonate, with electrical conductivity values lower than $1000\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, derived from weathered rocks in the neighbouring massifs. A large isotope variability was observed in samples from precipitation, rivers and aquifers, and could not easily be explained as consequence of the altitude effect. As alternative, the analysis of the isotope contents of springs is proposed.

1. Introducción

La cuenca media-alta del río Piura, más conocida como región del Alto Piura, posee tierras de buena aptitud agrológica que podrían ser la base para un excelente polo de desarrollo agrícola si no fuera por su semiaridez característica (menos de $250\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$) y porque el río Piura, que la irriga, de régimen

estacional, está afectado por la presencia frecuente de años secos. Sin embargo, dispone de un acuífero subterráneo que se estima de gran capacidad, de tipo libre a semiconfinado, que ha sido durante muchos años el recurso complementario adecuado para cultivos de éxito como el algodón. El proceso de reforma agraria de los años 70 trajo como consecuencia dos realidades complejas, la proliferación del minifundio, sin futuro económico en el corto y mediano plazo, la emigración y pérdida de capacidades gerenciales para la producción agrícola. Como consecuencia, muchos de los más de 1500 pozos perforados acabaron en el abandono y colapsaron.

Transcurridos más de tres décadas de este proceso, aparecen señales evidentes de activación en el desarrollo regional. Varias negociaciones agrícolas han iniciado sus actividades de agroexportación. Los cultivos se han diferenciado apareciendo especies de gran valor en los mercados tanto nacional como del exterior y se augura un resurgir económico en el que deben insertarse los habitantes de la región, además de los que se están incorporando a ella atraídos por la calidad de sus tierras y la benignidad del clima.

Esto será posible si se asegura el riego, agregando a los recursos superficiales, el agua procedente del acuífero subterráneo.

En el año 2000 se firmó un Convenio entre el Instituto Peruano de Energía Nuclear –IPEN- y la Universidad de Piura (Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria -IHHS), mediante el cual, el primero como Coordinador Nacional y el segundo como Coordinador Local, se incorporaban al proyecto regional RLA/8/031.

2. Marco General del Estudio

2.1. Localización

El área del proyecto está ubicada en la parte media a alta de la cuenca del río Piura, en el departamento de Piura, al norte de la costa peruana, en América del Sur (UTM: 9465000, 650000; 9375000,585000, Zona 17 sur. Datum WGS84).

Políticamente pertenece a los distritos de San Miguel del Faique, San Juan de Bigote, Santo Domingo, Chalaco, Yamango, Salitral, La Matanza, Morropón, Buenos Aires, Lalaquiz, Canchaque, Huarmaca, Tambogrande y Chulucanas, provincia de Morropón, departamento de Piura.

El área de interés del proyecto ocupa una extensión de 6174 km², distribuidos de la siguiente manera: Sub-cuenca Bigote-Huarmaca: 1935 km²; Sub-cuenca Chulucanas: 2796 km² y Sub-cuenca Tambogrande: 1443 km².

Se estima que el área cultivada es de 56.7% y el área de bosques y pastos naturales es de 43.3%.

2.2. Hidrometeorología

La zona del acuífero pertenece a una región árida, con precipitaciones de 400 mm/año en promedio, oscilando entre los 25 y los 100 mm·a⁻¹ los años secos, 200 mm·a⁻¹ en aquellos considerados como normales; y hasta 4000 mm·a⁻¹ en años húmedos, alcanzando estos máximos valores cuando ocurre el fenómeno El Niño (ENSO - El Niño Oscilación Sur). Es de mencionar que el 92% de dichas precipitaciones se presentan en el primer trimestre del año (Figura 1).

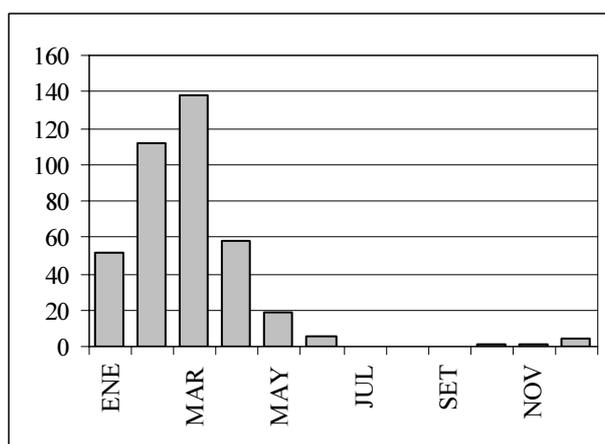


FIG. 1. Precipitación media mensual (mm) en el valle del Alto Piura

La temperatura media mensual en la zona oscila entre 22.7°C en julio y 27°C en enero; siendo la temperatura máxima diaria anual 33.4°C y la temperatura mínima 16.2°C.

La evaporación, medida con tanque evaporímetro, oscila entre 82.6 mm·mes⁻¹ (junio) y 125.3 mm/mes⁻¹ (diciembre). La humedad relativa varía entre 68% y 80% a lo largo del año.

El río Piura es el principal cuerpo de agua de la zona del proyecto. Tiene un área de cuenca superficial total de 9500 km². Su longitud total es de 350 km y nace a 3280 m.s.n.m en la divisoria con la cuenca del río Huancabamba, desde allí inicia su recorrido con dirección noroeste que luego, en la parte media, cambia a suroeste hasta su desembocadura en el mar. La longitud del tramo correspondiente al área de estudio es de 161 km.

El río Piura tiene varios tributarios, siendo los más significativos: Chalpa, Pusmalca, Bigote, Corral de Medio, La Gallega, Charanal y Yapatera, que confluyen con el Piura dentro del área de estudio.

Las aguas naturales del río Piura, con características de régimen estacional, no alcanzan para satisfacer las necesidades del Alto, Medio y Bajo Piura. El trasvase del Río Chira al Piura ha solucionado la escasez de agua en las cuencas media y baja, mientras que el recurso subterráneo debe complementar la demanda de la parte alta.

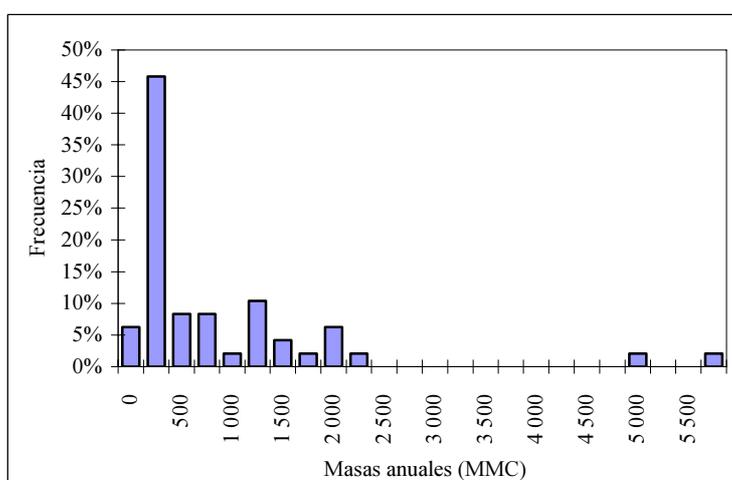


FIG. 2. Masas de agua en el Alto Piura (48 años de registro)

2.3. Geología

El área del proyecto se enclava sobre una cuenca pliomiocénica que tiene su origen en la evolución de la flexión de Huancabamba, mega estructura de deformación cortical que controla la configuración del continente sudamericano en esta latitud. Presencia de complejos metamórficos como el complejo Olmos del Precámbrico y formaciones salar y Río Seco del Paleozoico Inferior exhiben efectos de la Tectónica Herciniana; afloramientos de macizos ígneos representados por plutones y extrusivos volcánicos son reflejo de la Tectónica Andina que generan características de deformación que han inferido en las propiedades y estructuras de las rocas y suelos presentes en la cuenca originando aptitudes hidrogeológicas al propiciar un medio privilegiado para la circulación de las aguas.

La cuenca se emplaza en una topografía y geomorfología que se extiende desde los 200 m.s.n.m. a los 3600 m.s.n.m. y con taludes promedios de 45° a 60°. Las geoformas se caracterizan por laderas muy pronunciadas en los macizos metamórficos e ígneos que tiene relación con la escorrentía y transmisividad hacia el acuífero estudiado.

Litológicamente, los macizos están constituidos por rocas granitoides fracturados en sistemas de diaclasas alterados; igualmente los macizos metamórficos foliados, fracturados y alterados tienen condiciones para el escurrimiento así como para el almacenamiento de agua, que sirve para el sustento de actividades humanas en la región.

El acuífero estudiado se emplaza dentro de un valle tectónico limitado en la margen derecha por macizos metamórficos e ígneos que se elevan desde los 200 a los 3600 m.s.n.m. En la margen izquierda el acuífero está limitado por contornos geológicos metamórficos y depósitos volcánicos sedimentarios cubiertos por grandes acumulaciones de materiales eólicos y coluviales.

Las condiciones hidrodinámicas del acuífero están determinadas por las “facies” del acarreo de material aluvial y fluvial que se entremezcla formando capas tal como reflejan los resultados de la geofísica (SEV's).

Los resultados de la hidroquímica revelaron presencia de sodio y calcio relacionados con la mineralogía del macizo volcánico que aflora en la parte derecha del acuífero estudiado donde el feldespato denominado plagioclasa genera una sustitución iónica, dando como resultado la “anortita” ($\text{Ca Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) y el silicato de sodio y aluminio o “albita” ($\text{Na Al Si}_2\text{O}_8$).

2.4. Hidrogeología

Las condiciones geológicas del área permiten distinguir en la zona de estudio diferentes estructuras o sistemas hidrogeológicos: macizos hidrogeológicos, abanicos de piedemonte y depresiones intramontanas. Cada una de las cuales se diferencian por la manera de acumulación de las aguas subterráneas, sus condiciones hidrodinámicas, recarga, descarga, recursos y reservas, relación con los drenajes superficiales, etc.

Los afloramientos de las rocas ígneas, metamórficas y volcánico-sedimentarias los conforman *macizos hidrogeológicos*; los cuales están en contacto discordante con los depósitos recientes y parecen servir de recarga lateral subterránea para alimentar el acuífero de los depósitos recientes. Además del flujo superficial importante en el área debido a las fuertes pendientes, el flujo subterráneo proviene por una parte de almacenamiento en el medio fracturado y por otra de una circulación subsuperficial en la parte alterada del macizo¹. No ha sido posible cuantificar la capacidad hidrogeológica de estas rocas porque la información existente sobre estas formaciones es escasa. A nivel cualitativo se sabe que existen ríos –que nacen sobre estas rocas- de carácter permanente como son los ríos Yapatera, Charanal, Las Damas, Corral del medio y Bigote que mantienen un flujo base permanente. Existen

¹ Considerando en promedio 10 m como profundidad de alteración.

también numerosos manantiales desde la parte alta hasta la zona de contacto con los depósitos recientes, y algunos se emplean como fuentes de abastecimiento para poblaciones cercanas.

Los depósitos aluviales y fluviales, ampliamente distribuidos en toda el área considerada, han originado en la margen derecha del río Piura una estructura hidrogeológica muy particular formada por una cadena continua de *abanicos de piedemonte*. Los mismos depósitos aluviales y fluviales en las partes altas del área considerada, desde las nacientes del río Piura hasta la altura del poblado de Buenos Aires, han rellenado las *depressiones intramontanas* de poca extensión o han formado conos de deyección. En estas geoformas el almacenamiento y el movimiento del agua corresponden al medio poroso. Los depósitos están compuestos por materiales friables, raras veces poco cementados, de diferente granulometría desde los cantos rodados hasta las arcillas inclusive. Debido a su origen estas geoformas presentan una estructura de capas y/o lentes con variación de facies, lo que da una complejidad a una representación real del almacenamiento (agua libre o en presión) y de la circulación de las aguas subterráneas.

En los abanicos de piedemonte se pueden diferenciar tres zonas. *La zona de formación*, parte inicial de la geoforma, compuesta por sedimentos de mayor tamaño, corresponde a la zona de recarga por infiltración directa de la lluvia o por los ríos que bajan desde las montañas (posiblemente también es la zona de transferencia entre los macizos y los depósitos cuaternarios). Para esquematizar las condiciones hidrogeológicas de la zona de formación, se puede representar en su corte vertical como un sólo horizonte acuífero que contiene aguas sin presión (acuífero libre) con flujo en una única dirección. Las transmisividades medidas muestran valores entre 10^2 - 10^4 $m^2 \cdot d^{-1}$ con una porosidad de los sedimentos evaluada entre 0.10-0.15%. La profundidad del nivel freático con respecto de la superficie va disminuyendo en la dirección general del flujo, ya que la pendiente del nivel es menor que la de la superficie del terreno. La parte intermedia de la geoforma corresponde a *la zona de acuñaamiento* (descarga parcial). Las condiciones hidrodinámicas están determinadas con respecto de una variación importante de facies con capas gravo-arenosa y limo-arcillosas conduciendo por las capas limo-arcillosas a una disminución de la transmisividad en la dirección general del flujo generando un estado de presión en el agua y descarga de estas capas que hacia la superficie (manantiales, descarga al río, evaporación a través el suelo por las zonas donde los niveles de agua están cerca de la superficie); esta zona de acuñaamiento se determina como un sistema acuífero multicapa. La parte periférica de la geoforma pertenece a la *zona de tránsito* con delgadas capas de arena intercaladas con espesas capas de limos y arcillas por lo cual la transmisividad del sistema disminuye significativamente. Las aguas se mueven principalmente dentro de las capas de arena en dirección del flujo regional.

En resumen, estas geoformas conforman sistemas acuíferos heterogéneos, multicapa, de tipo libre a confinado, de espesor muy variable que puede superar los 50 m. Esta unidad es la de mayor importancia hidrogeológica en el área del Alto Piura, dado que presenta muy buenas características hidrogeológicas que varían espacialmente reflejando su heterogeneidad. La transmisividad varía desde menos de 100 a 4000 $m^2 \cdot d^{-1}$, la capacidad específica entre 2 y 10 $L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ y los caudales de producción de los pozos entre los 5 $L \cdot s^{-1}$ y 80 $L \cdot s^{-1}$. También es de fácil acceso, ya que se está aprovechando a través de pozos que en general no superan los 50 m de profundidad. Los niveles de agua se encuentran habitualmente a profundidades menores de 10 m. No obstante, las mismas ventajas (pocas profundidades y buenas conductividades hidráulicas) la hacen vulnerable a la contaminación, por lo tanto la calidad del agua no siempre es satisfactoria. Las condiciones de recarga y descarga de aguas subterráneas en esta unidad igualmente son variables, y dependen del sistema hidrogeológico en consideración (depresión intramontana o abanico de piedemonte), por lo tanto esta unidad hidrogeológica no puede ser denominada como un sólo acuífero.

En la margen izquierda del río Piura, existe también depósitos recientes cuaternarios que pueden ser considerados como acuíferos potenciales (Q_{r-al}). De una parte, son los depósitos aluviales que han rellenado una depresión en la margen izquierda del río Piura, de espesor desconocido (existe pozos mayores de 100 m de profundidad), la formación es compleja con un sistema acuífero multicapa de tipo semi-confinado a confinado con aguas salobres y saladas con recarga débil a nula, dada la poca disponibilidad de aguas atmosféricas y superficiales (clima árido). No se reportan pozos someros, tampoco niveles y parámetros hidráulicos. Además se observan depósitos eólicos cuaternarios (Q_{r-e}),

de gran extensión pero de poca profundidad, compuestos por arenas finas con buena permeabilidad, pero parecen no contener agua.

3. Enfoque metodológico

3.1. *Conocimiento de los antecedentes*

Recopilación de la información existente en Intendencia de Recursos Hídricos, Gobierno Regional, Proyecto Especial Chira-Piura, Compañía Minera Mannhatan, biblioteca del Instituto de Hidráulica y bibliotecas particulares

3.2. *Delimitación del área de estudio*

El acuífero productivo se localiza fundamentalmente en los estratos aluvio fluviales correspondientes al cuaternario reciente, así como en los abanicos aluviales de pie de monte, sin descartar la formación eólica al SW. Se hizo necesario delimitar el área de estudio reduciéndola a la región más productiva, incluyendo el resto dentro de una zona de interés, amplia, donde también se localizan las áreas de recarga.

3.3. *Caracterización del acuífero*

En primer lugar fue necesario realizar un mapa del acuífero con la ubicación de todos los pozos existentes, con sus características físicas, incluyendo centros poblados, carreteras y caminos de acceso. Se establecieron redes para: monitoreo de niveles piezométricos; caracterización hidroquímica de aguas subterráneas y superficiales; extracción de muestras para determinación isotópica en aguas subterráneas, superficiales y lluvias; Procesamiento de los sondeos eléctricos verticales (SEV) existentes y realización de nuevos SEV en coordinación con la IRH. Realizar las pruebas de bombeo necesarias para caracterizar los parámetros hidráulicos. Establecimiento de una base de datos para la información relevada.

3.4. *Modelo conceptual preliminar*

Se hizo necesario reconocer la dinámica del acuífero. Para ello, se estudió el mapa geológico de la región realizándose un número importante y necesario de cortes para ayudar a ubicar posibles formaciones acuíferas. Se establecieron hipótesis en relación con el papel de recarga lateral desde los macizos hidrogeológicos del N E, desde los abanicos de piedemonte, desde los tributarios del Río Piura y desde el mismo río Piura, así como del flujo N y NE hacia S y SW del acuífero. Se caracterizó el acuífero desde el punto de vista del grado de confinamiento. Finalmente se caracterizó su vulnerabilidad mediante la metodología GOD.

3.5. *Parámetros del balance hídrico*

Un paso necesario para el modelamiento numérico es cuantificar el modelo conceptual hasta llegar a obtener un balance hídrico del acuífero. Como parámetros de entrada se encuentran los aportes de las quebradas tributarias Río Sáncor, Las Gallegas, Charanal, Yapatera y Quebrada Seca, además del río Piura en el límite aguas arriba del modelo correspondiente al estrangulamiento de Morropón; adicionalmente deben considerarse, el flujo subterráneo lateral procedente de los macizos hidrogeológicos del NE y la propia precipitación, directa sobre el área del acuífero. En las salidas, se encuentran, en primer lugar, las extracciones que se han reducido a las agrarias, conocidas a través de los planes de cultivo y riego, y las de abastecimiento urbano, conocidas por información de la empresa municipal administradora, las demás se consideraron no significativas; además de ello, la evapotranspiración, la relación río acuífero, para el conocimiento localizado de la recarga mutua, la salida hacia el acuífero correspondiente a la formación eólica del SW y la salida hacia aguas abajo, del acuífero a modelar, en el distrito de Paccha. Para la determinación del balance resulta especialmente importante el análisis de los resultados isotópicos.

3.6. Modelo numérico

Para iniciar esta última parte fue necesario establecer definitivamente las dimensiones del área de modelación (límites del modelo). Se llegó a establecer esta área teniendo en cuenta: el área realmente productiva; la mayor cantidad de información existente; la geometría más simple que diera buenos resultados sin complicar el modelo; la existencia de límites naturales, como los escarpes del NE; una zona de estrechamiento natural con pequeñas secciones de control hacia aguas arriba; el desierto de Sechura hacia el SW con muy escasa información; hacia aguas abajo, el límite de las áreas agrícolas productivas del Alto Piura. Posteriormente, y después de una primera corrida del modelo, se consideró necesario relevar más información para establecer un límite más real hacia el SW. Seguidamente se procedió a una primera caracterización del modelo de acuerdo al grado de confinamiento del acuífero. Se utilizaron los datos de transmisividades de las pruebas de bombeo y los primeros resultados de geofísica para determinar el espesor de las capas. Inicialmente se empleó como datos de balance la información de un balance de la cuenca antiguo, con bajo nivel de detalle que sirvió para determinar la sensibilidad de las variables de recarga.

4. Resultados

4.1. Hidroquímica

4.1.1. Red de muestreo

Se diseñó una red de muestreo de calidad química y microbiológica del agua subterránea en la zona de estudio. El establecimiento de la red de monitoreo comprendió la selección de pozos, a partir de los existentes en la zona, tanto en la margen derecha como izquierda del río Piura. Se realizaron 4 campañas de muestreo, una correspondiente al período de lluvias (febrero-a mayo 2002) y 3 correspondientes al período seco (octubre-diciembre 2002, mayo-agosto 2003 y diciembre 2003). La última campaña debió corresponder al período lluvioso, sin embargo, una anomalía climática extendió el período seco hasta diciembre de 2003.

En cada campaña se evaluó químicamente un número determinado de pozos (ver Tabla 3.1). Así tenemos que, en la 1ra campaña se analizaron 60 pozos, en la segunda 71, en la tercera 69 y en la cuarta 68, haciendo un total de 268 mediciones. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, Perú.

4.1.2. Procesamiento y control de calidad de datos

La evaluación de la calidad de los análisis y la detección de errores en los datos se realizó mediante el balance de la suma de aniones y cationes, expresados en miliequivalentes, tomándose como valor de selección un error menor al 5%. Como resultado de esta evaluación se obtuvieron 206 mediciones aceptables de un total de 268 mediciones realizadas (ver Tabla 1).

TABLA 1. NÚMERO DE POZOS MUESTREADOS, ANALIZADOS QUÍMICAMENTE Y QUE PRESENTAN UN ERROR EN EL BALANCE IÓNICO MENOR QUE 5%

Campañas	N° de pozos		
	Muestre-ados	Para análisis químico	Error balance de iones < 5 %
Primera	80	60	34 (56.7%)
Segunda	94	71	56 (78.9%)
Tercera	115	69	53 (76.8%)
Cuarta	115	68	63 (92.5%)
Total	404	268	206

4.1.3. Comportamiento hidrogeoquímico

Se analizaron los aniones (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) y los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) mayoritarios, además de parámetros de campo como pH y conductividad eléctrica.

La representación gráfica de la información química en el diagrama de Piper (Figura 3) ha permitido identificar tres zonas, claramente definidas, en el acuífero Alto Piura.

— Zona I: Margen izquierda del río Piura

La mayoría de los pozos de la margen izquierda del río Piura son del tipo clorurado-sódico o sulfatado-sódico, con valores de conductividad eléctrica superiores a $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Este comportamiento se ha podido verificar en pozos de la parte alta del acuífero, tales como ID 12, 13 y 14 y de la parte baja ID 25, 26, 28, 35, 36 y 39. Con respecto al río, cerca o lejos de él, se verificó que los pozos 72, 73, 68, 69, 78, 79, 80, 17 y 96, mantenían el mismo comportamiento.

Esta característica del agua, descarta su origen marino, ya que no existe equilibrio entre los cloruros y el sodio presente. Esto se puede visualizar en el diagrama de Stiff presentado en la Figura 4. La conductividad eléctrica en esta zona fue superior a $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

— Zona II. Margen derecha del río Piura

Las aguas de la margen derecha del río Piura, en su mayoría, son de tipo bicarbonatadas-cálcicas o bicarbonatadas-sódicas, manteniendo el patrón característico de las aguas subterráneas (Figura 3 y 4). El calcio puede ser liberado de las plagioclasas cálcicas y pueden proceder de la alteración de piroxenos o anfíboles; el sodio, puede derivarse de la alteración de feldespatos sódicos o de las plagioclasas sódicas.

Las aguas bicarbonatadas provienen de los macizos ígneos y sus características químicas son definidas por el proceso de hidrólisis de los minerales presentes, principalmente en las zonas alteradas de los macizos. En estas zonas, el tiempo de circulación del agua es relativamente rápido debido a la porosidad secundaria y al pequeño espesor del nivel alterado, haciendo que la carga salina se limite a bicarbonatos.

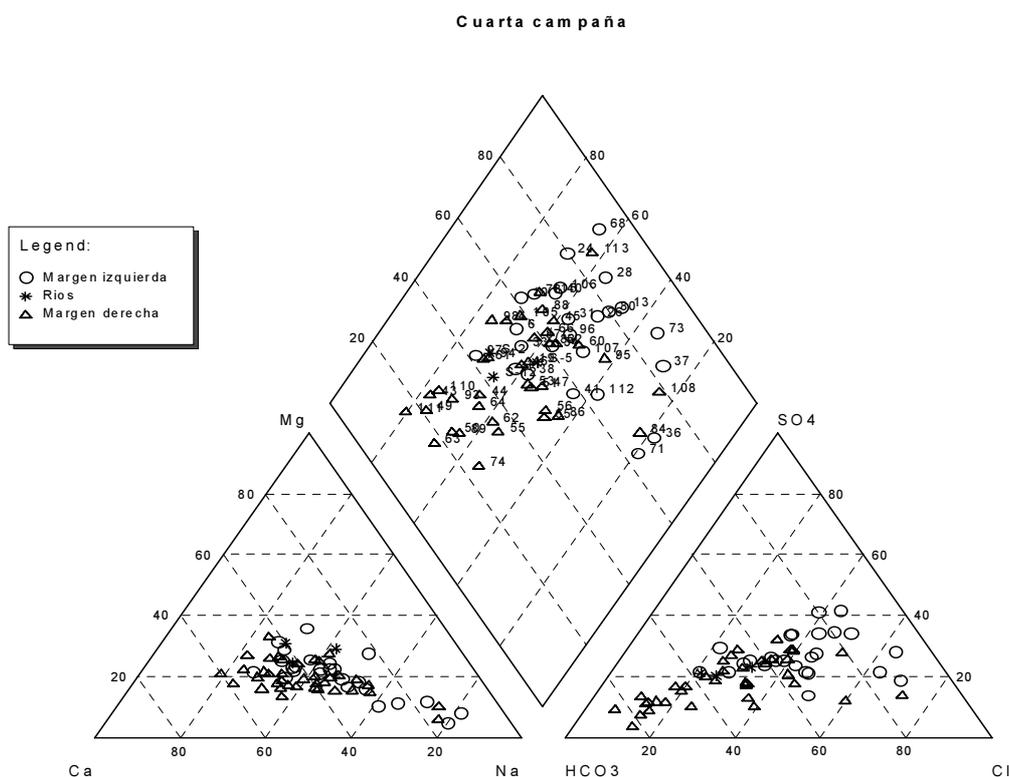
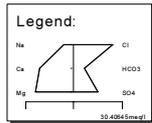


FIG. 3. Diagrama de Piper correspondiente a la zonificación química del acuífero Alto Piura - cuarta campaña (diciembre 2003)



Cuarta campaña

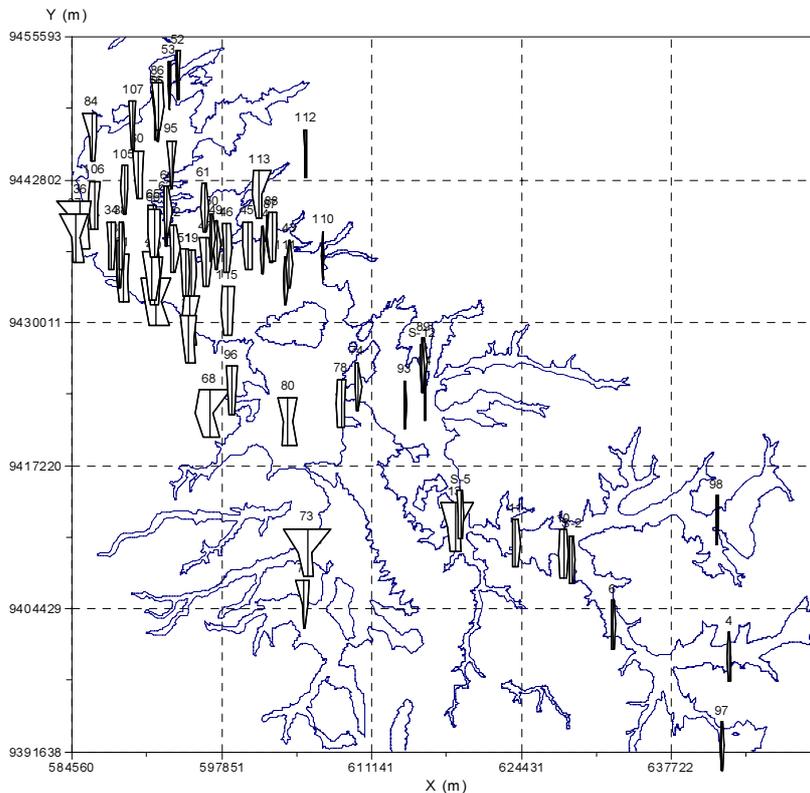


FIG. 4. Diagrama de Stiff correspondiente a composición química del acuífero Alto Piura - cuarta campaña (diciembre 2003)

Estas características químicas se presentan en los pozos ubicados en la parte alta del acuífero (ID 4, 10, 11, 74, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 99) y en los pozos que se encuentran entre los macizos y en las depresiones in tramontanas ubicados en la parte baja del acuífero (ID 18, 20, 23, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 51, 52, 56, 61, 63, 64, 81, 83, 110, 112.). Asimismo, en estos pozos se han obtenido valores de conductividad eléctrica menores a $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Es importante resaltar que en los pozos ubicados en la parte alta de las depresiones in tramontanas se han registrado valores de conductividad menor a $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

— Zona III. Parte baja de la margen derecha del acuífero

El diagrama de Piper (Figura 3) permite visualizar que los pozos ID 67, 108, 82, 84, 85, 95 y 115, pertenecientes a la parte baja de la margen derecha del río Piura, representan aguas de tipo cloruradas-sódicas. Estas aguas, de características semejantes a las de la margen izquierda, circulan por el acuífero cuaternario; además, su carga salina con respecto a las aguas bicarbonatadas de la parte alta y de la margen derecha de la cuenca, ha sido modificada con el contacto prolongado de los depósitos cuaternarios que pueden contener sales por infiltración desde los depósitos salados, estos últimos debidos a las condiciones de aridez que caracterizan a la zona de estudio.

4.1.4. Uso agrícola del agua: conductividad eléctrica

Los resultados de los análisis químicos de las 4 campañas muestran una variación importante de la conductividad eléctrica. En la Tabla 3.2 se presentan los rangos de conductividad eléctrica y el porcentaje de valores registrados, basado en un total de 113 pozos evaluados.

TABLA 2. NÚMERO DE POZOS POR RANGO DE MEDICIÓN

Rango conductividad eléctrica μS	Número de pozos evaluados	Porcentaje (%)
<500	17	15
500–1000	26	23
1000–1500	24	21
1500–2000	15	13
>2000	31	28

Desde el punto de vista de uso del agua -la agricultura en nuestro caso-, se ha observado que la mayoría de los pozos de la margen derecha del río Piura, cercanos a los macizos y a las depresiones intramontañas, tiene calidad C2 ($250\text{-}750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) que define un agua de salinidad media; mientras que en la parte baja de la margen derecha se presenta la clase C3 ($750\text{-}2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) que indica ser un agua de elevada salinidad.

Asimismo, la margen izquierda del río Piura, por lo general, presenta calidad C4 ($> 2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), indicado ser un agua de muy alta salinidad; mientras que en la parte baja la calidad es definida como C3 ($750\text{-}2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) indicando ser aguas de alta salinidad.

4.1.5. Contaminación del acuífero

Desde el punto de vista de contaminación, el diagrama de Shoeller (Figura 6) ha permitido identificar pozos con concentraciones de sulfatos menores a $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ID 48 BC, 85 CS, 99 y 63). Estas condiciones pueden deberse a la presencia de materia orgánica o a la actividad bacteriana en condiciones sedimentarias. La evidencia directa de la reducción de sulfatos en los pozos identificados es la presencia de H_2S , verificado por el olor sulfhídrico en estos pozos.

En cuanto a las características microbiológicas de las aguas subterráneas del acuífero Alto Piura, se ha utilizado como indicador bacteriano el grupo coliforme. Para su evaluación, se ha considerado los valores máximos admisibles para agua potable igual a 10 NMP/100 mL para coliformes totales (valor aceptable en una de 5 muestras evaluadas) y <3 NMP/100 mL para coliformes fecales.

De los 19 pozos muestreados en dos campañas, el 47.4% presenta un incremento en el contenido de coliformes totales y el 42.1% en coliformes fecales, comparándolos con la campaña anterior. El nivel de coliformes totales, alcanzado en la última campaña, es menor e igual a 4600 NMP/100 mL, cantidad inferior a 2400000 NMP/100 mL, valor máximo alcanzado en la primera campaña.

De los 62 pozos, muestreados en una sola campaña, 55.7% presentaron niveles de coliformes totales entre 15 - 2400000 NMP/100 mL. Por los resultados se puede decir que el 50% de los pozos evaluados presentan contaminación microbiológica.

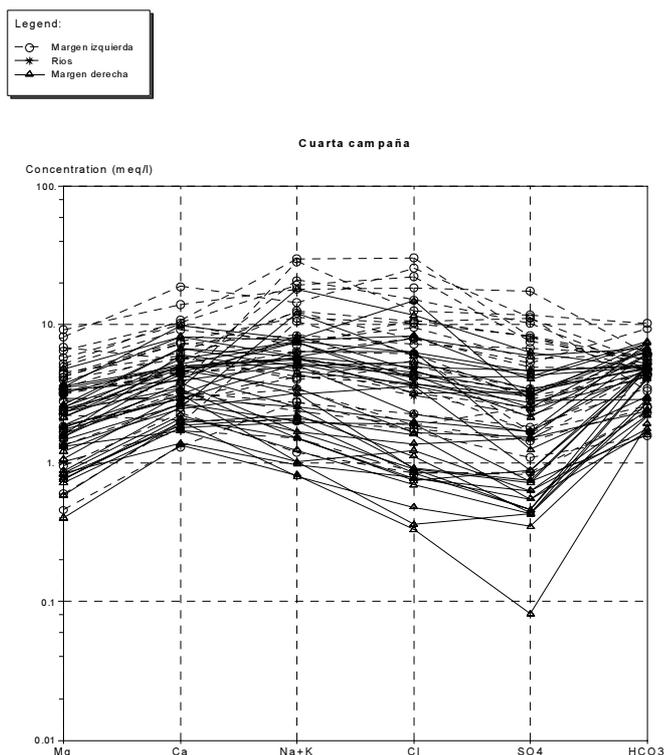


FIG. 5. Diagrama Schoeller. Cuarta Campaña.

4.2. Isotopía

Para el análisis isotópico se establecieron tres redes básicas de observación para recoger aguas de lluvia, de ríos y subterránea. Se muestrearon lluvias mensuales en el 2002 y el 2003 en 6 estaciones; aguas de ríos (6 campañas, ya mencionadas para la química más una campaña en diciembre 2003) y aguas del acuífero (4 campañas, 87 pozos muestreados, habiéndose realizado 2 o más mediciones en 27 de ellos).

4.2.1. Isotopía de la lluvia

Al inicio del proyecto, diciembre de 2001, fueron instaladas tres estaciones para recolección de muestras: Chalaco, Sto. Domingo y Chulucanas; en abril de 2002 se incorporaron tres puntos de observación más, en Morropón, San Miguel de Faique y Salitral. La Tabla 3 muestra las estaciones.

TABLA 3. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN LA ZONA DE ALTO PIURA

ID	Nombre	Altitud	X	Y
1	Chalaco	2217	633571	9442386
2	Santo Domingo	1508	624561	9443683
3	Chulucanas	95	591872	9435834
4	Morropón	144	613792	9426631
5	San Miguel de El Faique	1257	654415	9402721
6	Salitral	193	629358	9409421

En clima árido y semi-árido, como el de Chulucanas, la variación interanual de la precipitación reviste gran importancia porque puede reflejarse en la composición isotópica de la lluvia y en el acuífero. Sin embargo se necesitan muchos años para poder determinar una relación confiable de la variación de la composición isotópica con la altura. Esto permitiría analizar los posibles puntos o niveles de recarga. El año 2002 fue un período anormalmente húmedo y, por tanto, de interés. A ello se suma el disponer de una buena cantidad de información isotópica de ese año.

En este estudio (Tabla 4), se puede considerar que la oportunidad de los muestreos de lluvia realizados entre diciembre 2001 y mayo 2002 representa bien la temporada lluviosa y la composición isotópica de las lluvias de esa temporada. En el muestreo del 2003, en cambio, el 70% de la lluvia recolectada corresponden a la estación de Chalaco –por ausencia de lluvia en otros puntos- lo que conlleva la dificultad de comparar isotópicamente la precipitación regional y la variabilidad mensual de la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$) de la lluvia - de -8‰ a -10‰ en 2002-. Por ello no pueden considerarse estos datos como representativos de la recarga anual teórica.

En el año 2004, algunas muestras tienen la marca de una evaporación en meses donde la cantidad de precipitación es importante para pensar en una eventual desaturación del perfil atmosférico relacionado con una evaporación durante la caída de la lluvia; por lo tanto es mejor descartar estos puntos para el análisis.

Eliminando los puntos discordantes la Recta Meteorológica Local (RML) es igual a (Figura 6):

$$\delta^2\text{H} (\text{‰}) = 7.9 \delta^{18}\text{O} + 10.4$$

La RML es más conforme a la recta meteorológica mundial

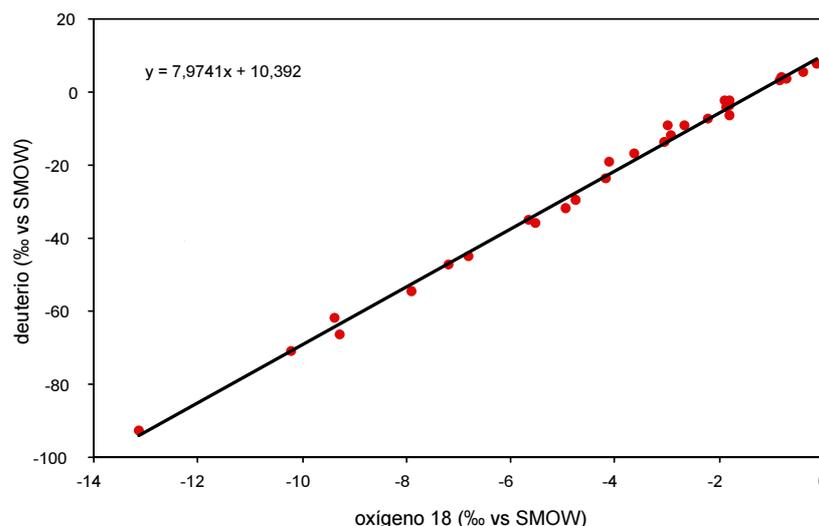


FIG. 6. Oxígeno-18 vs. deuterio, lluvias mensuales no evaporadas, de las 6 estaciones.

En términos climáticos a nivel del ciclo anual del 2002, se puede también interpretar la señal isotópica. La característica principal del ciclo de lluvia en zona árida y semi-árida es un ciclo corto de 5-6 meses con cantidad limitada de lluvia al inicio y fin, y un centro de la temporada de 2-3 meses donde la cantidad de lluvia es máxima (más de 70% de la lluvia total).

En términos isotópicos el inicio de la temporada va a traducirse por una composición isotópica enriquecida de la lluvia por que el perfil atmosférico está desaturado y el efecto de masa es reducido. Al centro de la temporada, el perfil atmosférico está saturado y la composición isotópica estará más empobrecida por efecto principalmente de masa y al final de la temporada nuevamente los valores isotópicos se enriquecen, pero en general menos que al inicio de la temporada, el perfil atmosférico es todavía saturado. Se puede complicar el esquema isotópico si intervienen diferentes masas de aire.

TABLA 4. RESULTADOS ISOTÓPICOS DE LA LLUVIA EN AL ZONA DE ESTUDIO

Estación	Mes	Precipitación (mm)	¹⁸ O (‰)	² H (‰)	"d" (‰)
Chalaco	Dic-01	53.8	-4.75	-29.5	8.5
	Ene-02	36.0	-2.93	-12.0	11.4
	Feb-02	259.5	-4.10	-18.9	13.9
	Mar-02	434.0	-10.21	-70.9	10.8
	Abr-02	174.0	-13.12	-92.9	12.1
	May-02	51.8	-8.57	-63.6	4.9
	Oct-02	90.5	-6.80	-44.8	9.5
	Nov-02	42.5	-5.51	-35.7	8.4
	Dic-02	130.0	-4.18	-23.8	9.7
	Ene-03	130.5	-3.05	-13.5	10.9
	Feb-03	157.0	-3.64	-16.8	12.4
	Feb-04	116.0	-3.00	-9.3	14.7
	Santo Domingo	Dic-01	25.5	-2.12	-10.4
Feb-02		256.0	-2.85	-15.8	7.0
Mar-02		545.0	-7.91	-54.4	8.9
Abr-02		209.5	-9.94	-73.5	6.02
May-02		35.5	-5.66	-34.9	10.4
Oct-02		51.5	-3.79	-22.7	7.7
Nov-02		24.5	-1.87	-9.2	5.7
Dic-02		95.0	-1.79	-6.17	8.2
Ene-03		169.5	-1.87	-4.0	10.9
Feb-03		174.5	-2.67	-8.9	12.4
Feb-04		540	-2.2	-7.3	10.3
Chulucanas		Dic-01	9.5	-0.04	-0.7
	Feb-02	47.9	0.34	4.7	2.0
	Mar-02	415.0	-5.46	-37.8	5.9
	Abr-02	188.5	-7.52	-52.5	7.6
	Ene-03	63.0	-0.85	3.0	9.8
	Feb-04	no registrado	0.8	8.7	2.3
	Morropón	Abr-02	177.5	-7.18	-47.1
Ene-03		46.5	-0.71	3.7	9.3
Feb-03		44.5	-0.38	5.3	8.3
Feb-04		no registrado	-1.9	-2.1	13.1
San Miguel de el Faique	Abr-02	279.5	-9.37	-61.7	13.3
	May-02	44.5	-4.94	-31.6	7.9
	Oct-02	45.5	-4.36	-35.7	-0.8
	Dic-02	50.5	-1.45	-6.5	5.1
	Ene-03	193.5	-1.79	-2.5	11.9
	Feb-03	146.5	-1.81	-3.8	10.6
Salitral	Abr-02	167.5	-9.27	-66.5	7.7
	Ene-03	51.8	-0.14	7.5	8.6
	Feb-03	92.5	-0.79	4.0	10.3

En el caso del Alto Piura se reconoce la influencia de dos masas húmedas, una desde el Océano Pacífico y otra desde la vertiente Amazónica, que se relacionan durante toda la temporada lluviosa. Sin embargo, con la información isotópica de las estaciones generada hasta la fecha no se puede ver este esquema climático observándose una única marca isotópica (Figura 7).

Para la temporada de 2002, se puede ver un efecto de altura con la composición isotópica ponderada, considerando las tres estaciones donde el registro isotópico (oxígeno 18) es completo (Chalaco, -8,50‰, Santo Domingo, -6,74‰ y Chulucanas, -5,63‰). El 2002 es un año muy lluvioso, sobretodo en la parte baja de la cuenca; reflejándose en un empobrecimiento isotópico anormal de las precipitaciones en la parte baja de la cuenca, y por ello no se pueden tomar estos valores como referencia del valor isotópico de la recarga a esta altura.

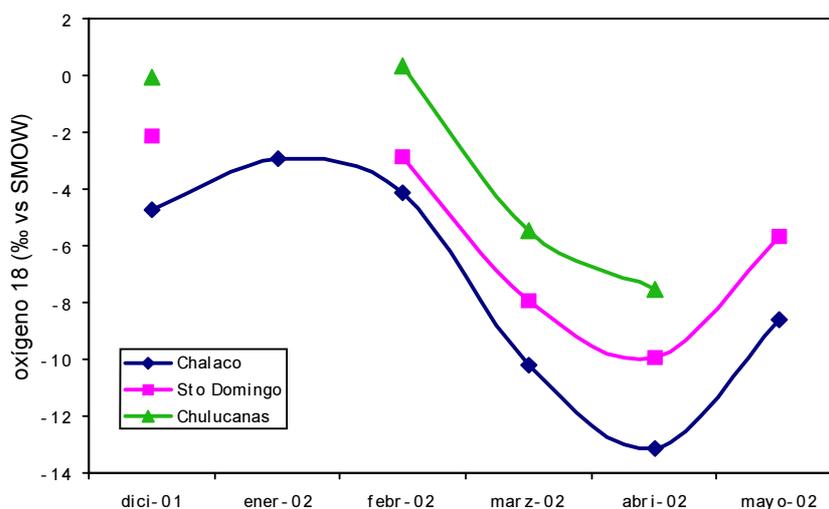


FIG. 7. Comportamiento del oxígeno 18 en las lluvias durante la temporada lluviosa de 2002.

Una alternativa para tratar de obtener una relación confiable entre isótopos y altura, es buscar y analizar la composición isotópica de manantiales perennes, con respecto de la altura. No es tan preciso como una red de pluviómetros porque el área de influencia de un manantial es más grande. Con una red amplia, manantiales cada 250 metros de altura, se podría reconstruir esta relación de manera confiable.

4.2.2. Isotopia del río

Se muestrearon aguas del río a 6 períodos diferentes, entre marzo 2002 y diciembre 2003, con el objeto de realizar análisis isotópicos y químicos (Tabla 5); a través de la red de 13 puntos ya mencionada en el capítulo anterior (Figura 8).

La primera campaña de marzo 2002, correspondiente a la temporada lluviosa, muestra una homogeneidad de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en la parte alta y baja de la zona del acuífero (-6.0‰ / -5.1‰). Los puntos generalmente no muestran evaporación. Esta época corresponde a un mes muy lluvioso de un año excepcionalmente húmedo. No tenemos medición de caudales, pero se puede pensar que la composición isotópica del río está controlada principalmente por la composición isotópica media de la lluvia sobre la cuenca del río Piura. Esto significa que la composición isotópica del río cambiará con el tiempo en relación con la importante variabilidad de la composición isotópica de la lluvia durante el mes. Se puede ver por ejemplo, que para las campañas 3 (Febrero 03) y 4 (Marzo 03) correspondientes también a una temporada lluviosa, la composición isotópica en el río es diferente con valores de -5.2‰ / -4.5‰ y -5.5‰ / -4.1‰, respectivamente.

TABLE 5. ISOTOPIA DEL RÍO PIURA Y AFLUENTE (EN ‰)

Nombre	X	Y	Altitud	Marzo 2002		Octubre 2002		Febrero 2003	
				¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H
1 Rio Serrán	636384	9399157	221	-5.68	-36.0	-5.62	-37.9	-5.62	-37.9
2 Rio Salitral	628916	9408786	164	-5.70	-38.0	-5.09	-35.2	-5.09	-35.2
3 Rio Bigote	634103	9412404	193	-5.88	-39.0	-4.01	-28.8	-4.01	-28.8
4 Rio Piura antes de Q. Seca	620754	9411151	145	-5.76	-36.0	-4.77	-33.1	-4.77	-33.1
5 Rio Buenos Aires	619029	9412854	136	-5.19	-34.0	-4.65	-32.5	-4.65	-32.5
6 Aguas abajo de confluencia de La Gallega y Corrales	612913	9423295	131	-6.00	-39.0	-4.78	-31.4	-4.78	-31.4
7 Rio Piura aguas abajo Carrasquillo	609062	9424039	125	-5.93	-40.3	-4.51	-29.9	-4.51	-29.9
8 Rio Charanal	596971	9433449	115	-5.13	-32.3	-2.67	-19.9	-2.67	-19.9
9 Rio Yapatera	592836	9435493	102	-5.92	-35.5				
10 Rio Ñacara	591690	9434784	105	-5.86	-36.9	-3.65	-26.8	-3.65	-26.8
11 Rio Corrales	615681	9424000	143	-5.90	-40.0	-4.67	-32.1	-4.67	-32.1
12 Rio La Gallega	615634	9425947	155	-6.00	-41.0	-4.92	-32.5	-4.92	-32.5
13 Rio Seco	619133	9410958	145	-6.00	-40.0				

Nombre	X	Y	Altitud	Marzo 2003		Junio 2002		Diciembre 2003	
				¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H	¹⁸ O	² H
1 Rio Serrán	636384	9399157	221	-4.97	-32.5	-4.90	-33.6		
2 Rio Salitral	628916	9408786	164	-5.06	-32.5	-4.90	-33.2	-4.90	-34.2
3 Rio Bigote	634103	9412404	193	-5.17	-32.2	-4.50	-29.1		
4 Rio Piura antes de Q. Seca	620754	9411151	145	-5.07	-32.4	-4.60	-30.2		
5 Rio Buenos Aires	619029	9412854	136	-5.05	-32.5	-4.60	-30.7	-4.10	-29.5
6 Aguas abajo de confluencia de La Gallega y Corrales	612913	9423295	131	-5.30	-33.5				
7 Rio Piura aguas abajo Carrasquillo	609062	9424039	125	-5.07	-32.8	-4.70	-31.5		
8 Rio Charanal	596971	9433449	115	-4.08	-26.1	-3.60	-24.5		
9 Rio Yapatera	592836	9435493	102	-4.11	-26.9				
10 Rio Ñacara	591690	9434784	105	-4.71	-30.3	-4.20	-29.1		
11 Rio Corrales	615681	9424000	143	-5.50	-34.6	-5.10	-32.5		
12 Rio La Gallega	615634	9425947	155	-5.12	-31.7	-5.10	-32.0	-4.40	-27.3
13 Rio Seco	619133	9410958	145						

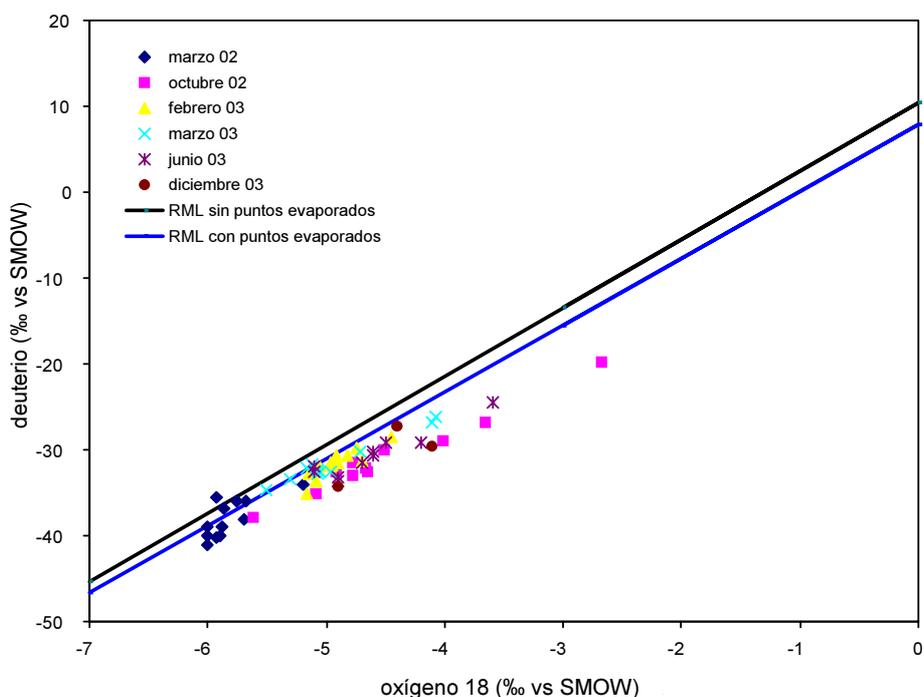


FIG. 8. Oxígeno-18 vs. deuterio, de las aguas del río Piura y afluentes.

La composición isotópica del río durante la temporada seca, correspondiente a las campañas 2 (Octubre 2002), 5 (Junio 2003) y 6 (Diciembre 2003); se caracteriza por valores más enriquecidos con una variabilidad también más importante (-5.6‰/-2.7‰ en Octubre 02). Muestra una evaporación de todos los puntos pero de manera más acusada en la parte baja, con valores más enriquecidos, -2.7‰/-3.7‰ en Oxígeno 18 y un exceso de deuterio entre 1.5‰ y 2.5‰ (campaña 2).

Lo que controla la composición isotópica en el río, en la parte alta de la cuenca a nivel de los macizos, es la descarga local de la reserva de agua almacenada en los macizos durante un año o más. En la parte baja, son las condiciones de evaporación que van a controlar la composición isotópica.

4.2.3. Isotopía del acuífero

87 pozos fueron muestreados en 4 campañas (Tabla 6 y Figura 9), de los que 27 cuentan con 2 o más mediciones. De una campaña a otra, para un mismo punto, la variación isotópica es débil, permaneciendo dentro del error de medición, 17 pozos 0.2‰ en ^{18}O , 7 pozos menos de 0.6‰ en ^{18}O y 2 muestran una diferencia de 0.9‰ y 1.0‰.

La variabilidad isotópica para la totalidad de los puntos es de 3.9‰ (entre -6.8‰ y -2.9‰) en oxígeno-18, pero en el 84% de los pozos está entre -4‰ y -5.5‰, lo que es una variación relativamente pequeña para un acuífero con recarga reciente.

Los valores más enriquecidos (-2.9‰ I-UDEP 100 y -3.2‰ I-UDEP 11) indican evaporación (exceso 0.4‰ y 5.4‰). Y de manera general los valores isotópicos en el acuífero se muestran enriquecidos y exceso en deuterio bajo.

Sin embargo no existe una relación clara entre evaporación del agua y profundidad del muestreo. Se puede relacionar este enriquecimiento con la estructura del suelo local que condiciona la infiltración. No se halla un esquema geográfico claro para la distribución de los isótopos. Lo que se puede deducir es que los pozos cerca del río tienen valores <-5‰, en una zona donde el nivel de agua está cerca de la superficie.

TABLE 6. ISOTOPIA DEL ACUIFERO CUATERNARIO DE ALTO PIURA (EN ‰)

Cod UDEP	X	Y	¹⁸ O media	² H media
I-UDEP-01-II	643311	9390581	-5.02	-30.20
I-UDEP-04-II	642830	9400115	-4.39	-27.50
I-UDEP-05-II	632551	9402669	-5.56	-28.50
I-UDEP-07-II	641940	9410872	-3.65	-21.20
I-UDEP-10-II	628145	9409352	-6.10	-38.60
I-UDEP-11III	623910	9410266	-3.14	-19.70
I-UDEP-12-II	618639	9411091	-4.96	-31.40
I-UDEP-14-II	612332	9420976	-4.77	-32.50
I-UDEP-16-II	607031	9422252	-4.55	-26.70
I-UDEP-17-II	603673	9433585	-5.01	-32.80
I-UDEP-18-II	595167	9434393	-4.66	-28.30
I-UDEP-19-II	595147	9438653	-4.36	-26.84
I-UDEP-20-II	594608	9439371	-3.95	-24.80
I-UDEP-22-II	592171	9439140	-4.75	-28.80
I-UDEP-23-II	595057	9430198	-4.95	-27.40
I-UDEP-25-II	594954	9428521	-4.58	-29.20
I-UDEP-26-II	592369	9431681	-4.68	-29.10
I-UDEP-27-II	592026	9431850	-5.21	-34.40
I-UDEP-29-II	590011	9433972	-4.48	-27.30
I-UDEP-31-II	588719	9434094	-4.41	-28.60
I-UDEP-35-II	585310	9438783	-4.66	-28.90
I-UDEP-37-II	588957	9436862	-4.68	-29.70
I-UDEP-39-II	591902	9433754	-4.68	-29.80
I-UDEP-40-II	591672	9434205	-4.38	-24.50
I-UDEP-41-II	603097	9436401	-4.43	-27.80
I-UDEP-42-II	603847	9435253	-5.05	-32.05
I-UDEP-43-II	601477	9436550	-4.60	-26.70
I-UDEP-44-II	600182	9436919	-5.29	-32.30
I-UDEP-45-II	598321	9436674	-5.18	-31.85
I-UDEP-46-II	596427	9435430	-5.18	-33.90
I-UDEP-47-II	598143	9436096	-4.14	-26.90
I-UDEP-48-II	597389	9436964	-5.97	
I-UDEP-49-II	596965	9437642	-4.85	-29.80
I-UDEP-50-II	594620	9434473	-5.05	-32.11
I-UDEP-51-II	594000	9452151	-4.54	-31.20
I-UDEP-52-II	593214	9451262	-5.51	-40.40
I-UDEP-53-II	593052	9449349	-5,24	-33.10
I-UDEP-54-II	592211	9448339	-3,57	-20.60
I-UDEP-55-II	592048	9448546	-4,75	-30.30
I-UDEP-56-II	593572	9446475	-4,42	-26.60
I-UDEP-57-II	589354	9442382	-3,67	-26.50
I-UDEP-58-II	590447	9443221	-4,39	-26.70
I-UDEP-59-II	596328	9440296	-5,39	-36.30
I-UDEP-60-II	593608	9436636	-4,43	-27.79
I-UDEP-61-II	592914	9439024	-5.20	-30.10
I-UDEP-62-II	593021	9440061	-5.20	-32.40
I-UDEP-64-II	591790	9438330	-4.46	-23.70
I-UDEP-65-II	591844	9438013	-4.97	
I-UDEP-66-II	592097	9437896	-4.62	-28.20
I-UDEP-67-II	596825	9421869	-5.46	-33.90
I-UDEP-68-II	598157	9421217	-4.50	
I-UDEP-69-II	598706	9418980	-5.89	-41.50
I-UDEP-70-II	605132	9404783	-6.52	-44.30
I-UDEP-71-II	603818	9409399	-6.81	-43.50
I-UDEP-72-II	605424	9409404	-4.24	
I-UDEP-74-II	611073	9423881	-4.25	-26.30
I-UDEP-77-II	608465	9422808	-4.77	
I-UDEP-78-II	604868	9421614	-4.64	-28.30
I-UDEP-79-II	603736	9421184	-4.53	-29.50
I-UDEP-80-II	587356	9448014	-4.48	-26.90
I-UDEP-81-II	585371	9447621	-4.64	-37.40
I-UDEP-82-II	584399	9447323	-4.01	-32.92
I-UDEP-83-II	586355	9446641	-5.13	-38.86
I-UDEP-84-II	587206	9440946	-5.20	-37.51
I-UDEP-85-II	592232	9449335	-4.66	-29.11
I-UDEP-86-II	602212	9437470	-4.24	-25.61
I-UDEP-87-II	602322	9437710	-4.99	-32.01
I-UDEP-88-II	615727	9426467	-4.97	-32.36
I-UDEP-89-II	616463	9425983	-4.83	-31.15
I-UDEP-90-II	617034	9424549	-4.73	-31.55
I-UDEP-91-II	615866	9423487	-4.92	-32.50
I-UDEP-92-II	614539	9423449	-5.51	-36.28
I-UDEP-93-II	614116	9422647	-4.94	-33.40
I-UDEP-94-II	593398	9444117	-5.03	-33.22
I-UDEP-96-II	642204	9392146	-4.70	-29.75
I-UDEP-97-II	641772	9412379	-5.20	-33.50
I-UDEP-98-II	614482	9420563	-5.10	-30.50
I-UDEP-99-II	606192	9422085	-5.30	-35.30
I-UDEP-100-I	597625	9435543	-2.90	-22.80
I-UDEP-104-I	589223	9441948	-5.30	-33.50
I-UDEP-107-I	589959	9447675	-4.15	-28.00
I-UDEP-109-I	606807	9436012	-4.60	-29.20
I-UDEP-110-I	603488	9433789	-4.90	-30.25
I-UDEP-111-I	605288	9445092	-4.60	-28.70
I-UDEP-112-I	601211	9441468	-4.45	-28.20
I-UDEP-113-I	591494	9438617	-4.60	-29.75
I-UDEP-114-I	598367	9431088	-5.10	-31.95
I-UDEP-115-I			-4.65	-30.10

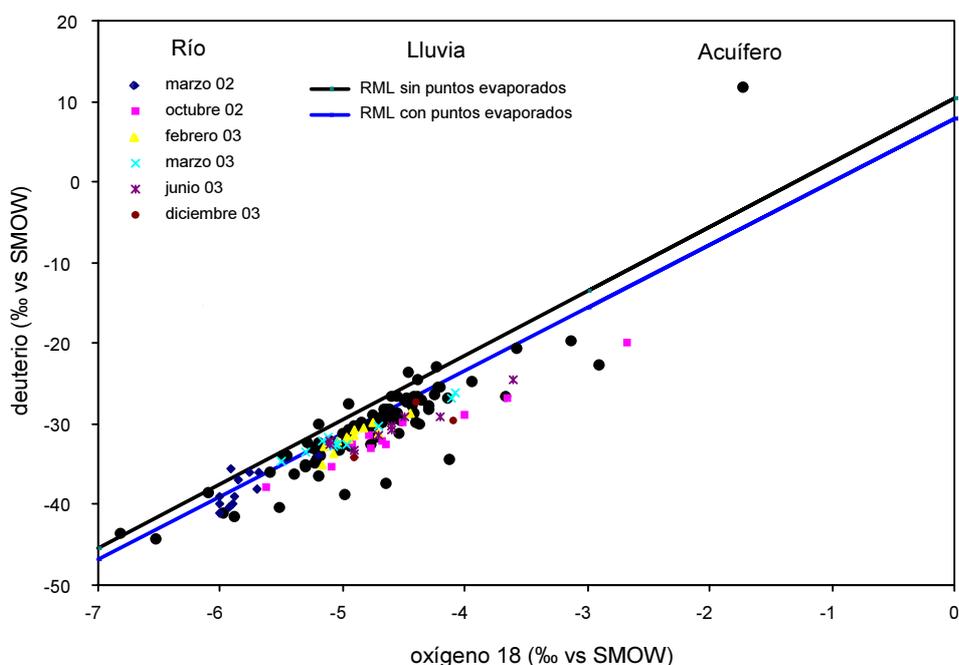


FIG. 9. Oxígeno-18 vs. deuterio, del acuífero del Alto Piura y de las aguas del río.

Con respecto a la zona de recarga, es todavía difícil de concluir. Se observó que no existe una relación confiable entre una composición isotópica teórica de la recarga y una zona altitudinal bien definida. Además, comparando los datos isotópicos de lluvia en 2002 (año muy húmedo) y 2003 (año muy seco) en la parte baja la recarga teórica pasa de -5.6‰ en oxígeno-18 a un valor de -0.6‰ (media ponderada de las estaciones de Morropón, Chulucanas y Salitral).

Si se comparan los datos isotópicos anteriores con los datos isotópicos de la zona de Tumbes, que tiene una climatología idéntica a 100 y 200 m de altura, la precipitación ponderada anual está acerca de -2‰ . Según esto, la zona de alimentación teórica de infiltración para alimentar el acuífero de Alto Piura estaría ubicada entre 500 m y 1000 m de altura.

Otro problema a resolver es el tiempo de residencia del agua, para ello se realizaron 11 análisis de tritio en el acuífero. Todos las muestras tienen valores entre 0,3 UT y 1,0 UT; es decir, un tiempo de residencia reciente (menor de 50 años). No se observa una distribución geográfica clara o relación con la dirección de flujo, excepto por el pozo 104 ubicado en la margen izquierda que presenta el valor más débil y que indica un tiempo de residencia más importante en concordancia con la dirección del flujo. Dos muestras del río fueron también analizadas en junio y diciembre del 2003 con valores de 0.9 y 1.1 UT. Esto corresponde a la temporada seca y no se puede considerar, a priori, como el valor de tritio actual en las precipitaciones. El río en esta época se abastece principalmente con la descarga del acuífero.

5. Conclusiones

Desde el punto de vista hidrológico. Las estaciones hidrométricas existentes (2) han resultado insuficientes para poder medir las entradas y salida de aguas superficial al área del acuífero, tanto desde el río principal, Piura, como desde los tributarios, Las Gallegas, Charanal, Sáncor, Yapatara, San Jorge, San Pedro y Quebrada Seca.

El patrón de lluvias en la región del Alto Piura es una concentración de precipitaciones entre enero y abril; sin embargo, los cuatro años de duración del proyecto han resultado atípicos desde el punto de vista climático: 2001 seco, 2002 húmedo, 2003-2004 en sequía progresiva. Esta situación ha dificultado la interpretación de los resultados isotópicos, lo que hace necesario prolongar el período de

estudio varios años más para poder establecer registros que permitan determinar promedios en el comportamiento del acuífero.

Desde el punto de vista hidrogeológico. El acuífero del Alto Piura es un sistema heterogéneo formado por la interdigitación de material fluvio-aluvial que genera condiciones de almacenamiento que califican este acuífero como semi-confinado.

De la correlación de los SEVs evaluados, con estratigrafías de pozos existentes en la zona se concluye que el acuífero reposa mayormente sobre macizos metamórficos y macizos ígneos (plutónicos-volcánicos).

El lado nororiental del acuífero que compromete contornos geológicos de los macizos presenta un alto grado de meteorización y fracturamiento que genera condiciones de transmisibilidad desde las partes altas y favorece la recarga. Hidrogeológicamente las condiciones del acuífero en la dirección NE mejoran, pues el sistema se hace más franco y evidente.

Así mismo, la presencia de abanicos de piedemonte en la parte NE del acuífero permite diferenciar una zona de recarga, desde los ríos que bajan desde las montañas que es la zona de transferencia, mientras que por el lado oeste es una recarga por infiltración.

La transmisividad varía desde menos de 100 a 4000 $\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$, la capacidad específica entre 2 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ y 10 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ y los caudales de producción de los pozos entre los 5 y 80 $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$.

En el lado SW del acuífero estudiado existen pozos que evidencian la presencia de un acuífero cuya conexión hidráulica con el anterior no es evidente a pesar de la dinámica señalada por las curvas equipotenciales que indicaría una continuidad entre el acuífero objetivo y el acuífero del SW. Este último posee una conductividad eléctrica elevada por encima de los 3500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Este valor elevado se justifica por la formación eólica de cobertura, de gran potencia y de condiciones salobres que inducirían por filtración un proceso de salinización.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico. Las aguas de la margen izquierda del río Piura son del tipo cloruradas-sódicas o sulfatadas-sódicas, descartándose su origen marino al no existir equilibrio entre los cloruros y el sodio presente. La conductividad eléctrica en esta zona fue superior a 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Las aguas de la margen derecha, con excepción de la parte más baja del área del acuífero, son en su mayoría del tipo bicarbonatadas-cálcicas o bicarbonatadas sódicas, manteniéndose el patrón característico de las aguas subterráneas. El calcio puede ser liberado de las plagioclasas cálcicas y pueden proceder de la alteración de piroxenos o anfíboles; el sodio, puede derivarse de la alteración de feldespatos sódicos o de las plagioclasas sódicas. Estas aguas bicarbonatadas provienen de los macizos ígneos y sus características químicas son definidas por el proceso de hidrólisis de los minerales presentes. En estas zonas, el tiempo de circulación del agua es relativamente rápido debido a la porosidad secundaria y al pequeño espesor del nivel alterado, haciendo que la carga salina se limite a bicarbonatos. Los pozos evaluados en esta zona han reportado conductividad eléctrica $<1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Se ha identificado en la parte baja de la margen derecha del río Piura, aguas de tipo cloruradas-sódicas. Estas aguas, de características semejantes a las de la margen izquierda, han circulado por el acuífero cuaternario. Su carga salina con respecto a las aguas bicarbonatadas de la parte alta y de la margen derecha de la cuenca, se ha modificado con el contacto prolongado de los depósitos cuaternarios que pueden contener sales por infiltración desde los depósitos salados, estos últimos debidos a las condiciones de aridez de la zona.

Desde el punto de vista de uso del agua -la agricultura en nuestro caso- se ha observado que la mayoría de los pozos de la margen derecha del río Piura, cercanos a los macizos y a las depresiones intramontañas, tiene calidad C2 (250-750 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) que define un agua de salinidad media; mientras

que en la parte baja de la margen derecha se presenta la clase C3 ($750-2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) que indica ser un agua de elevada salinidad. Asimismo, la margen izquierda del río Piura, por lo general, presenta calidad C4 ($> 2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), indicado ser un agua de muy alta salinidad; mientras que en la parte baja la calidad es definida como C3 ($750-2250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) indicando ser aguas de alta salinidad.

Desde el punto de vista de contaminación, el diagrama de Shoeller ha permitido identificar pozos con concentraciones de sulfatos menores a 5 mg/L. Estas condiciones pueden deberse a la presencia de materia orgánica o a la actividad bacteriana en condiciones sedimentarias. La evidencia directa de la reducción de sulfatos en los pozos identificados, es la presencia de H_2S , verificado por el olor sulfhídrico en estos pozos.

En cuanto a las características microbiológicas de las aguas subterráneas del acuífero Alto Piura, se ha utilizado como indicador bacteriano el grupo coliforme. Para su evaluación, se ha considerado los valores máximos admisibles para agua potable igual a 10 NMP/100 mL para coliformes totales (valor aceptable en una de 5 muestras evaluadas) y <3 NMP/100 mL para coliformes fecales. De los 19 pozos muestreados en dos campañas, el 47.4% presenta un incremento en el contenido de coliformes totales y el 42.1% en coliformes fecales, comparándolos con la campaña anterior. El nivel de coliformes totales, alcanzado en la última campaña, es menor e igual a 4600 NMP/100 mL, cantidad inferior a 2400000 NMP/100 mL, valor máximo alcanzado en la primera campaña. De los 62 pozos, muestreados en una sola campaña, 55.7% presentaron niveles de coliformes totales entre 15 - 2400000 NMP/100 mL. Por los resultados se puede decir que el 50% de los pozos evaluados presentan contaminación microbiológica.

Desde el punto de vista isotópico. Las características climáticas entre diciembre de 2001 y mayo de 2002 representan bien la temporada lluviosa y la composición isotópica de las lluvias de esa temporada; sin embargo, el proceso de sequía iniciado al fin de la temporada lluviosa del 2002 que se agudiza durante el 2003 y el 2004 hace imposible comparar isotópicamente la precipitación regional y la variabilidad mensual de la composición isotópica de la lluvia. Por ello no pueden considerarse estos datos como representativos de la carga anual teórica.

Se ha conseguido una recta meteórica local más conforme a la recta meteórica mundial eliminando los puntos discordantes señalados, a los que se agregan muestras del año 2004 con una marca de evaporación excesiva en meses donde la cantidad de precipitación es importante.

Se observa una gran variabilidad en la composición isotópica tanto de las lluvias, como de los ríos y de las aguas del acuífero. Los detalles han sido ya señalados en los resultados. Se ha hecho difícil por ello establecer un efecto de altura con la composición isotópica. Una alternativa para tratar de obtener una relación confiable entre composición isotópica y altura es buscar y analizar la composición isotópica de manantiales perennes.

Agradecimientos

Nuestros agradecimientos al OIEA, al Instituto Peruano de Energía Nuclear – IPEN, a la Intendencia de Recursos Hídricos – IRH- del Instituto Peruano de Recursos Naturales – INRENA- , al Instituto Nacional Geológico y Minero Metalúrgico –INGEMMET- al Instituto Regional y Apoyo para la Gestión de los Recursos Hídricos – IRAGER , al PAEN – GTZ, al Gobierno Regional de Piura, a la Junta de Usuarios del Alto Piura y al comité para la defensa del acuífero del Alto Piura, a la Universidad de Piura. Un especial agradecimiento a los expertos del OIEA, Jesse Stimson, Osamu Sususki, Ricardo Hirata, Olga de Bermoudes, Victor Heilweil, y Jean Denis Taupin. Finalmente nuestra gratitud a Laurence Gourcy y Edmundo García Agudo, Directora Técnica y Gerente de Campo del Proyecto

Bibliografía

- Bermoudes, Olga de. “*End of mission report*”. Project: Sustainable management of groundwater resources. Primera misión. Marzo 2003..
- Bermoudes, Olga de. “*End of mission report*”. Project: Sustainable management of groundwater resources. Segunda misión. Mayo 2003..
- Clark, Ian; Fritz, Peter. “*Environmental Isotopes in Hydrogeology*”. CRC press LLC.1997.
- COLPEX. “*Estudio de la determinación de la demanda insatisfecha del agua de riego en el valle viejo del Alto Piura*”; Vol I: Informe, Vol. II: Anexos y planos“.1999.
- Dirección General de Aguas y Suelos-Huacambamba. “*Inventario y monitoreo de las aguas subterráneas en el valle alto Piura*”.1999..
- Dirección General de Aguas y Suelos-Huacambamba. “*Monitoreo de las aguas subterráneas del valle Alto Piura-Huancabamba (Departamento de Piura)*”. 2000..
- Dirección General de Aguas y Suelos-Huacambamba. “*Monitoreo de las aguas subterráneas del valle Piura (Parte Alta)*”. 2001.
- Drever, James. “*The Geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments*”. 3ra Ed. Prentice, Octubre 2002.
- Fetter, C.W. “*Applied Hydrogeology*”. Ed. Prentice Hall. 4ta. Edición. 2001.
- Guzmán Martínez, Antonio. *Estudio geodinámico de la cuenca del río Piura*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – Dirección de Geotecnia, 1994.
- Hirata, Ricardo. “*Reporte de viaje a Perú*”. Proyecto: Manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos subterráneos en América Latina. 2003.
- Heilweil, Victor M. “*End of mission report on integration of hydrogeochemical and hydrogeological data*”. Project: Sustainable management of groundwater resources. Octubre 2004.
- INAF- Ministerio de Agricultura; Vol. I. “*Ampliación de la frontera agrícola por tecnificación de riego – Sub proyecto Alto Piura II – Estudio de pre factibilidad*”,1983.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET); “*Geología de los cuadrángulos de 9c a 12 e*”. *Boletín n°39 de la serie A: Carta Geológica Nacional*”.1987.
- Kendall, Carol; Mc Donell, Jeffrey. “*Isotope Tracers in catchment hydrology*”.2003.
- Ministerio de Fomento y Obras Públicas - Dirección de Irrigación - Comisión de aguas subterráneas “*Estudio hidrogeológico del Valle de Piura*” Informe sobre el inventario de pozos (fase I) y programa para la fase II”, 1968..
- PRONASTER-CORPIURA; “*Estudio hidrogeológico para el abastecimiento de agua con fines de riego en el valle del Alto Piura en la zona III (Paccha y Cruz Pampa)*”. 1989..
- Susuki, Osamu. “*Informe al término de la misión*”. Proyecto: Manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos subterráneos en América Latina. Noviembre 2004..
- Taupin, Jean Denis. “*End of mission report*”. Project: Sustainable management of groundwater resources. Febrero 2005..

Caracterización del Acuífero Zarumilla - Perú, Ecuador

**J. Otiniano^a, J. Torres^b, W. Salas^c, F. Astudillo^d, M. Leiva^e, C. Sanz^f,
J. Luna^g, J. Herbozo^h, D. Alemánⁱ, J. Carrillo^j**

^a Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes, Tumbes, Perú

^b Proyecto de Desarrollo del Sur de Ecuador, El Oro, Machala, Ecuador

^c Administración Técnica del Distrito de Riego Tumbes, Tumbes, Perú

^d Sub-administración Técnica de Aguas Zarumilla, Tumbes, Perú

^e Gobierno Regional de Tumbes, Tumbes, Perú

^f Dirección Regional de Salud, Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental
Tumbes, Perú

^g Dirección regional de Energía y Minas, Tumbes, Perú

^h Dirección Regional de Producción, Tumbes, Perú

ⁱ Empresa Municipal Fronteriza de Agua Potable y Alcantarillado de Tumbes,
Tumbes, Perú

^j Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes, Perú

Resumen. En Octubre de 1998, Perú y Ecuador, suscriben los Acuerdos de Brasilia, dando fin a una prolongada historia de diferencias, conflictos y desconfianza; de países fronterizos enfrentados militarmente, se pasa a ser socios para encarar juntos, mediante la cooperación e integración fronteriza, retos comunes de orden social y económico. En el marco antes descrito, en mayo 2001, el Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes de Perú y la Subcomisión Ecuatoriana-PREDESUR, Dirección Provincial El Oro, instituciones técnicas responsables de proyectos de desarrollo binacional, fueron invitados a participar al proyecto regional RLA/8/031. Los resultados de la primera fase del proyecto se presentan aquí. El estudio continuará dentro del marco del proyecto regional RLA/8/039 “Caracterización del acuífero Zarumilla y monitoreo de la calidad de aguas de la cuenca Puyango-Tumbes”.

Abstract. In October 1998, Peru and Ecuador signed the Brasilia Agreements on Ecuador-Peru border issues, representing the end of historical conflicts, differences and misunderstandings. The two countries became partners after years of armed conflicts, and move forward through cooperation and integration, both facing social and economic challenges. In May 2001, the Special Bi-national Project Puyango-Tumbes (Peru) and the Ecuadorian Commission PREDESUR, province of El Oro, as technical institutes in charge of projects dealing with binational development, were invited to participate in the regional project RLA/8/031. The results of the first phase of the study are presented in this document. The study will be continued under the TC project RLA/8/039 “Characterization of the Zarumilla aquifer and monitoring of water quality in the Puyango-Tumbes basin”.

1. Antecedentes y objetivos

El estudio se inició en septiembre 2001, en un ámbito donde todos los esfuerzos han estado dirigidos principalmente a estudiar el recurso hídrico superficial y el conocimiento de los acuíferos en la zona es limitado, casi inexistente. Por otra parte, los conflictos entre los sectores usuarios, debido a la falta de agua superficial durante el estiaje, ha motivado la explotación del agua subterránea para los diferentes usos, sin conocimiento del acuífero; consecuentemente, a través del estudio se pretende caracterizar el acuífero Zarumilla, para establecer el adecuado uso y manejo del recurso.

El objetivo del estudio corresponde a la caracterización del acuífero binacional Zarumilla para el establecimiento de un modelo matemático a partir de los datos generados por técnicas convencionales e isotópicas, debidamente calibrado y validado, que permita la elaboración de un plan de manejo sostenible de sus aguas.

2. Área de estudio

El área de estudio corresponde al denominado acuífero Zarumilla, se ha demarcado su ámbito sobre la base de la cuenca superficial del río Zarumilla, que involucra a dos países fronterizos, Perú y Ecuador, con una extensión de 918 km², de los cuales 374 km² corresponden a Perú y 544 km² a Ecuador, geográficamente se ubica entre las coordenadas 9°57'00" N - 9°62'00" N y 75°55'00" E - 76°20'00" E (Figura 1). Políticamente involucra en Perú a la Provincia de Zarumilla, distritos de Aguas Verdes, Zarumilla, Papayal y Matapalo. En Ecuador a la Provincia de El Oro, Cantones Huaquillas, Arenillas y Las Lajas.



FIG. 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

2.1. Climatología

El clima de la zona de estudio está influenciado por la zona de convergencia intertropical (CIT) y la corriente fría de Humboldt. Las temperaturas son moderadas a través del año, con un promedio de 25°C en las llanuras y 22°C en la zona montañosa.

El año se divide en dos estaciones; húmeda de diciembre a mayo y seca, de junio a noviembre, según como sean afectadas por el movimiento de la CIT. La extensión del área influenciada por la CIT varía de año en año. En algunos años la CIT no se aproxima suficientemente cerca de la cuenca del Zarumilla para producir precipitación tropical, resultando extensos períodos secos y la cuenca baja adquiere la apariencia de desierto; en otros años, la abundante precipitación debida a la intensa influencia de la CIT produce abundante vegetación.

El río Zarumilla se ubica en el norte del Perú y sur del Ecuador, siendo el límite fronterizo entre los dos países, hasta el sector denominado La Palma, lugar desde el cual, aguas abajo, el límite continúa por el eje del Canal Internacional.

La cuenca se origina a una altitud de 1100 m y cubre una área de 918 km²; el río Zarumilla desde la zona de confluencia de la Quebrada Balsamal con Quebrada Seca, recorre aproximadamente 59 km hasta su desembocadura al océano, es de régimen intermitente y presenta fluctuaciones extremas de 1.417 m³ s⁻¹ durante la ocurrencia del fenómeno El Niño y un caudal mínimo de 0.00 m³ s⁻¹.

2.2. Geomorfología

En el área de estudio se aprecian las siguientes estructuras geomorfológicas:

- Terrazas marinas
- Depósitos aluviales
- Depósitos aluvio-coluviales
- Depósitos marinos recientes

Las terrazas marinas, conocidas como "tablazos", son depósitos plioleístocénicos, formados por sedimentos arcillo-arenosos de color gris verdoso, bandeados, calcáreos y en muchos casos gujarrosos, incluyendo en algunos casos areniscas finas que suprayacen a las formaciones Terciarias, formando planicies topográficas sumamente disectadas. Se les encuentra dominando el resto del valle con alturas que varían entre 10 m y 20 m. sobre la superficie del terreno. Ofrecen muy pocas perspectivas como reservorios de aguas subterráneas.

Los depósitos aluviales, están conformados por los sedimentos arrastrados por el río Zarumilla durante su historia geológica. En los primeros metros se presentan arcillas arenosas de grano medio y gruesos, cambiando a arenas muy gruesa y a gravilla de cuarzo en profundidad. Puede decirse que el río ha acarreado y depositado materiales que presentan buenas características hidrogeológicas.

Los depósitos aluvio-coluviales, se encuentran en el fondo de las numerosas quebradas que drenan el área de estudio, el material es bastante diversificado en cuanto a litología, tamaño y redondez, como consecuencia del escaso transporte que han sufrido. Las observaciones de campo realizadas a lo largo de toda esta área nos demuestran la existencia de 3 etapas de depositación y posterior erosión de los sedimentos, los cuales han sido los responsables de la conformación de 3 niveles antiguos del valle, los que se clasifican en:

- Cauce Mayor
- Primera Terraza Aluvial
- Segunda Terraza Aluvial

El cauce mayor es el área por donde corre el río actualmente; en algunos tramos o ramales se encuentra seco mostrando un material mezclado formado por arenas, limos y arcillas en proporciones muy diversas y que varían notablemente de un lugar a otro. Su ancho varía por lo general entre 20 m. y 50 m., pudiéndose encontrar tramos ramificados con más de 150 m.

La primera terraza aluvial está delimitada por una escarpa cuya altura varía entre 1.80 m. y 3.50 m., conformada por sedimentos de limo en los primeros estratos, y de arena gruesa arcósica el resto.

La segunda terraza aluvial tiene una escarpa de sólo 1.50 m. en promedio y por ello es inundable en algunos sectores.

Los depósitos marinos recientes, se encuentran formando una franja que corre a lo largo de la línea costera, cuyo material consiste mayormente de depósitos recientes de arena, inundables en épocas lluviosas como consecuencia de las mareas altas.

2.3. Geología

La ubicación fronteriza del área en estudio, y la prolongada historia de conflictos, diferencias y desconfianza entre Perú y Ecuador, no permitió el desarrollo conjunto de estudios, los cuales se han desarrollado independientemente en cada país.

En el marco del proyecto RLA/8/031 se acopió la información geológica disponible en Perú y Ecuador, y se integró en el SIG, constatando que no existe compatibilidad en las unidades geológicas descritas de uno y otro lado de la frontera. Las coordinaciones realizadas con los entes rectores de la información geológica, INGEMMET en Perú y DINAGE en Ecuador, ha permitido el desarrollo del trabajo conjunto e integrar la información geológica de la zona, obteniéndose el mapa integrado (Figura 2).

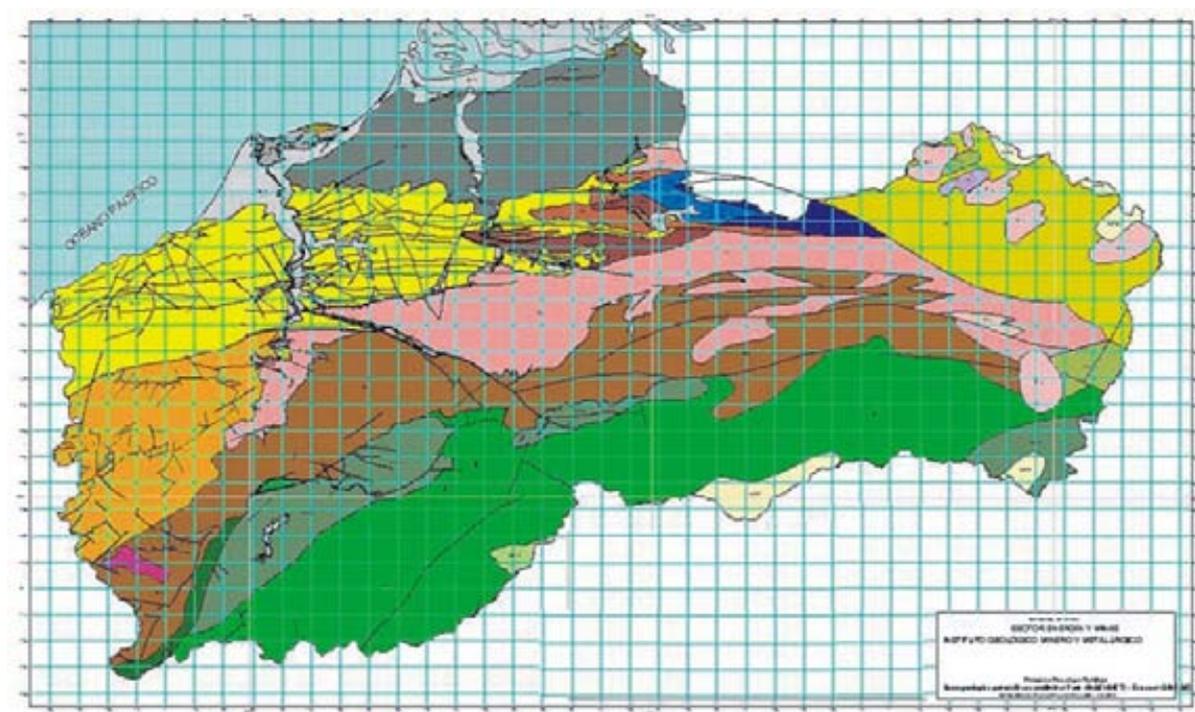


FIG. 2. Mapa geológico esquemático integrado de la zona de estudio.

3. Hidrogeología

Las principales estructuras hidrogeológicas han sido definidas partiendo de las características geológicas, litológicas y estructurales de las rocas y sedimentos que conforman el área de interés. Los macizos hidrogeológicos y cuenca artesiana de tipo litoral se caracterizan por diferentes tipos de acumulación de aguas subterráneas (porosidad secundaria y primaria) y por las condiciones hidrodinámicas. Se preparó el primer mapa hidrogeológico (Figura 3).

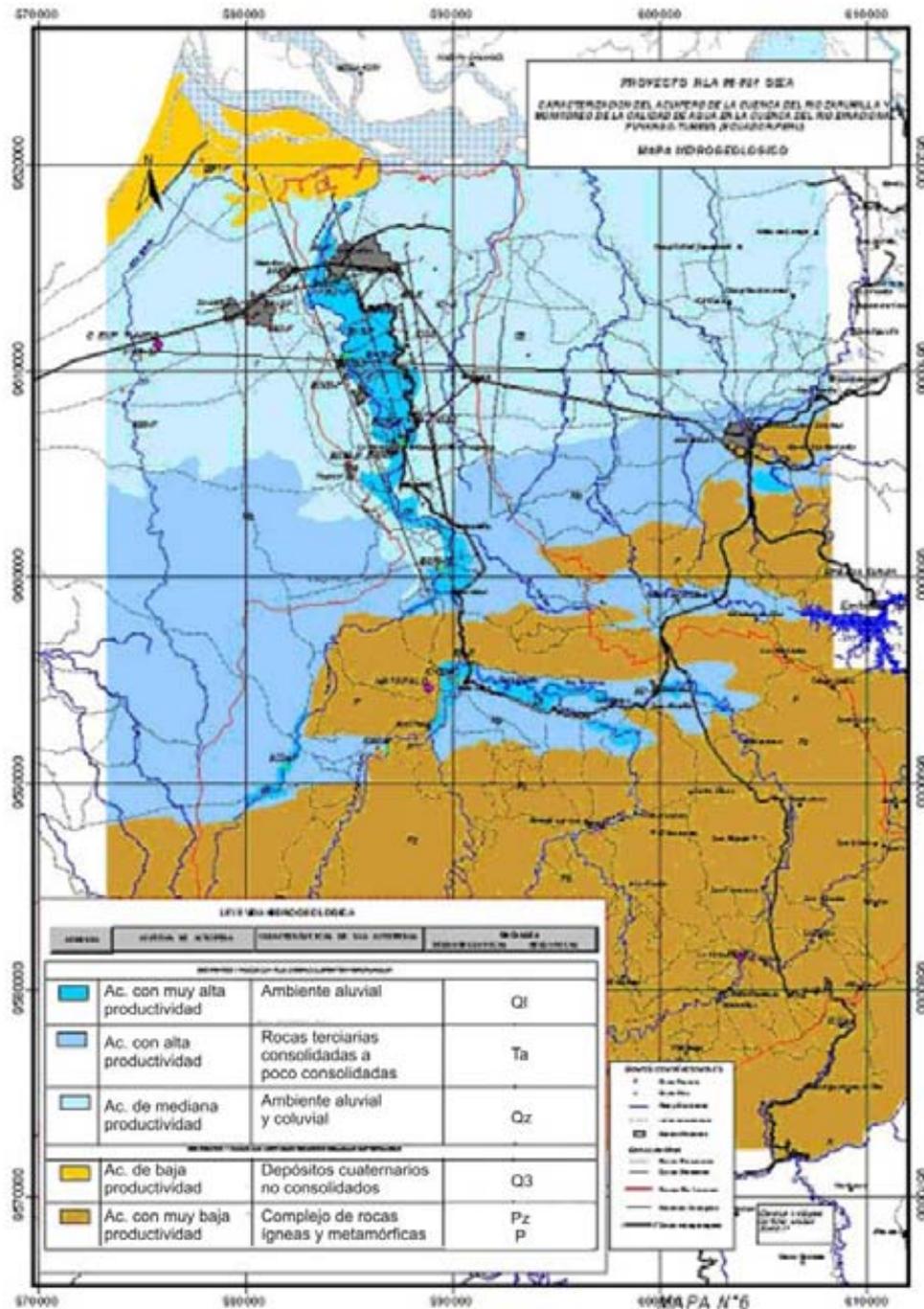


FIG. 3. Mapa hidrogeológico.

Macizos hidrogeológicos (P_ε, P_z)

Conformados por los afloramientos de las rocas ígneas intrusivas y metamórficas, meteorizadas y afectadas por fallas y fracturas, especialmente en las estribaciones próximas a la costa.

La cuenca artesiana costera ubicada a lo largo del litoral Pacífico, se extiende hasta el talud continental, por lo cual la mayor parte de ésta se encuentra sumergida bajo el nivel del mar. La cobertura de la cuenca en su parte superior está conformada por los depósitos marinos y continentales de edad Neógeno-Cuaternario (Ng-Q). Las rocas de Precámbrico y Paleozoico Superior que limitan al sur los afloramientos de los depósitos de la cobertura, posiblemente representan el piso de la cuenca artesiana (esta aseveración aún no ha sido confirmada).

Dentro de la cobertura de la cuenca se han diferenciado varias unidades con grado de interés hidrogeológico. Debido a la poca información, esta diferenciación se basó principalmente en el origen y las características litológicas de los depósitos, su extensión y productividad.

— *Acuífero del cauce aluvial (Q₁)*

Está asociado a los depósitos de los cauces aluviales antiguos y actuales del río Zarumilla y sus afluentes. El reservorio está conformado por gravas y sedimentos predominantemente arenosos que decrecen en tamaño desde las partes altas de las cuencas fluviales hacia sus partes bajas, donde el predominio es de arenas arcillosas y limos. El espesor máximo de estos depósitos no supera los primeros 10-15 m.

En la cuenca del río Zarumilla este acuífero es explotado mediante los pozos de tajo abierto, con una extracción total alrededor de 11.5 millones de m³·año⁻¹. El acuífero presenta buenas características hidrogeológicas. Según varias fuentes su transmisividad varía de 150 a 500 m²·día⁻¹, la capacidad específica entre 2 y 8 l·s⁻¹·m⁻¹ y los caudales de producción entre los 5 y 20 l·s⁻¹.

— *Acuífero de los depósitos aluviales (Q₂)*

Estos depósitos de origen fluvial conforman una cobertura de gran extensión a lo largo de los valles inferiores del río Zarumilla y otras quebradas que bajan de la Cordillera Occidental. Afloran en alturas menores de 50 m y están compuestos por fragmentos de roca, gravas, arenas de diferente tamaño y arcillas. En términos generales poseen una buena permeabilidad primaria. No obstante, a causa de sus génesis, condiciones y ambiente de depositación, estos sedimentos no constituyen estratos continuos, sino generalmente presentan estructura lenticular y en algunos lugares son laminados, por lo cual conforman un sistema acuífero multicapa. De acuerdo con la información disponible se puede decir que este acuífero es de tipo semiconfinado a confinado. Su espesor es variable, con base en el análisis de las columnas litológicas disponibles, algunos sondeos eléctricos verticales (SEVs) y los cortes, se estima un espesor máximo de 30-40 m; sin embargo, con el estudio de prospección geofísica realizado por el IRH-Perú y la información acopiada recientemente en Ecuador, se validará o corregirá esta interpretación inicial.

Partiendo del espesor estimado del acuífero y teniendo como único dato la profundidad de los pozos, se puede deducir que su producción es de alrededor de los 10 l·s⁻¹ y el agua del acuífero es dulce a salobre, su salinidad aumenta hacia el litoral.

— *Depósitos litorales recientes (Q₃)*

En esta unidad se agrupan los depósitos de playa y los depósitos estuarinos. A pesar de ser constituidos por materiales granulares, su permeabilidad es baja debido a su composición limo-arcillosa. Se encuentran en la zona litoral afectada por las mareas y expuesta a las inundaciones, contienen agua salina, por lo cual se consideran de poco interés económico.

— *Complejo acuífero de los depósitos neógenos (Ng)*

Los sedimentos que componen este complejo acuífero están expuestos a la superficie en forma alargada desde las cotas de 50 msnm, hasta los macizos hidrogeológicos. Este complejo acuífero está

conformado por una secuencia alternada de conglomerados, areniscas, cuarzosas de diferente tamaño, lutitas, además se presentan concreciones calcáreas y capas de yeso. La complejidad tectónica del área que se evidencia por fallas normales y de rumbo, ha ocasionado el desplazamiento, levantamiento y/o descenso entre los bloques, provocando la discontinuidad de estos estratos. Su espesor es desconocido. En gran parte del área se ha detectado el macizo en la zona alta (Sector de Lechugal y Pueblo Nuevo, sobre los 50 msnm) a 150 y 20 m de profundidad.

Las areniscas y conglomerados poseen buenas características para almacenamiento y flujo de aguas subterráneas conformando el acuífero confinado multicapa.

En el territorio peruano, se ha estimado la recarga proveniente de la precipitación, considerando una superficie útil para la infiltración de 100 km², cuyo valor obtenido para un año medio sería del orden de 20 millones de m³. Las explotaciones actuales del acuífero no superan los 5 millones de m³.

4. Redes de muestreo y monitoreo

Iniciado el estudio se estableció la red de monitoreo para el desarrollo de las observaciones, mediciones y análisis de las variables de interés para la caracterización del acuífero Zarumilla. Se utilizaron los pozos existentes. En la medida que se avanzó en el desarrollo del estudio se han realizado los ajustes correspondientes de tal manera que a la fecha se dispone de tres redes de monitoreo, la red de piezometría, la de hidrogeoquímica y la red de isotopía.

Considerando que el estudio involucra a dos países, la tarea inicial para el establecimiento de la red de monitoreo, correspondió a estandarizar la codificación de cada uno de los puntos de red. Se tomó como base los planos existentes del ámbito de estudio, elaborados por el IGN en Perú y el IGM en Ecuador.

4.1. Redes establecidas

Con la información acopiada, el plano hidrogeológico elaborado y el apoyo de los expertos del OIEA se realizaron los ajustes a las redes de monitoreo establecidas para el estudio, las mismas que a la fecha corresponden a:

4.1.1. Red isotópica

El contenido isotópico y químico de las aguas permiten tener un mejor conocimiento sobre el patrón de flujo del agua subterránea, permitiendo distinguir los procesos de recarga y mezcla de aguas de diferente calidad, lo cual contribuye al conocimiento de la hidrogeología del acuífero. La red considera puntos para la toma de aguas subterráneas, superficiales y de lluvia.

(a) **Agua subterránea.** El rasgo fundamental definido, es el relativo a la identificación de 4 unidades hidrogeológicas principales, de las cuales dos corresponden a acuíferos de interés, uno es un acuífero salobre y el cuarto corresponde a la roca impermeable.

Los puntos de muestreo seleccionados siguen el siguiente criterio: En el sector alto, se trata de identificar la recarga más importante al acuífero principal y en el sector entre Papayal y Huaquillas (zona donde hay la mayor cantidad de pozos), las muestras pretenden caracterizar las aguas subterráneas de los diferentes acuíferos y verificar los procesos de recarga del río Zarumilla y mezcla de aguas de los dos acuíferos. En la zona más próxima al continente, se busca conocer el efecto de la intrusión marina. Desde el inicio del estudio, hasta la fecha (2002-2004) se ha considerado un total de 30 pozos para la determinación de ¹⁸O y ²H, totalizándose 92 muestras analizadas, en un total de 5 campañas.

(b) **Aguas superficiales.** Es indudable que la fuente principal de recarga del acuífero es el río Zarumilla y sus afluentes, sin embargo, dada la disposición de los estratos acuíferos, es importante conocer el mecanismo de este proceso de recarga. Con el objeto de caracterizar isotópicamente el río

Zarumilla y sus afluentes, se realizaron 4 campañas y se seleccionaron 8 puntos de muestreo, habiéndose realizado un total de 15 análisis.

(c) *Aguas de lluvia*. El criterio para seleccionar las estaciones ha sido, su distribución dentro del área del proyecto, desnivel respecto al mar, fácil accesibilidad y existencia de observador permanente. De esta forma se busca caracterizar las precipitaciones y definir la recta meteórica local, también con ello.

Para el estudio se seleccionaron 6 estaciones de muestreo de lluvias, 2 en el Perú y 4 en Ecuador y se totalizaron 22 muestras entre los años 2003 y 2004.

4.1.2. *Red hidrogeoquímica*

La red de hidrogeoquímica, hasta la fecha, ha sido coincidente con la red de agua subterránea utilizada para isotopía. Se sometieron al análisis hidrogeoquímico a un total de 55 muestras de agua subterránea. La red de agua superficial se conforma por 6 puntos ubicados desde las nacientes del río hasta su desembocadura, incluyendo los afluentes principales.

4.1.3. *Red piezométrica*

Está conformada por 21 pozos, los mismos que corresponden a los diferentes acuíferos identificados, estos pozos han sido debidamente georeferenciados y nivelados.

5. **Hidrogeoquímica**

Para los efectos de evaluación se están considerando los análisis obtenidos en las campañas de estiaje 2002 y 2003. La información correspondiente al año 2004 (período de avenidas) se encuentra en la fase de obtención de resultados para su procesamiento posterior (retrazos de carácter administrativos).

Durante el año 2002 se analizaron 14 muestras de aguas subterráneas y 6 muestras de aguas superficiales. Se observó que los análisis presentan errores analíticos aceptables. Se determinó la predominancia de aguas del tipo cloruradas sódicas en pozos mayores de 80 m, mostrando además una reducción de sulfatos y un intercambio iónico de sodio por calcio y magnesio (Figura 4). Se deduce que se está produciendo un ablandamiento y hasta el momento se descarta la posibilidad de intrusión marina en el ámbito de estudio.

Respecto de la alta conductividad eléctrica observada y el contenido de Na y Cl predominante, se debe al origen marino de los sedimentos que conforman los acuíferos de la zona de estudio. Así mismo, los resultados obtenidos en el acuífero superficial Q1 muestran una tendencia al tipo bicarbonatada sódica.

Para el año 2003, pese a tener varias muestras con errores analíticos altos (entre 7% y 20%), los resultados ratifican la caracterización química de la campaña de noviembre 2002. En el caso de los pozos profundos, mayores de 50 m, ubicados en el Neógeno, predomina el tipo de agua clorurada sódica. Sin embargo, los pozos IE1-E y ICI-E, ubicados en la parte alta de la cuenca, con profundidades de 50 m, presentan una caracterización del tipo bicarbonatada sódica como consecuencia del tiempo de contacto que tiene el agua con el material del acuífero, así como por la poca evolución química existente.

Es necesario precisar que los pozos someros, ubicados en el acuífero superficial Q1, mantienen la caracterización del tipo bicarbonatada sódica.

Al analizar las curvas de isoconductividad de noviembre 2002, se observa una concentración alta alrededor del pozo IB300-P (Figura 5), en la parte baja de la cuenca y contrastando con las curvas de noviembre 2003, que involucra a mayor número de pozos en la parte alta, se observa otro punto de concentración alrededor del pozo IDI-E (Figura 6). Las curvas de isosodio e isocloro de los años 2002 y 2003, muestran un patrón de comportamiento similar respecto a la ubicación de los puntos de alta concentración.

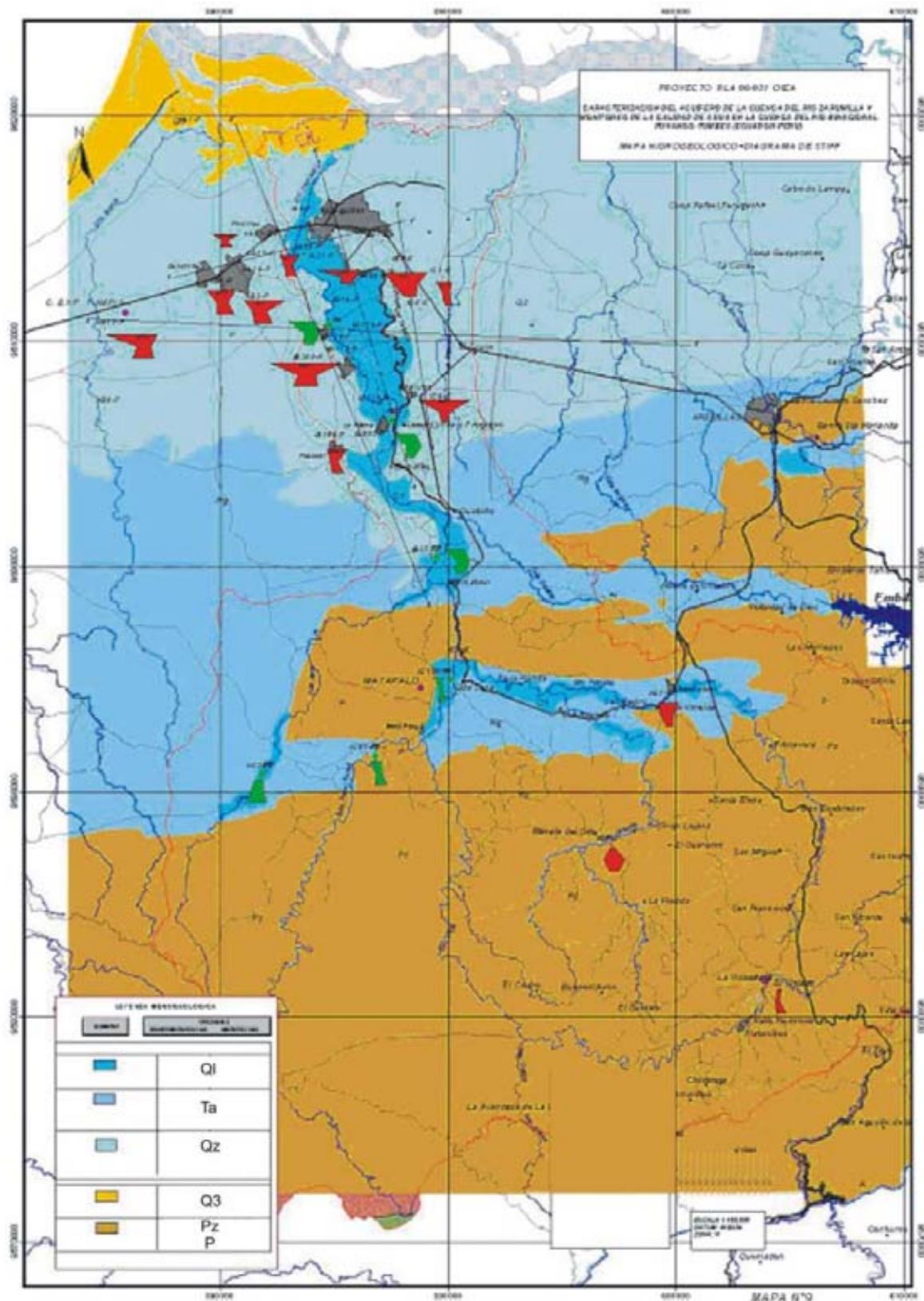


FIG. 4. Mapa hidrogeológico – Diagrama de Stiff.

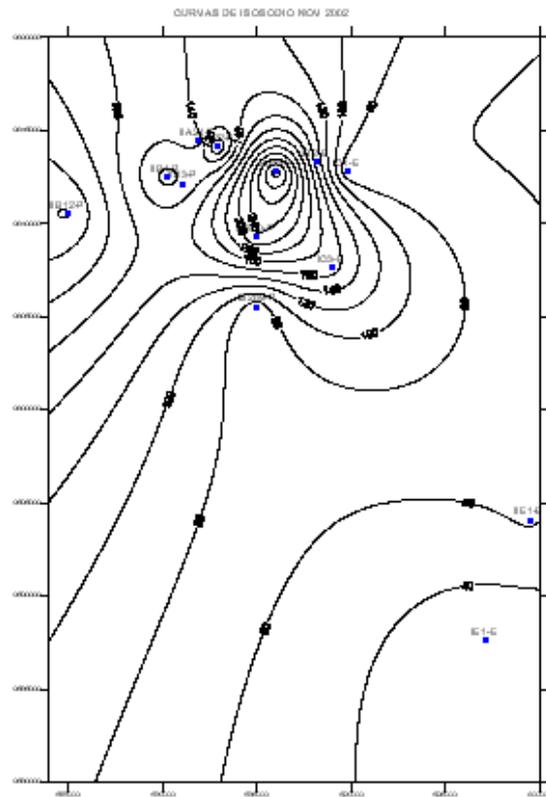


FIG. 5. Mapa de Isoconductividades en Noviembre de 2002.

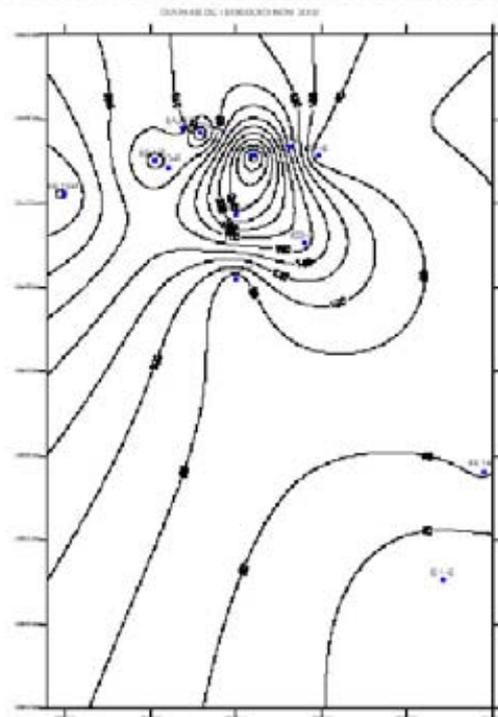


FIG. 6. Mapa de isoconductividades en Noviembre de 2003.

6. Isotopia

6.1. Contenido isotópico de la lluvia y recta meteórica local

La recta meteórica local, se ha obtenido con los resultados de las muestras de agua de lluvia colectada en los años 2003 y 2004 en las estaciones Sabadel, San Lorenzo, Paccha y La Victoria ubicadas en Ecuador; Matapalo y Tumpis ubicadas en Perú, habiéndose obtenido la siguiente ecuación para la Recta Meteórica Local (RML): $\delta^2\text{H} = 7.77 \delta^{18}\text{O} + 11.05$ (Figura 7).

Analizando la situación de cada estación meteorológica y las posibles zonas de recarga de los acuíferos, se puede advertir que algunas de las estaciones en Ecuador, resultan muy alejadas del área del proyecto y que el patrón de las isoyetas en esos lugares es diferente, al que se observa en la cuenca del río Zarumilla.



FIG. 7. Recta meteorológica local.

6.2. Contenido isotópico de las aguas superficiales

Solamente las campañas de muestreo de los ríos de noviembre 2002 y abril 2003 fueron relativamente completas. En la Figura 8, se puede comprobar que las aguas de los afluentes de la parte alta, no muestran evaporación, aún en la época de estiaje y que durante el período de crecidas no muestran diferencias entre las aguas del sector alto con las cercanas a la desembocadura. Las otras muestras dieron un carácter evaporado fuerte siguiendo la ecuación $\delta^2\text{H} = 4.17 \delta^{18}\text{O} - 6.33$.

Aun cuando el número de muestras y su sistematización no son suficientes. El contenido isotópico corresponde a un promedio de las lluvias que caen en la parte alta e intermedia de la cuenca y son aguas cuyo contenido de $\delta^{18}\text{O}$ varía entre -3‰ y -5‰ (Figura 8).

6.3. Contenido isotópico del agua subterránea.

Las aguas subterráneas, muestran un comportamiento isotópico bastante definido. Las aguas pertenecientes al acuífero freático, conectado al río Zarumilla difieren de las aguas de los acuíferos más profundos. Esto ya había sido observado anteriormente [2].

La Figura 9 representa las aguas subterráneas de abril 2003, en ellas se advierte claramente esta separación entre acuífero superficial y profundo. Con mayor elaboración se muestra en la Figura 10, donde se ha representado todos los análisis realizados a la fecha (93) tomadas en 30 pozos y en 5 campañas de muestreo. Los pozos someros, localizados en el acuífero freático, tienen un contenido de $\delta^{18}\text{O}$ comprendido entre -3.5‰ y -5.5‰, en cambio las aguas de los pozos profundos varían entre -1.1‰ y -3.1‰.

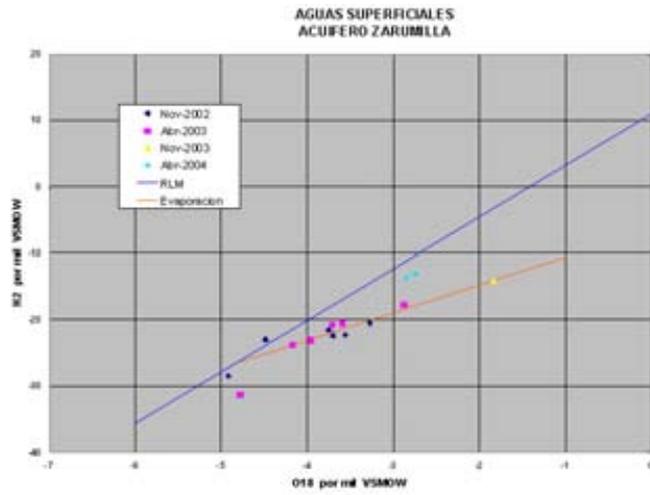


FIG. 8. Comportamiento isotópico de las aguas superficiales.

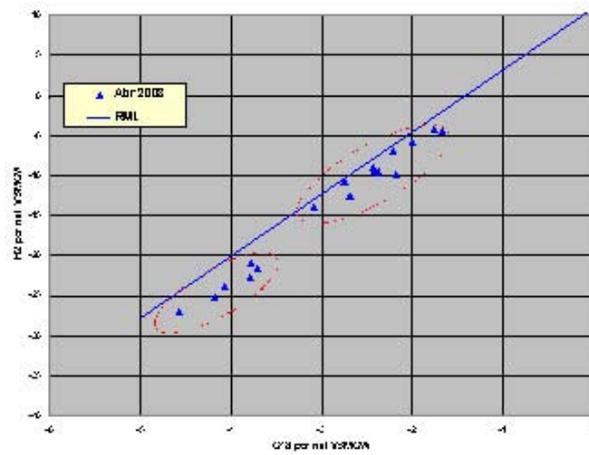


FIG. 9. Comportamiento isotópico de las aguas subterráneas abril 2003.

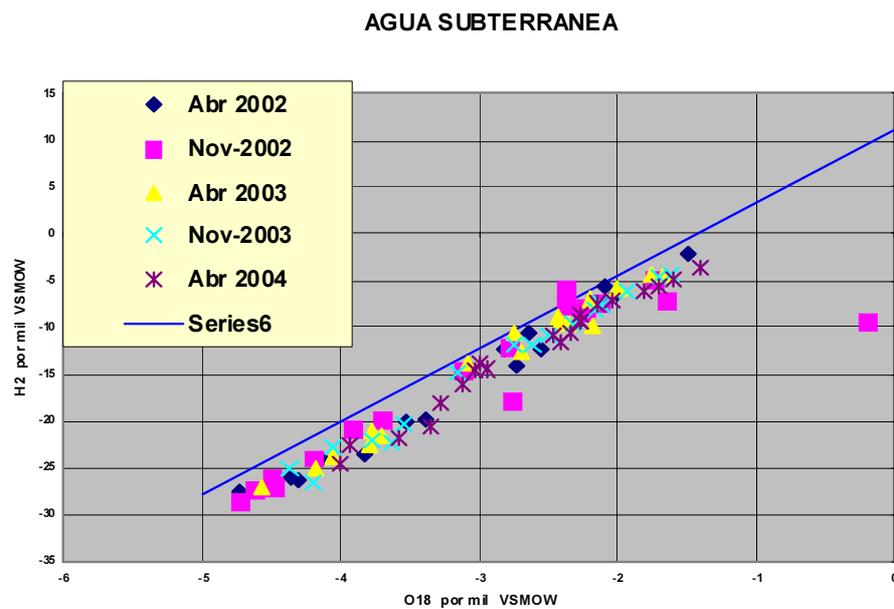


FIG. 10. Comportamiento isotópico de las aguas subterráneas.

En los pozos con varias muestras, se optó por tomar un promedio de los valores para aquellos que son similares, en los otros con mucha disparidad, se consideró los valores menos evaporados, confeccionándose la Figura 11. Los datos se relacionaron con la RML.

De su análisis se puede separar las aguas de los pozos profundos en tres grupos: P1, P2 y P3, y en los pozos someros, propios de acuífero freático se distinguen 2 grupos S1 y S2.

— del acuífero superficial

Dentro de los pozos someros, el grupo S1 representa el acuífero freático del río Zarumilla. Las aguas que muestran mayor evaporación. El lecho del río tiene una gradiente pequeña en el sector bajo del valle y debe existir alimentación al río con aguas de retorno de riego que son evaporadas. El grupo S2 corresponde al acuífero freático de las quebradas afluentes.

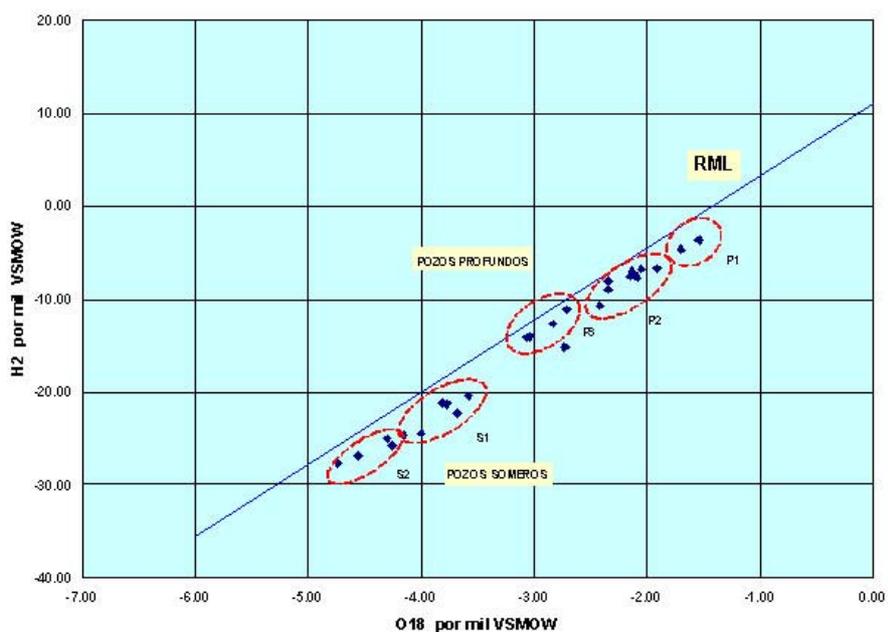


FIG. 11. Grupos de acuíferos someros y profundos

— del acuífero profundo

Las aguas de los pozos profundos se han dividido en tres grupos. El grupo de aguas señaladas con P1, provienen de pozos habilitados entre 150 y 180 m de profundidad, es decir los pozos más profundos de la zona o área de estudio.

El grupo P2 esta conformado por los pozos profundos habilitados entre 60 y 120 m y constituyen la mayor parte de los pozos profundos.

Desde el punto de vista lógico las aguas más profundas deberían estar relacionadas con zonas de recarga localizadas a mayor altitud o más antiguas con contenido isotópico diferente. Sin embargo, en este caso nos encontramos frente a aguas de precipitaciones actuales que caen a una altitud alrededor de los 50 m.

Con el objeto de aclarar sobre las zonas de recarga se elaboró la Figura 12, donde a las muestras de agua subterránea se le agregaron los análisis isotópicos del río, quebradas afluentes y precipitaciones del 2004.

CONTENIDO ISOTOPICO ACUIFERO ZARUMILLA

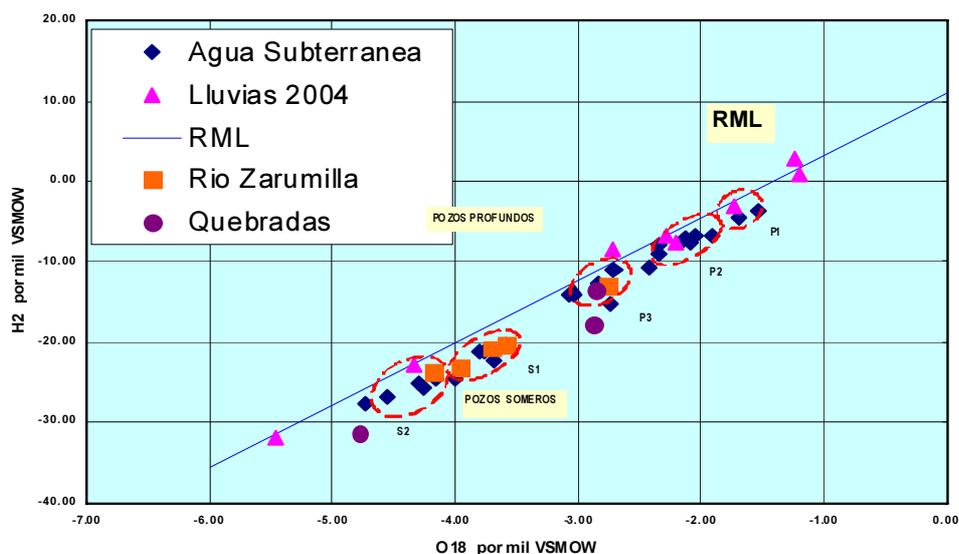


FIG. 12. Comportamiento isotópico de aguas subterráneas, superficiales y de lluvia.

7. Modelo hidrogeológico conceptual

7.1. Aspectos fisiográficos del área de interés hidrogeológico

El área en estudio, geográficamente comprende la cuenca del río Zarumilla que nace en la Cordillera de Tahuín en el territorio ecuatoriano, continúa al norte representando el límite entre Perú y Ecuador hasta su desembocadura al océano. Este río es de carácter intermitente, con descargas significativas durante el período de diciembre a mayo, permaneciendo el resto del año con un pequeño caudal o casi seco. En el período húmedo presenta frecuentes crecidas causando inundaciones y destruyendo infraestructura productiva.

El relieve del área está representado por la llanura costera y una cadena de colinas y montañas orientadas en dirección NE-SW. Las alturas varían desde los 800 m.s.n.m. hasta el nivel del mar. Dentro de la llanura costera las variaciones topográficas no superan los 100 m, siendo en su gran parte bastante plana con alturas menores de 50 m.s.n.m.

La mayor parte del área es árida y semiárida. Hacia las partes altas de la cuenca el clima se hace paulatinamente más húmedo, registrando hasta los 1200 mm anuales en las zonas más altas en el sector ecuatoriano. En general la precipitación anual es menor en la parte peruana. Su variación interanual es muy importante, con períodos de sequía muy pronunciados. Normalmente se presenta un período húmedo, que produce más del 85% de la precipitación anual desde el mes de diciembre y hasta mayo, y un período seco que dura el resto del año. Se han presentado años totalmente sin lluvia (como el año 1968) y otros de alta precipitación como las ocurridas en los años del fenómeno meteorológico "El Niño" 1983, 1997 y 1998.

7.2. Consideraciones hidrogeológicas

Partiendo de las características geológicas, litológicas y estructurales de las rocas y sedimentos que conforman el área de interés, han sido definidas las principales estructuras hidrogeológicas representadas por macizos hidrogeológicos y cuenca artesiana de tipo litoral que se caracterizan por diferentes tipos de acumulación de aguas subterráneas (porosidad secundaria y primaria) y por las condiciones hidrodinámicas.

7.2.1. Macizos hidrogeológicos ($P \in, Pz$)

Los macizos hidrogeológicos están conformados por afloramientos de rocas ígneas intrusivas y metamórficas, todas estas rocas están meteorizadas y afectadas por fallas y fracturas, especialmente en las estribaciones próximas a la costa, dentro de estas estructuras normalmente pueden presentarse tres tipos de escorrentía de origen subterráneo: subsuperficial (un desagüe cercano a la superficie), aguas freáticas de fisura y aguas de fisura a presión.

El flujo subsuperficial suele estar asociado a la cobertura del suelo y/o a la zona de aireación y como regla general, se encuentra hidráulicamente separado de la zona saturada. Este tiene carácter cíclico e intermitente, su duración y volumen están condicionados por la cantidad de agua precipitada, las propiedades del suelo, tipo de vegetación y declive del terreno. Estos flujos se concentran en las depresiones del relieve formando corrientes, las cuales a medida que van acercándose al pie de las vertientes pueden unirse con aguas superficiales o freáticas de los depósitos no consolidados que se encuentran a lo largo de los cursos de aguas.

Las aguas freáticas de fisura se forman en la zona de meteorización de las vertientes y en los bordes de los valles fluviales. Este tipo de escorrentía se observa durante todo el año, no obstante sus recursos suelen disminuir en los períodos de ausencia de lluvia. La existencia de la cobertura cuaternaria, las características de la zona de meteorización y el tipo de vegetación y suelo, condicionan las particularidades del régimen de aguas freáticas de fisura. La variación máxima de sus niveles se observa en las zonas cercanas a las divisorias de aguas superficiales, donde las aguas de fisura pueden desaparecer en los períodos prolongados de sequía. El desagüe permanente de las aguas freáticas de fisura se inicia en los nacimientos de las corrientes superficiales con caudales desde menos de un litro a 1-3 l/seg y puede seguir aumentando hacia la parte baja de las vertientes hasta decenas de l/seg. En esta zona, con saturación permanente, se observa la regulación y estabilización del flujo de aguas freáticas de fisura, lo cual se manifiesta en la poca variación de sus caudales y niveles.

Las aguas de fisura a presión están asociadas a las zonas de fisuración tectónica y litogénica regional y local, donde se forman potentes corrientes subterráneas con régimen estable. La mejor evidencia de este tipo de aguas, es la presencia de las fuentes de aguas termominerales.

Hasta el momento, la zona de interés no cuenta con datos sobre las aguas subterráneas de los macizos; sin embargo, la presencia de las corrientes superficiales permanentes (únicamente hacia los fines de los años secos dejan de correr las quebradas en la parte ecuatoriana) y la similitud de las condiciones climáticas y geológicas con otras regiones permite presumir su existencia. Su potencialidad posiblemente no es significativa con fines de explotación, no obstante puede tener importancia en la recarga adicional lateral hacia la cuenca artesiana.

7.2.2. Cuenca artesiana de tipo litoral

La cuenca artesiana costera ubicada a lo largo del litoral Pacífico, se extiende hasta el talud continental, por lo cual la mayor parte de ésta se encuentra sumergida bajo el nivel del mar. Las rocas del Precámbrico y Paleozoico Superior que limitan al sur los afloramientos de los depósitos de la cobertura, posiblemente representan el piso de la cuenca artesiana. A diferencia de los macizos hidrogeológicos, donde el flujo del agua corresponde al medio fracturado, en una cuenca artesiana el almacenamiento y el movimiento del agua corresponde al medio poroso.

— Acuífero del Cauce Aluvial (Q_1)

Este acuífero contiene aguas sin presión con una superficie libre y mantiene comunicación directa con la atmósfera. En algunas zonas puede presentarse cobertura limo-arcillosa limitada en su extensión, por lo cual las aguas pueden adquirir presión local poco importante. Su nivel de agua en condiciones naturales está sometido a fluctuaciones sistemáticas que pueden presentarse durante el día, en el año o entre varios años, por lo cual su espesor saturado es variable. Una particularidad muy importante de este acuífero es su relación hidráulica directa con el río.

La zona de recarga de este acuífero coincide con su extensión. En la parte baja de la cuenca del río Zarumilla ésta se produce por infiltración directa de las aguas del río, canales de irrigación y áreas de cultivo (eficiencia del riego entre 30% y 40%). A pesar de que no se descarta la recarga por la infiltración de aguas lluvias, ésta debe ser limitada, debido a la poca extensión areal del acuífero y la baja precipitación en esta zona. En los valles de los afluentes del río Zarumilla, la recarga es debido a la infiltración de sus aguas y a la precipitación local.

El agua de este acuífero se encuentra continuamente en movimiento bajo la influencia de la fuerza de gravedad hacia las zonas de descarga como son: el océano, que es el drenaje principal de las aguas subterráneas en el área, algunos tramos del río y zonas de descarga lateral al Acuífero de los Depósitos Aluviales. En los períodos, cuando los niveles del acuífero son muy altos, éstos pueden ser interceptados en las depresiones del terreno, haciendo aflorar las aguas y perder su cantidad por evaporación que bajo las condiciones áridas de la zona debe ser significativa.

Generalmente el agua de este acuífero es dulce, no obstante, la alta evaporación y poca profundidad del nivel freático contribuyen a la formación de acumulaciones de sal en la zona no saturada lo cual aumenta su mineralización. Estas aguas son fácilmente accesibles para el uso práctico, pero debido a que se encuentran a poca profundidad, son muy vulnerables a la contaminación.

— Acuífero de los Depósitos Aluviales (Q₂)

La recarga de este sistema acuífero puede tener diferentes fuentes: infiltración de las precipitaciones y aguas superficiales (en las zonas de inundación), aporte adicional desde las unidades acuíferas adyacentes a través de las "ventanas hidrogeológicas", además infiltración en las áreas de riego.

Teniendo en cuenta las particularidades en la depositación de los sedimentos que conforman este sistema acuífero, su parte superficial generalmente es limo-arcillosa, por lo cual su área de recarga por precipitación podría ser limitada. Además esta recarga debe ser restringida debido a la escasa precipitación que se presenta en esta zona. De igual manera, la recarga en las áreas de riego y de inundación está condicionada por la litología superficial y adicionalmente por el carácter temporal de las crecientes.

— Depósitos litorales recientes (Q₃)

Corresponde a los depósitos de playa y los depósitos estuarinos, su permeabilidad es baja debido a su composición limo-arcillosa. Se encuentran en la zona litoral afectada por las mareas y expuesta a las inundaciones, contienen agua salina.

— Complejo acuífero de los Depósitos Neógenos (Ng)

La principal fuente de alimentación de este acuífero es la infiltración de las precipitaciones y en menor proporción las aguas que llevan las corrientes superficiales que cruzan su superficie. En las vertientes de los macizos hidrogeológicos se generan flujos subsuperficiales temporales, los cuales al llegar al pie de los mismos pueden ser absorbidos por los sedimentos permeables favoreciendo la recarga adicional lateral. Los ejemplos a nivel mundial demuestran la importancia de este tipo de recarga, la cual en condiciones geológicas e hidrológicas favorables, puede aportar hasta un 60-70% de los recursos de aguas subterráneas.

El flujo regional de agua subterránea está dirigido hacia el océano, adicionalmente pueden existir flujos de carácter ascendente, que se generan debido a las diferencias topográficas entre la parte inferior del valle y las zonas de recarga, lo cual es corroborado con los niveles piezométricos de los pozos que captan este complejo acuífero.

Dentro de las unidades hidrogeológicas consideradas, este acuífero según sus características hidrogeológicas, es el que debe tenerse en cuenta para el caso de una creciente demanda del uso de aguas subterráneas en el valle del río Zarumilla, a pesar de que su aprovechamiento implique perforar a mayores profundidades. Lo anterior no reduce la importancia del Acuífero del Cauce Aluvial; sin

embargo, su poca capacidad de almacenamiento y su susceptibilidad a la contaminación lo hace menos promisorio.

8. Avances en el modelo matemático

El modelo matemático preliminar se viene desarrollando con el software Visual MODFLOW versión 3.1. De acuerdo con los resultados iniciales, se tiene como información que el área a modelar considera dos capas: Depósitos aluviales Q_1 - Q_2 de pozos someros y depósitos neógenos N_g de pozos profundos, con malla cuyas grillas se definieron de 200 m por 200 m.

8.1. Límites

Los límites en superficie son: por el norte, el Océano Pacífico, por el Oeste en Perú la quebrada Grande que separa la zona de riego con explotación de agua superficial de la explotación subterránea, por el Este en Ecuador con la Quebrada Barbasco, por el Sur esta definido básicamente por la existencia de datos de niveles piezométricos en pozos de la red de monitoreo.

La topografía de superficie, inicialmente se ha definido con los niveles de los pozos de la red de monitoreo y otros puntos de control establecidos por el IGN.

El fondo de la capa superficial y profunda se estimó entre 30 y 180 m. de profundidad respectivamente considerando la configuración de superficie. Esto debido a que no se tiene precisión en el conocimiento de las profundidades de los estratos; situación que se corregirá con la reinterpretación del estudio geofísico y litología de pozos.

8.2. Condiciones de borde

En la parte baja se definió como condición de borde el valor cero para ambas capas, que es el nivel del mar en el Océano Pacífico, y en la parte alta esta dada por los valores 22.4 msnm para la capa superficial y 9 msnm para la capa profunda, ambos valores definidos por el nivel piezométrico de pozos y gradiente longitudinal, respectivamente.

8.3. Recarga

Se estimó en forma global con los siguientes datos:

- Serie histórica de caudales del Río Zarumilla medidos en la parte baja de la zona a modelar.
- Datos de caudales estimados generados en el estudio hidrológico de la cuenca del río Zarumilla en punto denominado Palmales, parte alta de área a modelar.
- Serie Histórica de precipitaciones, estaciones Tumpis , Papayal y Matapalo.

8.4. Parametros hidrogeológicos

Con base en los datos de pruebas de bombeo realizadas durante la etapa de desarrollo en algunos pozos de la red de monitoreo y de acuerdo al plano hidrogeológico se estimaron zonas de transmisividad y conductividad.

8.5. Calibración

Se consideraron los niveles piezométricos de pozos someros y profundos para las capas 1 y 2 respectivamente; información levantada durante la etapa de monitoreo.

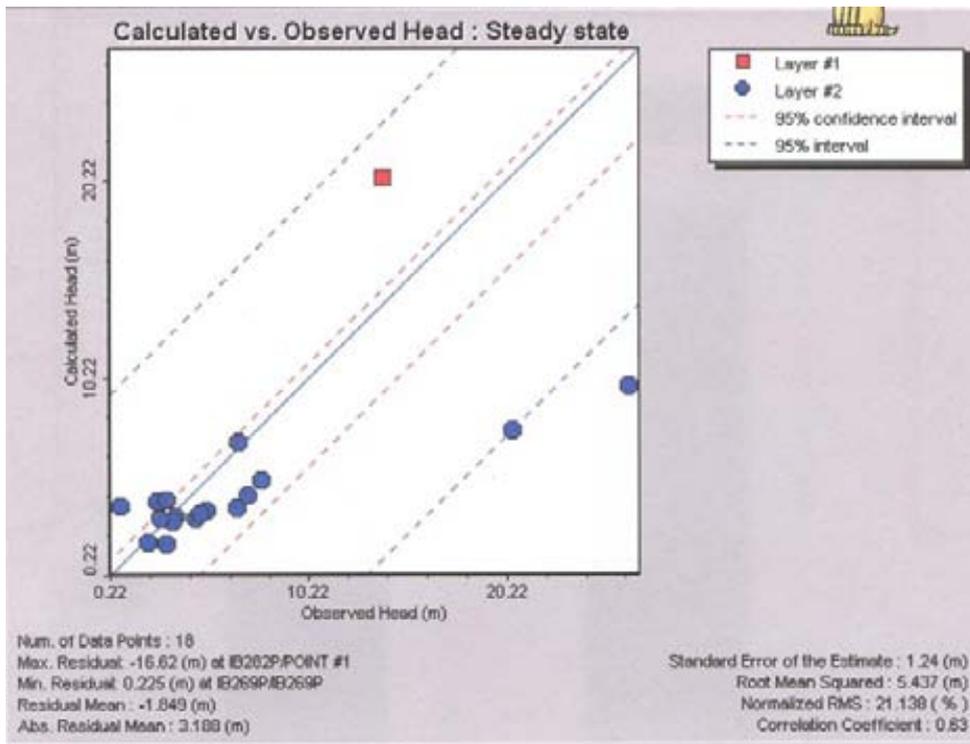


FIG. 13 Calibración en régimen permanente.

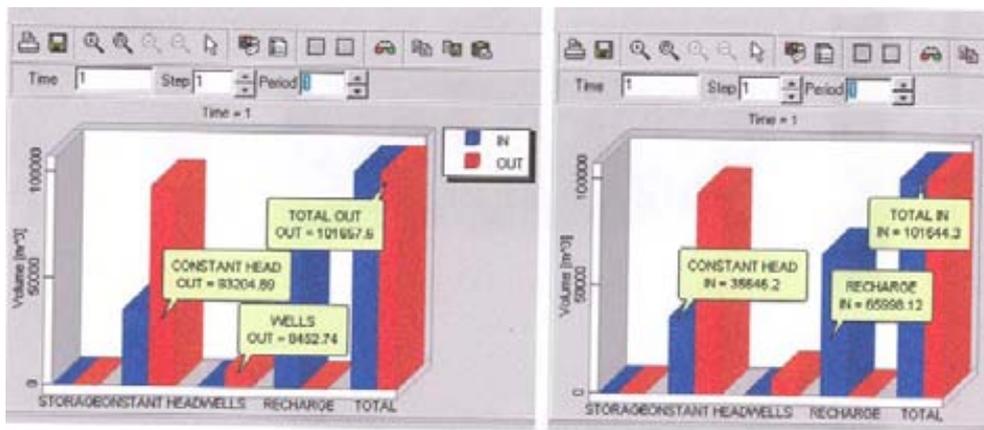


FIG. 14 Balance de flujo

8.6. Actividades pendientes del modelo

- Ajuste del modelo preliminar elaborado, con la información obtenida del relieve topográfico, configuración del fondo de las capa 1 y 2.
- Evaluación de la recarga y descarga del acuífero, para lo cual se cuenta con información histórica del régimen de explotación y niveles de pozos, medidos por IRHS en Perú y la Empresa de agua potable en Ecuador. También se complementará con las mediciones de descargas en los lugares de interés del río Zarumilla y Canal Internacional.
- Verificación y validación de los parámetros hidrodinámicos existentes, así como las pruebas de bombeo a implementarse durante las siguientes campañas.
- Ajuste y calibración del modelo en régimen transiente y luego la validación correspondiente.

9. Actividades desarrolladas y futuras

Las actividades desarrolladas corresponden a:

- Conformación de equipo de trabajo binacional, integrado por los diferentes sectores involucrados en el uso y manejo del agua subterránea.

Por Perú: Proyecto Especial Binacional Puyango Tumbes, Administración Técnica del Distrito de Riego Tumbes, Sub Administración Técnica del Sub Distrito de Riego Zarumilla, Dirección Regional de Energía y Minas, Dirección Regional de Salud, Dirección Regional de Producción, Empresa Municipal de Agua Potable Tumbes, Universidad Nacional de Tumbes, Gobierno Regional de Tumbes, Instituto Peruano de Energía Nuclear.

Por Ecuador: Sub Comisión Ecuatoriana PREDESUR. El Oro, Gobierno Provincial Autónomo de El Oro, Municipio de Arenillas, Municipio de Huaquillas, Corporación Regional de Desarrollo de El Oro, Consejo Nacional de Recursos Hídricos - Agencia Machala, Brigada de Infantería N° 1 El Oro.

- Recopilación y sistematización de la información básica disponible en los diferentes sectores estatales y privados.
- Establecimiento de las redes de monitoreo y levantamiento de la información de campo (inventario, georreferenciación de pozos profundos, nivelación y caracterización físico-química).
- Integración de la información geológica de la zona fronteriza, para lo cual se contó con el apoyo de INGEMMET-Perú y DINAGE-Ecuador.
- Elaboración del primer mapa hidrogeológico y caracterización hidrogeoquímica del área de estudio.
- Mejoramiento de la capacidad instalada de las instituciones involucradas en el estudio, para lo cual se ha recepcionado del OIEA softwares, equipos de laboratorio y de campo que se vienen utilizando en el desarrollo del estudio.
- Muestreo, análisis, interpretación hidrogeoquímica e isotópica en las campañas de los años 2002, 2003 y 2004.
- Preparación del modelo conceptual del acuífero.
- Capacitación de profesionales responsables del estudio, a través de seminarios, talleres y cursos internacionales auspiciados por el OIEA.

Las actividades pendientes son:

- Terminar la georreferenciación y nivelación de pozos de la red final de monitoreo.
- Reajustar la red de monitoreo, de acuerdo con las recomendaciones de los expertos.
- Realizar aforos en el río Zarumilla y sus afluentes para el balance de aguas del sistema y precisar la recarga y descarga.
- Reinterpretación de la información geofísica, con base en la información acopiada.
- Desarrollo de las campañas de muestreo para determinaciones químicas y análisis de isótopos.
- Revisión y ajuste del modelo conceptual establecido.
- Elaboración del primer modelo matemático. Revisión y ajuste.
- Revisión y complementación de la información referente a geofísica, geología, calidad de agua, e incorporación al modelo matemático.

10. Conclusiones

Se ha elaborado el primer modelo hidrogeológico conceptual del área binacional Zarumilla, que comprende 918 kilómetros cuadrados. Se han podido determinar al menos dos acuíferos de interés, conformados principalmente por sedimentos del Cuaternario y rocas semiconsolidadas del Terciario. Los resultados químicos e isotópicos preliminares sugieren que la principal fuente de recarga de los acuíferos es el río Zarumilla, aunque se observan diferencias isotópicas entre aguas poco profundas (con conexión al río) y aguas profundas. Estas diferencias deben estudiarse con más detenimiento. Los datos preliminares sugieren que no hay procesos actuales importantes de intrusión marina.

El estudio que se viene realizando en el Acuífero Zarumilla, es el primero que se realiza en la zona, su avance, ha logrado el desarrollo de importantes actividades bilaterales y el interés de las autoridades locales y la disposición del equipo de profesionales para continuar con el estudio.

Con el objeto de continuar las actividades pendientes y lograr la elaboración de un plan de manejo sustentable del acuífero Zarumilla, que incluya condiciones de explotación, prevención de su contaminación y programa periódico de monitoreo, Perú y Ecuador han elevado a los organismos coordinadores nacionales, la solicitud de Proyecto en el marco del Programa de Cooperación Técnica del OIEA para el período 2005 - 2006, se espera contar con la aprobación correspondiente para la prosecución del estudio.

REFERENCIAS

- [1] Informe Anual Septiembre 2003 - Noviembre 2004, Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes - Proyecto de Desarrollo del Sur de Ecuador, Noviembre 2004
- [2] Araguás, L. Informe final del proyecto PER/8/005 (1992) OIEA, Viena

Gestión Sostenible del Acuífero Raigón, Uruguay

M. Postiglione^a, L. Batista^a, D. Costa^a, R. Chao^a, J. Gorfain^a,
J. Ledesma^a, F. Perez^a, A. Sordo^a, D. Vignale^b, R. Carrión^c,
E. Masa^c, S. Pena^c, M. Stapff^c, J. Bico^d, R. Caristo^e, P. Decoud^c,
M. Teresa Roma^c, R. Guerequiz^f, J. Montañó^f, E. Peel^f

^aDirección Nacional de Hidrografía - MTOP

^bDirección Nacional de Medio Ambiente – M.V.O.T.M.A.

^cDirección Nacional de Minería y Geología – M.I.E.M.

^dDirección General de Recursos Naturales Renovables – M.G.A.P.

^eObras Sanitarias del Estado – O.S.E.

^fFacultad de Ciencias

Resumen. El Proyecto IAEA-RLA/8/031, tiene por objeto obtener el Plan de Gestión de las aguas subterráneas en el Acuífero Raigón que permita la utilización sostenible del recurso con la participación efectiva de todos los usuarios y actores. Este ha sido llevado a cabo por un conjunto multidisciplinario de técnicos pertenecientes a siete instituciones públicas reunidas en el marco del Proyecto, quienes han aplicado tanto técnicas convencionales como isotópicas y con el apoyo del IAEA. Se logró un modelo conceptual, contrastado mediante herramientas hidrogeoquímicas y se está elaborando un modelo numérico.

Abstract. The IAEA project RLA/8/031, aimed at obtaining a Groundwater Management Plan for the Raigón Aquifer for the sustainable use of this resource with the effective participation of all users and actors. This project was carried out by a multidisciplinary team composed of technicians belonging to seven public institutions. Isotope techniques, as well as classical methods, were used. A conceptual model was developed and validated by means of hydrogeochemical tools. A numerical model is being elaborated.

1. Introducción

1.1. *Justificación y problemática*

En el Uruguay, así como en el resto de América Latina, la preocupación por el manejo adecuado de las aguas subterráneas es un tema reciente. Las aguas superficiales han sido siempre el punto central de atención de los gobiernos. Sin embargo, los índices crecientes de su contaminación, el aumento de la demanda y los conflictos por su uso, obligan a considerar las aguas subterráneas como una alternativa para los diferentes métodos de abastecimiento. El Sistema Acuífero Raigón (SAR), es un recurso estratégico para el país ya que de él dependen, como única fuente de agua, el abastecimiento público, riego, industria y el consumo agropecuario, en el área de su influencia. Hasta el presente no se disponía de un Plan de Gestión de las aguas subterráneas que permitiera la utilización sostenible de un recurso de múltiples usos.

1.2. *Objetivos específicos*

Para alcanzar el objetivo general “Formular un Plan de Gestión de las aguas subterráneas en el acuífero Raigón que permita la gestión y administración de las mismas con la participación efectiva de todos los usuarios y actores.”, se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- Obtener un conocimiento técnico-científico y comprensión cabal de los distintos factores que intervienen en la cantidad y calidad de los recursos hídricos subterráneos y disponer de un conocimiento actualizado de los usos efectivos.
- Establecer normas técnicas para alcanzar a través del marco legal de regulación, el respaldo a las acciones destinadas a la gestión sustentable del recurso. A esos efectos se ha elaborado y está vigente una Norma Técnica de construcción de Pozos Perforados para Captación de Aguas Subterráneas (Decreto 86/04) reglamentando el artículo 46 del Código de Aguas (1978).
- Disponer de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico del acuífero y de la capacitación profesional, para su operación y manejo.
- Lograr la participación efectiva de las instituciones involucradas y de los usuarios en la gestión del acuífero.

Se aplicaron técnicas de determinación de δD y $\delta^{18}O$ para establecer relaciones entre aguas subterráneas y aguas superficiales, tritio para la datación y tiempo de tránsito del agua, ^{14}C para datación, ^{15}N para la determinación del origen de los nitratos y gases nobles complementando la datación y origen del agua.

El coordinador del proyecto fue la Dirección Nacional de Hidrografía – M.T.O.P. Las otras contrapartes fueron la Dirección Nacional de Medio Ambiente – M.V.O.T.M.A., Dirección Nacional de Minería y Geología – M.I.E.M., Dirección General de Recursos Naturales Renovables – M.G.A.P., Obras Sanitarias del Estado, Facultad de Ciencias.

2. Marco general del estudio

2.1. Localización, hidrometeorología, geología

El acuífero Raigón está ubicado al sur del departamento de San José, tiene costas sobre el Río de la Plata y limita con la capital del país. Abarca una superficie aproximada de 1800 km², sobre la cual se asienta una población de más de 50000 habitantes dedicados en su mayoría a la actividad agropecuaria e industrial.

El clima es templado con una temperatura media anual de 17 °C, moderadamente lluvioso con una precipitación anual del orden de los 1000 mm.

La región se encuentra ubicada en el sistema estructural del graben o fosa del Santa Lucía que comprende una superficie de 10500 km², extendiéndose en gran parte del departamento de Canelones, el borde sudoccidental de Lavalleja y Sur de San José, y que además, continúa en la plataforma continental. Esta cubeta estructural se implanta a partir del Jurásico Superior. La definen como un rift abortado ("failed rift") que se desarrolló sobre un área cratónica [1]. Presenta una geometría alargada de 150 km de largo por 45 km de ancho, con más de 2000 m de profundidad y una dirección ENE-WSW.

El área del sistema acuífero comprende gran parte de la sección occidental de este graben, según confirman datos de perforaciones y geofísicos. Por ejemplo, en la perforación de Rincón de la Bolsa, el zócalo se encuentra a una profundidad de 800 m y el relleno - en más de un 80% - está constituido por depósitos sedimentarios detríticos vinculados a un sistema depositacional, fluvial proximal y lacustrino, asociados estrechamente con el hundimiento del graben.

2.2. Hidrogeología

En este proyecto se convino denominar Sistema Acuífero Raigón (SAR) al conjunto sedimentario que se desarrolla en la región, teniendo como piso las formaciones Camacho o Fray Bentos y como techo las formaciones Libertad o Dolores, cuando estas existen.

La formación Raigón es la unidad portadora por excelencia del sistema acuífero. Está constituida por areniscas finas a gruesas, conglomerados y niveles arcillosos; tratándose de un acuífero sedimentario de porosidad primaria. Su espesor alcanza los 17 metros en la región norte en tanto que, en la depresión del sur, varía entre 35 y 12 metros. Ha sido definido como del tipo multicapa, interrelacionadas a su vez entre sí, variando desde libre a semi confinado, puesto que en un 80% del área está cubierto por la formación Libertad, que está constituida por sedimentos de origen eólico, cuyo espesor varía entre 2 y 20 metros. Los estudios geológicos y la investigación hidrogeológica han permitido identificar a la Formación Chuy como vinculada a este sistema.

El sistema se subdivide en dos regiones separadas por el entalle del río San José, el que marcaría una discontinuidad hidráulica, según se discute al exponer la interpretación de la piezometría.

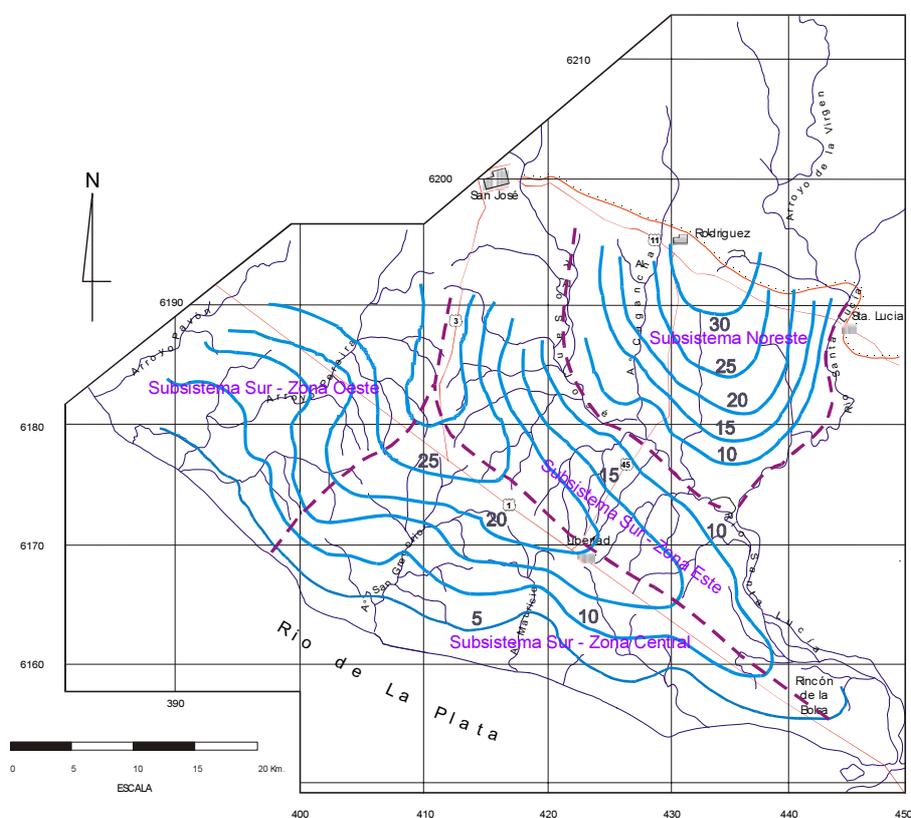


FIG. 1. Piezometría del SAR – Año 1996.

Sub-sistema Noreste: limitado por los ríos Santa Lucía al Este, San José al Oeste y Sur y al Norte por afloramientos del cristalino. Las transmisividades varían en el orden de los $300 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, el coeficiente de almacenamiento se puede estimar en el orden de 1×10^{-3} , y los gradientes hidráulicos tienen una media de 0.003, con diferencias de niveles de alrededor de los 2 metros en promedio, presentando una respuesta rápida a las precipitaciones.

Sub-sistema Sur: ocupa un área de 1400 km^2 , sus límites están dados por los ríos Santa Lucía, San José, Río de la Plata, arroyo Pavón. En el área comprendida entre el arolo Pavón y el San José ocurre la desaparición de los niveles más permeables de la unidad Raigón.

En cuando a la hidráulica de esta área, debido a su amplitud se pueden distinguir tres zonas, las que se describen a continuación:

- Zona Oeste: tiene como eje y área de descarga el arroyo Pereira, los gradientes varían entre 0.002 y 0.006, con una media de 0.003. La transmisividad está en el orden de los $300 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ y el coeficiente de almacenamiento en torno a 3×10^{-2} .
- Zona Central: limita con la anterior al Oeste y se extiende hasta el empalme de las rutas 3 y 1 y Playa Pascual. Esta es la zona del acuífero de mayor extracción de aguas para riego y donde se obtienen los caudales máximos, coincidiendo con los mayores espesores de la formación Raigón. Los gradientes hidráulicos determinados para esta zona varían entre 0.001 y 0.004. La transmisividad media es del orden de los $600 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ y coeficiente de almacenamiento en torno a 1×10^{-4} .
- Zona Este: se ubica entre las anteriores, y los ríos San José y Santa Lucía cuyos cursos drenan el acuífero directamente o a través de sus afluentes. Los gradientes se encuentran entre 0.002 y 0.004. La transmisividad está en el entorno de los $300 \text{ m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ y el coeficiente de almacenamiento en 1×10^{-4} .

3. Enfoque metodológico

La aplicación de las técnicas isotópicas en este caso es un ejemplo claro del aporte que éstas representan al conocimiento de la dinámica del agua en el acuífero, para resolver problemas tales como el origen de la recarga, la velocidad de infiltración, el vínculo hidráulico entre las formaciones Raigón y Chuy, la determinación de la velocidad de flujo, la determinación de si es un solo sistema hidráulico total o las capas tiene diferente presión y hay circulación vertical. Estos mismos resultados no serían posible obtenerse con los métodos convencionales.

Los estudios que se llevaron a cabo permitieron caracterizar hidrogeoquímicamente el agua del acuífero, comprobando la existencia de más de un tipo de agua - tanto en el sentido vertical como horizontal del acuífero - y detectando anomalías notables en la calidad del agua. Estos estudios permitirían asimismo clasificar los tipos de agua para diferentes usos, y podrían eventualmente aportar información que fuera utilizada para la modelación del acuífero y su gestión posterior.

4. Resultados

4.1. Hidroquímica

El proyecto RLA/8/031 incluye los resultados del proyecto precedente, URU/8/012, realizado por el IAEA y OSE como contraparte Nacional.

Los puntos de muestreo del proyecto se seleccionaron en función de la existencia de información en cantidad y calidad aceptable sobre dichas perforaciones.

4.1.1. Red de monitoreo hidroquímico e isotópico

4.1.2. Clasificación de las aguas

Se analizaron datos de 441 muestras correspondientes a la totalidad de las campañas efectuadas. Las variaciones no fueron significativas en el estudio de series temporales por parámetro.

El análisis estadístico de información química se realizó utilizando los diagramas de Piper, Schoeller-Berkaloff y Stiff. Así mismo, se estudió la relación roca - agua subterránea con el fin de determinar las causas de las diferentes clases de agua que fueron detectadas en el SAR. También se estudiaron las anomalías en la calidad del agua subterránea debidas a causas naturales o antrópicas.

A partir del análisis del diagrama de Piper las aguas se clasifican en general como bicarbonatadas sódicas (Figura 3).



FIG. 2. Puntos de muestreo.

TABLA 1. DETALLE DE LAS CAMPAÑAS DE CAMPO EFECTUADAS

Campaña	Fecha	Perforaciones	Superficiales	Total	Hidroquímico	Isotópico
1	4/2000	18	6	24	Si	Si
2	5/2000	18	0	18	Si	Si
3	6/2000	20	5	25	Si	No
4	7/2000	27	0	27	Si	Si
5	9/2000	27	7	34	Si	No
6	11/2000	107	0	107	Si ^a	No
7	12/2000	109	7	116	Si ^a	No
8	10/2002	25	0	25	Si	No
9	5/2001	9	0	9	Si	No
10	6/2003	25	0	25	Si	Si
12	11/2003	22	0	22	Si	No

^a Solamente se tomaron mediciones de temperatura y conductividad específica

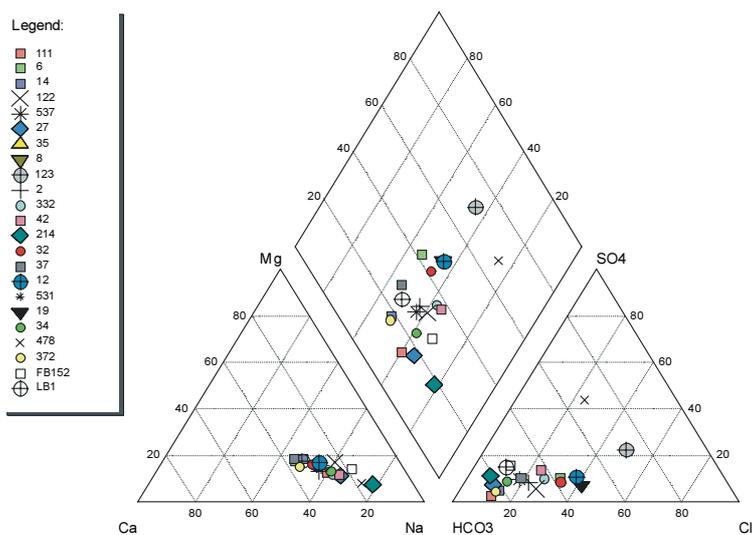


FIG. 3. Diagrama de Piper correspondiente a la campaña 12.

De acuerdo a los diagramas de Stiff se puede observar que hay cuatro clases de aguas. La división es la siguiente:

Clase 1: Agua HCO₃ – Na – Ca,

Clase 2: Agua HCO₃ – Na,

Clase 3: Agua HCO₃ - Cl – Na – Ca, y

Clase 4: Agua HCO₃ – Na (Fm. Chuy)

De acuerdo al diseño de los diagramas de Schoeller se agruparon las muestras que presentaban iguales características, separándose las aguas del SAR en cinco subclases (ver Figura 4).

Se estudió estadísticamente, mediante el método Kolmogorov – Smirnov la posible existencia de una diferenciación estadísticamente significativa entre las clases definidas anteriormente. Los resultados del test son concluyentes en establecer que efectivamente existen 2 clases diferentes de agua que se corresponden con el acuífero Raigón y el acuífero Chuy respectivamente.

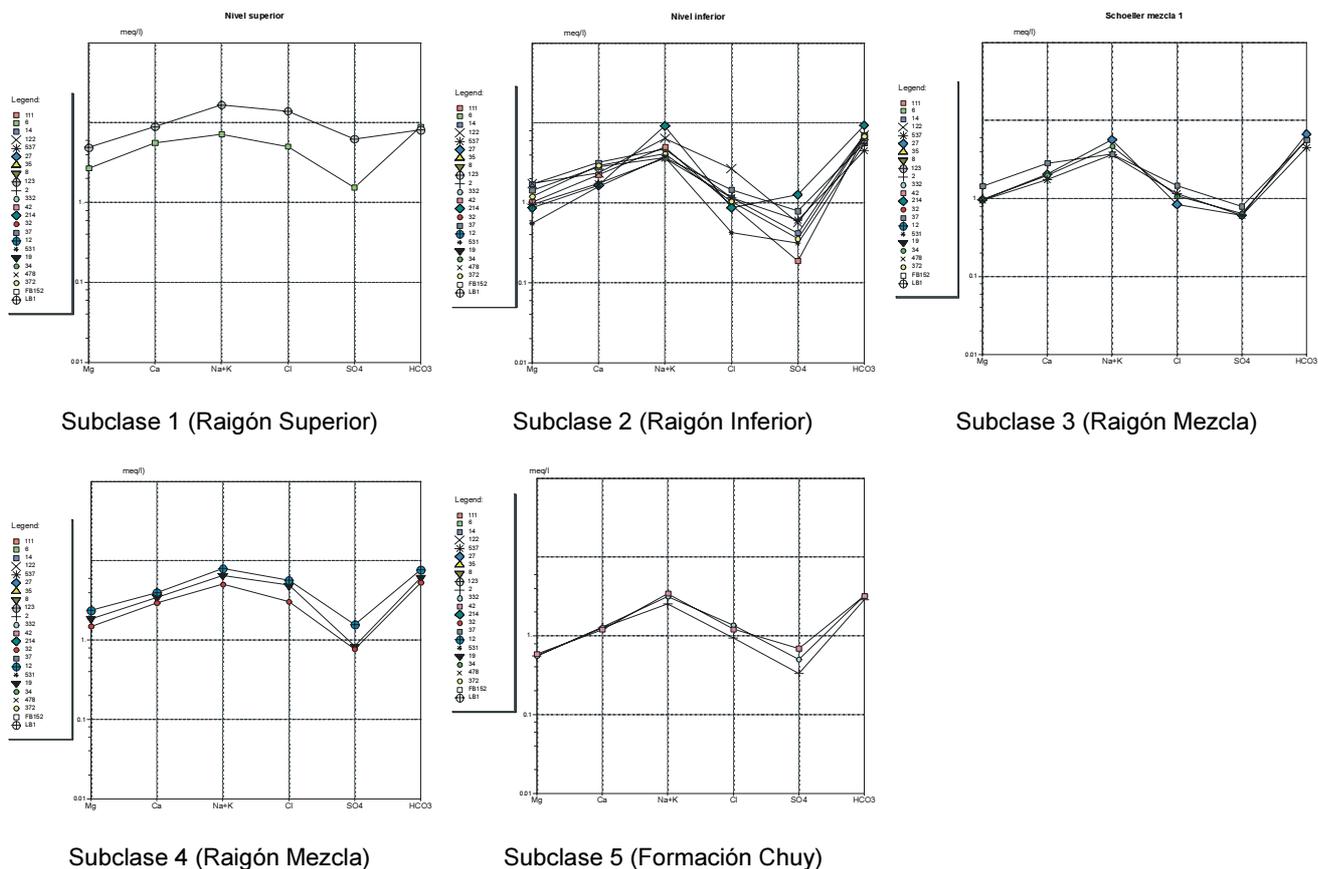


FIG. 4. Diagramas de Schoeller-Berkaloff.

4.1.3. Identificación zonal basada en conductividad específica y geología de superficie

Utilizando los datos de conductividad eléctrica de la totalidad de los pozos disponibles (138 perforaciones), y correlacionando estos datos con la geología de superficie se logró identificar 15 zonas disímiles entre sí, como se indica en la Figura 5.

4.2. Isotopía

El presente proyecto incluye a las determinaciones realizadas durante los años 2000 – 2004 [4] [5] en el marco del proyecto del IAEA URU/8/012.

Todos los datos isotópicos que han podido identificarse del sistema acuífero Raigón - Chuy provienen del agua de 43 pozos y 4 cursos de aguas superficiales (ver Figura 6).

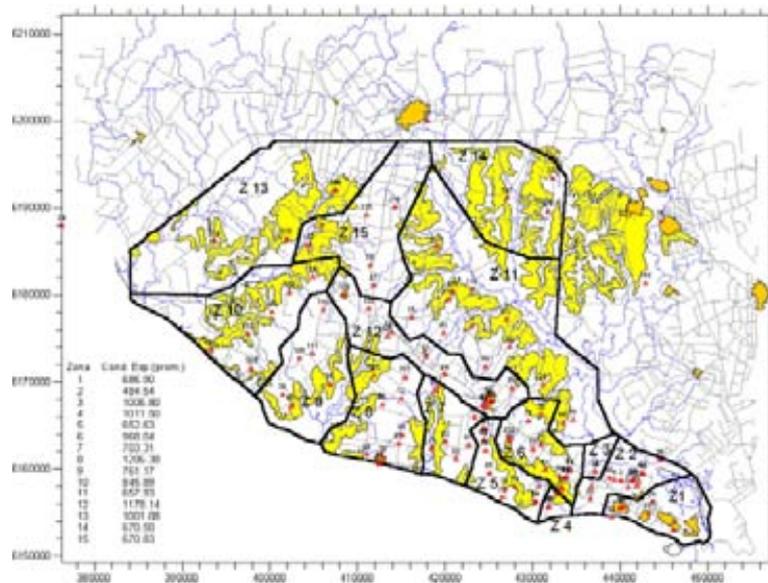


FIG. 5. Clasificación basándose en la conductividad específica y geología superficial.

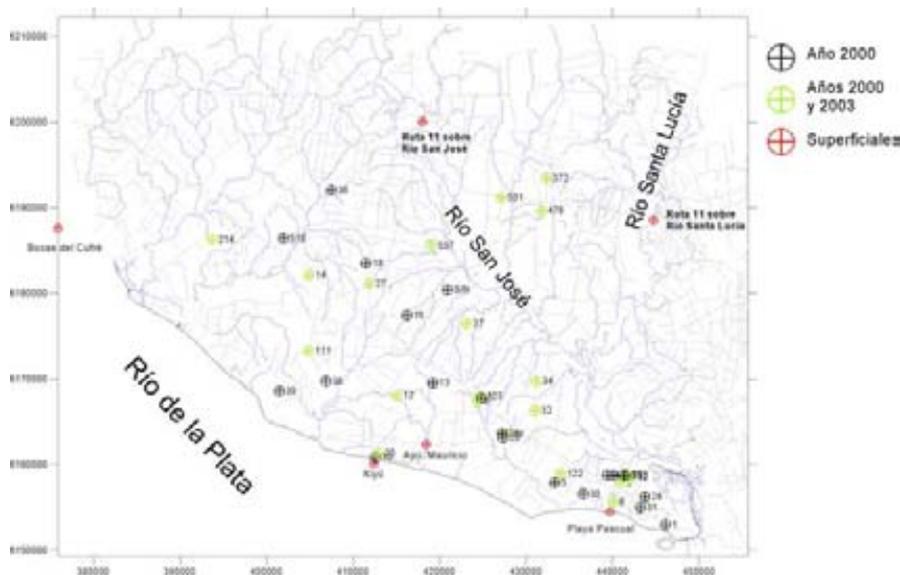


FIG. 6. Ubicación de los puntos de muestreo de isótopos.

La información con que se cuenta es la siguiente:

- Medida de la composición isotópica, $\delta^{18}\text{O}$, δD y de tritio natural del agua, totalizando 94 datos provenientes de 42 perforaciones y 6 puntos de muestreo de aguas superficiales correspondientes a 4 cursos de aguas superficiales, tres puntos sobre el Río de la Plata cerca de Playa Pascual, Kiyú, y Bocas del Cufre, uno sobre el Arroyo Mauricio, que desemboca en el Río de la Plata, uno sobre el Río Santa Lucía y uno sobre el Río San José, estos dos últimos en las intersecciones con la Ruta 11. De estos 42 pozos, 25 corresponden a la red actual del proyecto RLA/8/031.
- Medida de ^{14}C y como herramienta complementaria de interpretación del ^{13}C , en 4 perforaciones.
- Medida de gases disueltos, gases nobles y relación $^3\text{He}/^4\text{He}$ en 5 lugares de la red de muestreo.
- Medida de ^{15}N y del ^{18}O de los nitratos del agua en 6 pozos de los 25 que constituyen la red del proyecto actual.

4.2.1. Isótopos estables de las aguas superficiales y subterráneas

De los resultados encontrados para la zona en estudio y los valores calculados para el exceso de D(‰) y las conductividades del agua a efectos comparativos, se observa que estos excesos de deuterio tienen valores superiores a 10, lo cual podría explicarse, en principio como una característica de las precipitaciones locales.

Los valores de la relación isotópica δD y $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas subterráneas (2000 a 2003), las rectas meteóricas regionales correspondientes a la composición isotópica en las precipitaciones en la Ciudad Universitaria de Buenos Aires y en la Ciudad de Porto Alegre, pueden apreciarse en la Figura 7. También se han representado los valores correspondientes a los 6 puntos de muestreo de agua superficial.

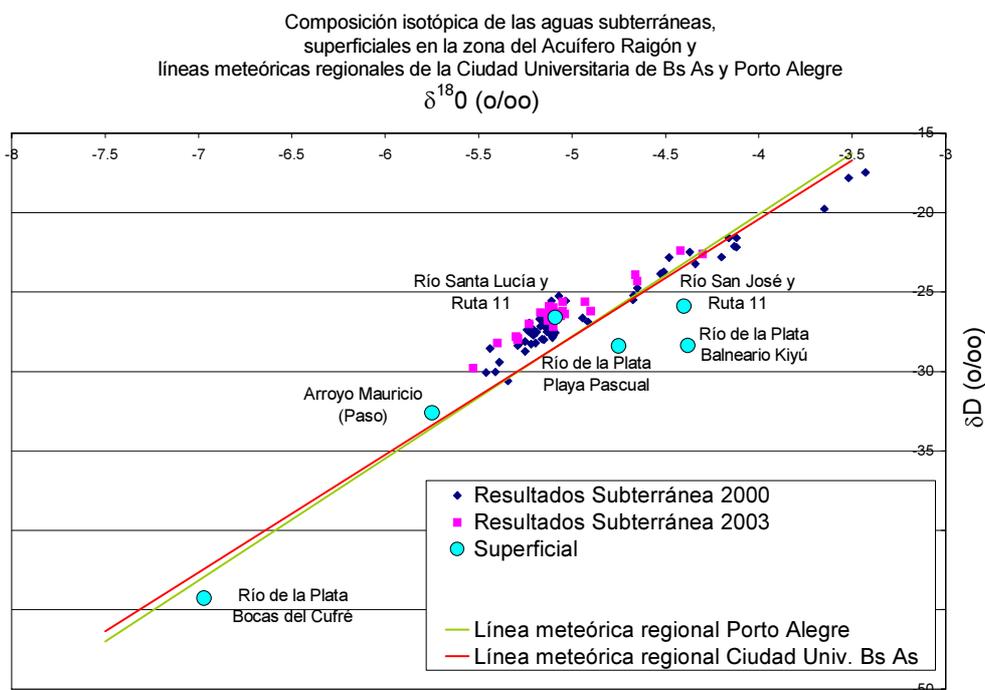


FIG. 7. Composición isotópica de aguas superficiales, subterráneas.

Como puede apreciarse, tanto los resultados del año 2000 como los del año 2003, se encuentran a la izquierda de las rectas meteóricas mundiales y regionales (Buenos Aires y Porto Alegre) y obligaron a buscar una explicación a esta anomalía.

4.2.2. Composición isotópica del agua de lluvia local

La situación geográfica del Uruguay, con su cara al Atlántico y la particularidad de la zona de estudio, localizada sobre el gran estuario que representa el Río de la Plata, colector de una cuenca de drenaje de alrededor de $3.2 \times 10^6 \text{ km}^2$, podrían explicar la presencia de una agua evaporada a nivel de la atmósfera, de origen atlántico (exceso de deuterio de 10‰) con un vapor reciclado local con un exceso de deuterio bastante mayor de 10‰. Esto explicaría los valores altos para las aguas subterráneas, que tienen un valor en exceso de deuterio de 15.33‰.

Los resultados de la composición isotópica del agua de lluvia local de un año (octubre 2003 a setiembre 2004) se muestran en la Tabla 2 y confirman la compatibilidad isotópica con la del acuífero y con los de aguas de los ríos y arroyos debido a fenómenos de reciclaje.

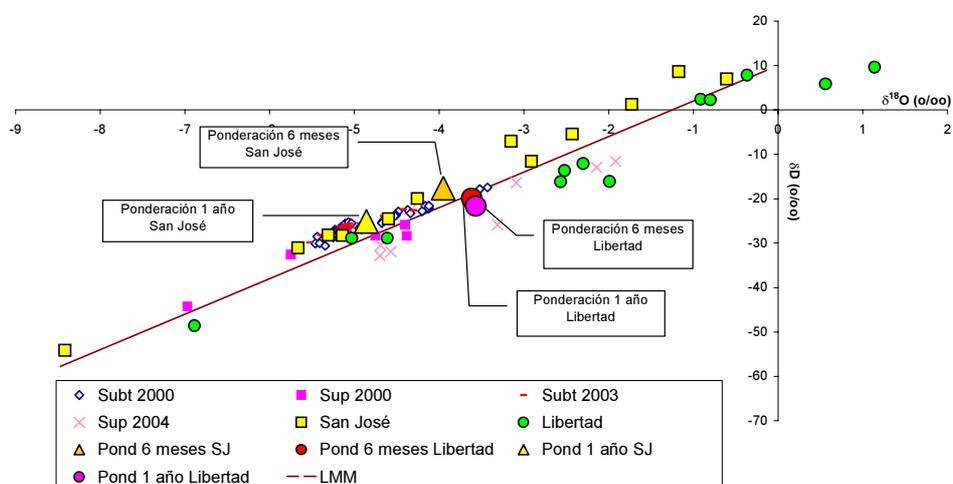


FIG. 8. Composición isotópica de las aguas de lluvia, subterráneas y superficiales.

TABLA 2. COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO (EN ‰)

Mes	Est. Met. 86550 (San José)			Esc. Tec. Agr. Libertad		
	Precipitación (mm)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Precipitación (mm)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
OCT	51	-1.17	8.6	40	-0.91	2.4
NOV	146.2	-5.14	-28.3	176	-5.03	-28.9
DIC	61.5	-5.31	-28.2	87	-4.61	-28.9
ENE	87.6	-2.91	-11.6	93	-2.52	-13.7
FEB	45.1	-3.15	-7.1	40	-2.3	-12.1
MAR	19	-4.6	-24.5	26	-0.8	2.23
ABR	238.5	-8.415	-54.15	241	-6.885	-48.6
MAY	47.8	-5.665	-31.09	50	-1.99	-16.09
JUN	59.4	-4.255	-19.99	89	-2.565	-16.2
JUL	54.9	-2.43	-5.445	48	1.14	9.63
AGO	56.5	-1.725	1.23	71	-0.365	7.79
SET	39.5	-0.605	6.915	49	0.56	5.86

Período :	Octubre 2003 a Septiembre 2004	
Parámetro ponderado :	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
Est. Met. San José-86550 :	-4.86	-25.12
Est. Escuela Téc. Agr. Libertad :	-3.57	-21.64

4.2.3. Tritio en las aguas subterráneas y superficiales.

Los valores de las concentraciones de tritio en las aguas subterráneas y superficiales se encuentran en la Tabla 3, y están expresados en unidades de tritio (UT). La ubicación de los 42 pozos de los que se dispone información y de los puntos muestreados en las aguas superficiales, puede apreciarse en el mapa de la Figura 6.

La interpretación de tritio debió usar como referencia los datos medidos por la red GNIP para estaciones próximas a la zona y aplicando el modelo de Kaitoke (Nueva Zelanda) para los años en que se carece de datos (1953 a 1959) dado que no existen datos relativos a las precipitaciones locales.

TABLA 3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE TRITIO EN MUESTRAS DE AGUA DEL ACUÍFERO RAIGÓN Y DE LOS RÍOS DE LA PLATA, SANTA LUCÍA, SAN JOSÉ Y ARROYO MAURICIO (CON CORRECCIÓN POR DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA)

VALORES CORREGIDOS POR DESINTEGRACION NATURAL SUBTERRANEAS							
TOPONIMIA			CAMPANA				
SampleCode	SampleName	SampleSiteName	1 (2000)	2 (2000)	4 (2000)	10 (2003)	PROMEDIO
30	FLIA CERUTTI	CALCAGNO			2.4		2.4
34	BOIX, Alberto	CAMINO BUSHENTAL			1.2	0.6	0.9
37	FLIA PESANDO	COLONIA ITALIA			0.6	1.5	1.0
5	FLIA BOTTA	COLONIA WILSON	1.5	1.6			1.6
122	ESCUELA 76	COLONIA WILSON				1.0	1.0
1	1241/2	DELTA DEL TIGRE	2.4	1.5	1.7		1.9
36	ESCUELA N° 42	JUNCAL RUTA 3			1.8	0.4	1.1
10	903004	KIYU	0.0	0.3	0.2		0.2
12	FLIA PIAGGIO	KIYU	0.0	0.3	0.0	0.4	0.3
35	903012	KIYU			0.8	1.0	0.9
6	1177/2	LIBERTAD	1.2	1.3	0.7	1.2	1.1
7	284	LIBERTAD	0.1	1.3	0.3	0.0	0.6
13	FLIA BONAHOH	LIBERTAD	0.0	0.6	0.6		0.6
123	903005	LIBERTAD				0.5	0.5
38	FLIA CAPUTTO	MANGRULLO			2.9		2.9
111	902005	MANGRULLO				0.0	0.0
28	791006	MONTE GRANDE			0.0		0.0
214	ARTAGAVEYTIA	PAVÓN				0.4	0.4
31	S/N	PENINO			0.7		0.7
516	BURNELLI,R	PERIERA				1.5	1.5
8	971004	PLAYA PASCUAL	2.7	2.8	3.2	3.3	3.0
537	LEMA,A.	PUNTAS DEL GREGORIO				1.0	1.0
15	FLIA BURNALLY	R1 Y R3 4 KM AL ESTE	1.6	1.5	1.4	2.6	1.8
2	971011	RINCON DE LA BOLSA	1.4	2.9	1.8	2.4	2.1
3	971009	RINCON DE LA BOLSA	1.1	0.8	1.9		1.3
4	971008	RINCON DE LA BOLSA	1.7	1.2	2.4		1.7
9	971007	RINCON DE LA BOLSA	0.3	0.6			0.5
25	691012	RINCON DE LA BOLSA			1.4		1.4
42	971013	RINCON DE LA BOLSA				1.4	1.4
332	971012	RINCON DE LA BOLSA				1.5	1.5
531	VALVERDE,H.	RINCÓN DE LA TORRE				2.5	2.5
14	1500/1	RINCON DEL PINO	2.0	2.2	2.3	2.7	2.3
372	UMPIERREZ,V.	RODRIGUEZ				1.1	1.1
478	VOLARICH	RODRIGUEZ				0.6	0.6
32	FLIA PARODI WHASHINGTON	RUTA 1 KM 46,5			1.1	1.1	1.1
33	FLIA NIETO	RUTA 1 KM 46,5			2.3		2.3
19	ANTUNES, Rogelio Pozo 1	RUTA 1 KM 47	0.0	0.0	0.8	0.9	0.9
20	FLIA CASARD	RUTA 1 KM 47	1.4	2.0	2.0		1.8
21	FLIA KOSTOFF	RUTA 1 KM 47	0.5	0.4			0.5
18	FLIA BACHINO	SAN JOSE	1.4	1.4			1.4
39	TILGUEZ SA	VILLA CELIA			2.6		2.6
27	902003	VILLA MARIA			3.0	0.5	1.8

SUPERFICIALES							
TOPONIMIA			CAMPANA				
SampleCode	SampleName	SampleSiteName	1 (2000)	2 (2000)	4 (2000)	10 (2003)	PROMEDIO
11	ARROYO MAURICIO	ARROYO MAURICIO	2.2				2.2
16	RUTA 11 STA LUCIA	RIO SANTA LUCIA	2.5				2.5
17	RUTA 11 SAN JOSE	RIO SAN JOSE	3.2				3.2
22	PLAYA PASCUAL	RIO DE LA PLATA	3.4				3.4
23	KIYU	RIO DE LA PLATA	6.6				6.6
24	BOCAS DEL CUFRE	RIO DE LA PLATA	2.5				2.5

Concentraciones de tritio calculadas para la zona del estudio. Los valores indican concentraciones medias anuales no ponderadas.

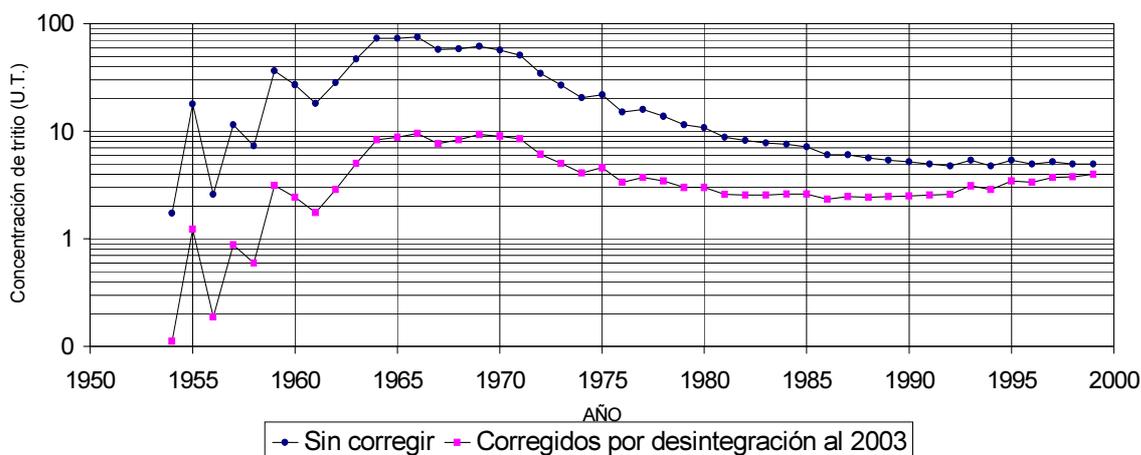


FIG. 9. Concentración de tritio corregido por desintegración al año 2003.

La curva inferior representada en la Figura 9 indica claramente que:

Los valores comprendidos entre 2 y 3 unidades de tritio (UT) pueden corresponder a aguas procedentes de las precipitaciones de los últimos 23 años desde 1980 a la actualidad. Las aguas con concentraciones mayores de 3 UT sólo pueden explicarse con una contribución importante de las precipitaciones de los años 1960 y 1970. Aguas con menos de 2 UT contendrían una determinada fracción de agua procedente de precipitaciones anteriores al año 1953. Lógicamente, las aguas sin tritio procederían en su totalidad de precipitaciones anteriores al año 1953.

Considerando los 88 resultados (corregidos por desintegración radiactiva al 2003) de tritio de las aguas subterráneas que se disponen, se desprende que:

- El 22 % de los resultados pueden corresponder a aguas procedentes de los años 1980 hasta la actualidad (entre 2 UT y 3 UT).
- El 2 % pueden corresponder a aguas con una contribución importante de las precipitaciones de los años 1960 y 1970 (mayores a 3UT).
- El 66 % contendrían una determinada fracción de aguas procedentes de precipitaciones anteriores a 1953 (menores a 2UT).
- El 10 % procederían en su totalidad de precipitaciones anteriores al año 1953.

En cuanto a las aguas superficiales, los valores encontrados en los ríos de la zona, corresponden a precipitaciones mas recientes. El promedio de los valores de tritio de las perforaciones es de 1.3, que significaría que el agua provendría de las precipitaciones de 1958 (datos de Kaitoke).

Los valores promedios de la Tabla 3 son los que se han utilizado para representar mediante el estudio de isolíneas (Krigging), la distribución zonal del tritio en las aguas del acuífero, independientemente de la profundidad a las que estén tomando como se observa en el mapa siguiente (Figura 10).

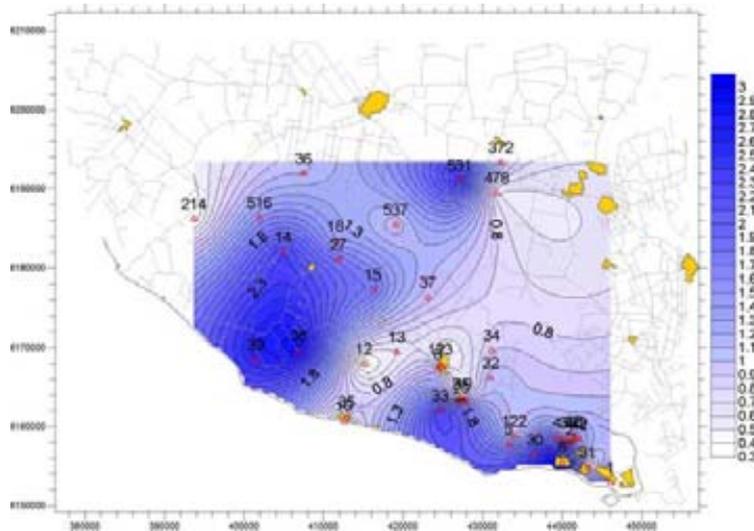


FIG. 10. Distribución zonal del tritio.

Corresponde señalar que el nivel de incertidumbre analítico es de 0.2 UT. En cuanto a las aguas superficiales, los valores fluctúan de 2.2 UT a 6.6 UT. Si bien aguas de procedencia atlántica no contienen tritio, a diferencia de las continentales, proporciones diferentes de ambos tipos de agua pueden producir variaciones de concentración de tritio como las observadas. Las variaciones en el Río de la Plata podrían deberse a que las muestras fueron tomadas en diferentes condiciones de vientos y mareas locales. Una contaminación del Río de la Plata no esta a descartar.

4.2.4. Caracterización de las clases de agua del acuífero a través de los resultados de isótopos estables y del tritio.

A los efectos de confirmar la existencia de distintas clases de agua en el acuífero y ratificar las clasificaciones efectuadas a través de la hidroquímica, se han representado los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD con base en la clasificación efectuada en los pozos de la red, según estén captando agua de Raigón superior, de Raigón inferior, mezcla y de la Formación Chuy (Ver Figura 11).

Si bien no hay una clara separación entre las aguas de la Formación Raigón (superior, inferior y mezcla), sí, se observa una clara distinción con la composición isotópica de los pozos que estarían captando de la formación Chuy.

Incluso se diferencian netamente entre ellos: en un extremo inferior, el que capta de la Formación Chuy en Playa Pascual, más próximo al Río de la Plata, y en el extremo superior los que captan de la Formación Chuy en la zona de Rincón de la Bolsa.

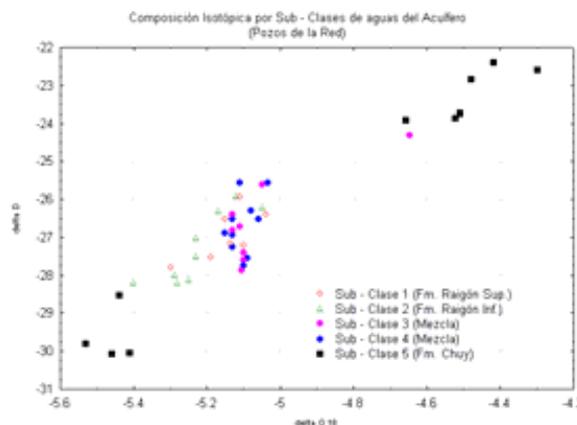


FIG. 11. Composición isotópica por sub-clases de aguas del SAR (Pozos de la Red).

En la representación siguiente (Figura 12 izq), se efectuó un estudio de isolíneas (Krigging) solamente con los pozos de la red que están captando el nivel correspondiente a la formación Chuy. Como se puede ver, solamente se tienen cuatro pozos en ésta zona correspondientes a la red de 25 puntos. Pero podrían distinguirse zonas de infiltración con aguas más modernas.

Dada la escasez de pozos en la zona, de nuestra actual red de 25 pozos de las que se dispone de información litológica y constructiva, se tomaron aquellos puntos de Rincón de la Bolsa en los que se cuenta con información de tritio, aunque no se ha analizado la existencia de la información litológica. Como se observa (Figura 12), las aguas modernas de la zona estarían indicando probables zonas de recarga.

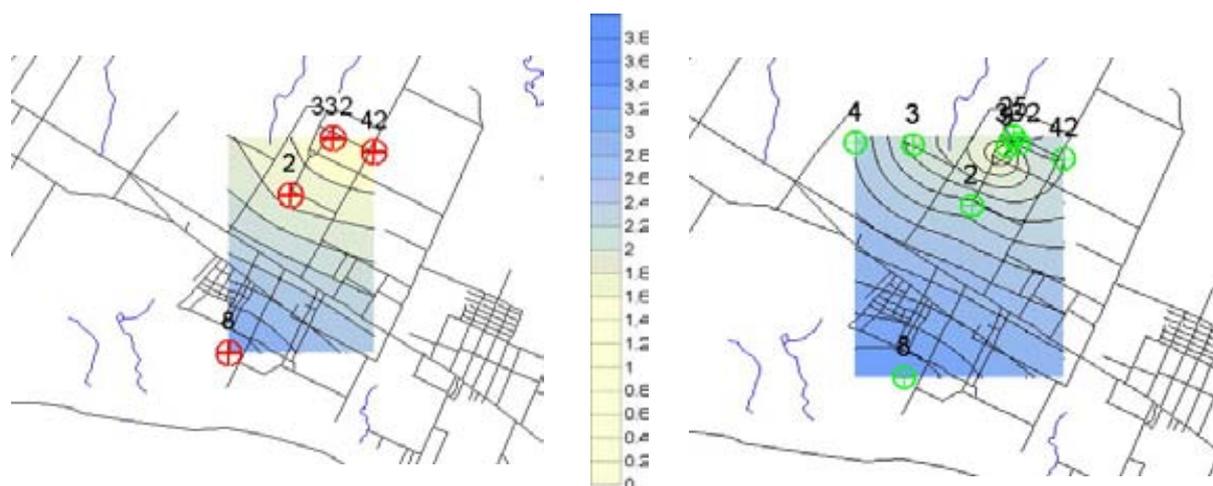


FIG. 12. Contenidos de tritio(en UT) en la zona de Rincón de la Bolsa y Playa Pascual (Acuífero Chuy).

Los resultados obtenidos mediante la información isotópica, ratifican lo expresado por la hidroquímica: las aguas de la Formación Chuy son bien diferentes a las de la Formación Raigón.

A su vez, las aguas de la Formación Chuy próximas al Río de la Plata, en la zona denominada Playa Pascual, además de diferenciarse isotópicamente (Figura 11), corresponde a las aguas más modernas de la zona con valores de tritio entre 3.2 y 3.8 o sea serían aguas de 1975 o más actuales.

4.2.5. Carbono-14 y Carbono-13

En 2000, se muestrearon 4 pozos a los efectos de determinar el contenido de ^{14}C y ^{13}C dado que la concentración de tritio se encontraba próximo a cero, o sea con fracciones nulas o insignificantes del agua de la precipitación de los últimos 20 años (Figura 13). Los resultados están resumidos en la Tabla 4, donde se aprecian los contenidos de carbono-14 expresado como pCM.

Si bien la información detallada puede encontrarse en un trabajo anterior [5], se extraen dos conclusiones resumidas:

- El ^{14}C indica que las muestras analizadas corresponden a edades entre 50 y unos pocos cientos de años,
- El valor del ^{13}C confirmaría que el carbono disuelto en el agua es de origen biogénico, proveniente de agentes externos a la roca o sea que es exógeno.

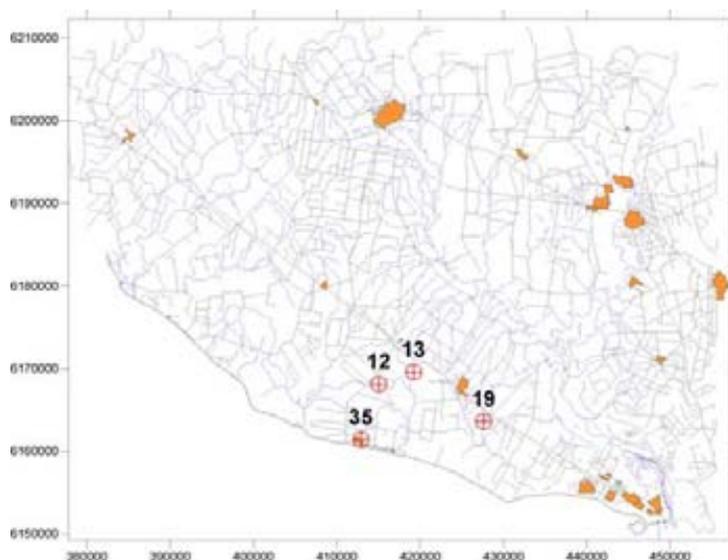


FIG. 13. Ubicación de los pozos muestreados para analizar ^{14}C y ^{13}C .

TABLA 4. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ^{14}C Y ^{13}C .

Muestra	Tritio (Prom)	Tritio error	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C (pCM)	^{14}C Error
12 - Piaggio	0.1	0.5	-13.34	78.03	0.39
13 - Bonahon	0.5	0.5	-14.28	86.52	0.49
19 - Antunez 2	0.3	0.6	-13.53	83.45	0.46
35 - OSE Kiyú	1.0	0.5	-13.96	81.35	0.40

4.2.6. Medida de gases disueltos en las aguas del acuífero y gases nobles

Se tomaron muestras de aguas de algunos de los pozos del acuífero para determinar el contenido isotópico de los gases disueltos. La explicación completa se encuentra en el informe [6]. La ubicación de los 5 puntos de muestreo, 3 en la zona de Libertad (ID.: 123, 6, 7), uno próximo al río San José (Nilo Perez) y otro en la Escuela Colonia Wilson, próximo a la Ruta 1 (ID.: 122), pueden observarse en la Figura 14 y los resultados de las determinaciones se encuentran en las Tablas 5 y 6.

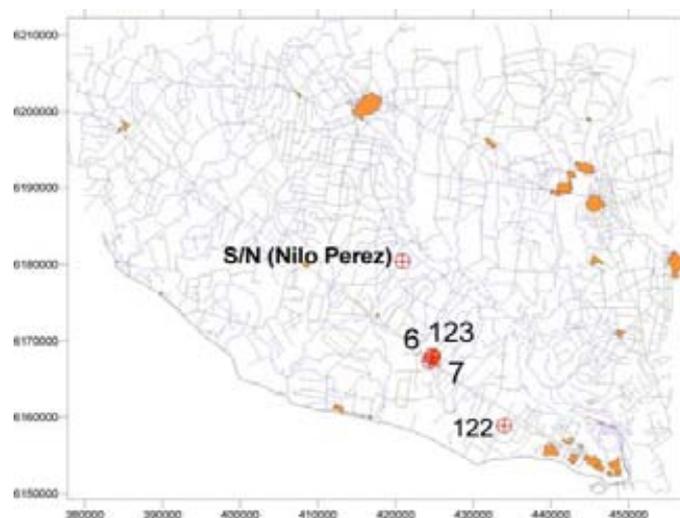


FIG. 14. - Ubicación de los pozos muestreados para analizar gases disueltos y gases nobles.

TABLA 5. RESULTADOS DE GASES DISUELTOS Y GASES NOBLES EN 5 PUNTOS DE LA RED

Id de los Pozos	N ₂ (ccPTN/g)	⁴⁰ Ar(ccPTN/g)	⁸⁴ Kr(ccPTN/g)	²⁰ Ne(ccPTN/g)	⁴ He(ccPTN/g)	R/Ra
6	0.0149	3.58×10^{-4}	4.4×10^{-8}	1.93×10^{-7}	5.19×10^{-8}	1.023
7	0.0156	3.63×10^{-4}	4.7×10^{-8}	2.20×10^{-7}	6.15×10^{-8}	0.939
123	0.0124	2.41×10^{-4}	2.8×10^{-8}	1.72×10^{-7}	4.95×10^{-8}	0.996
122	0.0188	4.60×10^{-4}	5.7×10^{-8}	2.60×10^{-7}	7.38×10^{-8}	0.997
S/N NiloPerez	0.0156	3.85×10^{-4}	4.8×10^{-8}	2.14×10^{-7}	5.65×10^{-8}	1.020

TABLA 6. RESULTADOS DE GASES DISUELTOS Y GASES NOBLES EN 5 PUNTOS DE LA RED

Id de los pozos	³ He tritiogénico (UT)	⁴ He terragénico (ccPTN/g)	Temperatura de recarga (°C)	Exceso de aire (ccPTN/g)	Suma de los residuos al cuadrado
6	1.1	8.7×10^{-10}	14.8	1.2×10^{-3}	5.7×10^{-3}
7	0.	2.1×10^{-9}	14.7	2.7×10^{-3}	8.8×10^{-4}
123	1.1	2.4×10^{-9}	25.0	5.3×10^{-4}	3.5×10^{-2}
122	1.7	3.5×10^{-9}	13.2	2.3×10^{-3}	1.1×10^{-3}
S/N Nilo Perez	0.4	0.0	12.8	2.2×10^{-3}	1.4×10^{-3}

Los resultados se pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Evaluación de la desnitrificación: Los gases disueltos (N₂, ⁴⁰Ar, ⁸⁴Kr y ²⁰Ne) en todas las muestras derivan de la atmósfera, por lo que no hay producción de gases en la subsuperficie o si existe, es pequeña. Ello indicaría que las condiciones biogeoquímicas no son apropiadas para los procesos de desnitrificación, lo que representa una susceptibilidad potencial del acuífero a la degradación debida a cargas altas de nitrato.
- Las temperaturas de recarga se encuentran entre 13°C y 15°C que parece razonable para recargas ocurriendo principalmente en invierno. Hay una posibilidad de contaminación de un punto de muestreo.
- La mayoría de las muestras tienen He-3 tritiogénico por lo que una porción de agua es menor a 50 años.
- Tomando el valor promedio de 1.6 para el tritio, y relacionando tritio/He-3, se tendrían edades de 15 años (en el pozo ID.122) a más de 50 años (en el pozo ID.7).
- El He-4 terrigénico es muy bajo en todos los pozos, consistente con aguas de bastante menos que 100 años.

4.2.7. Nitrógeno-15 y oxígeno-18 de los nitratos

Esta técnica se aplicó con el objetivo de identificar las fuentes de nitrato. Se extrajeron 6 muestras en la campaña 10 del año 2003, para efectuar estas determinaciones en aquellos pozos del acuífero cuyos contenidos de nitrato estaban próximos o superiores a 45 mg·L⁻¹ expresado como nitrato (10 mg·L⁻¹ expresados como nitrógeno). Las determinaciones fueron efectuadas por el Laboratorio de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

La ubicación y los resultados obtenidos se encuentran a continuación (Figura 15 y Tabla 7); en esta tabla también se aprecia el contenido de nitrato en esos pozos

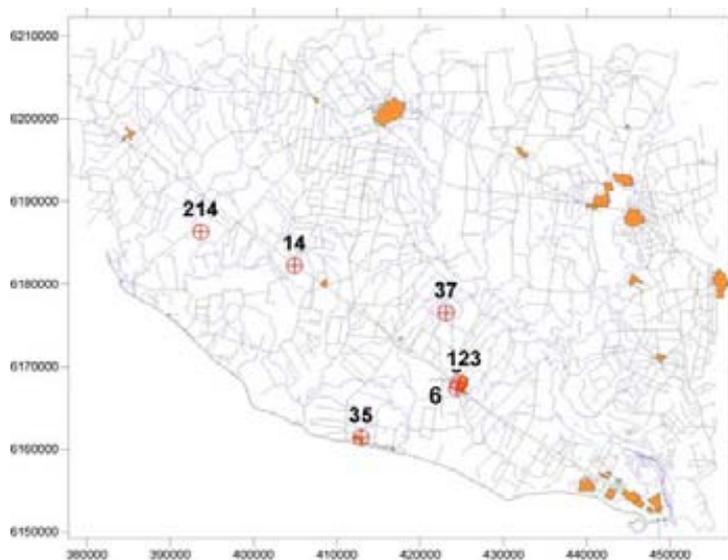


FIG. 15. Ubicación de los pozos para analizar $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en nitratos.

TABLA 7. RESULTADOS DE $\Delta^{15}\text{N}$ Y $\Delta^{18}\text{O}$ (‰) EN NITRATOS, EN 6 POZOS DE LA RED

Código	Muestra	Lugar	Fecha	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ en nitrato (‰)	[NO ₃] mg/L
214	ARTAGAVEYTIA	Pavón	19-05-03	8.18	7.37	41
37	FLIA PESANDO	Colonia italia	19-05-03	18.36	15.23	39
14	1500/1	Rincon del pino	20-05-03	14.33	8.27	68
35	903012	Kiyu	21-05-03	8.52	7.07	51
6	1177/2	Libertad	04-06-03	14.68	11.15	39
123	903005	Libertad	04-06-03	17.72	9.3	85

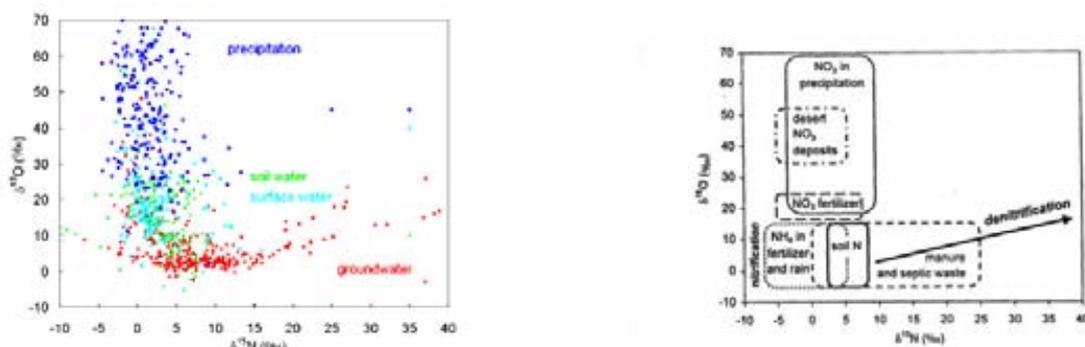


FIG. 16. Representación esquemática de la distribución en rangos del $\delta^{15}\text{N}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$.

Por un lado, la zona correspondiente a aguas subterráneas, comúnmente se encuentra en la bibliografía, bastante individualizada y caracterizada a través de los valores de $\delta^{15}\text{N}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ de los nitratos, como se aprecia en la Figura 16 izq. Las otras clases de agua: precipitación, agua del suelo y agua superficial tienen en general otros rangos de valores.

En la Figura 16 derecha se representa el diagrama general para estudiar las fuentes y procesos que afectan al ión nitrato, y puede inferirse que:

- La nitrificación del amonio y/o del nitrógeno orgánico proveniente de fertilizantes, precipitación y residuos orgánicos pueden producir un gran abanico de valores de $\delta^{18}\text{O}$
- El agua del suelo tiende a tener mayores valores de $\delta^{18}\text{O}$ en los nitratos y un rango más amplio de esos valores, que las aguas subterráneas a causa de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ mayores por el O_2 y/o agua en los suelos.

De la misma forma se esquematizaron nuestros resultados, observándose a continuación la representación obtenida (Figura 17).

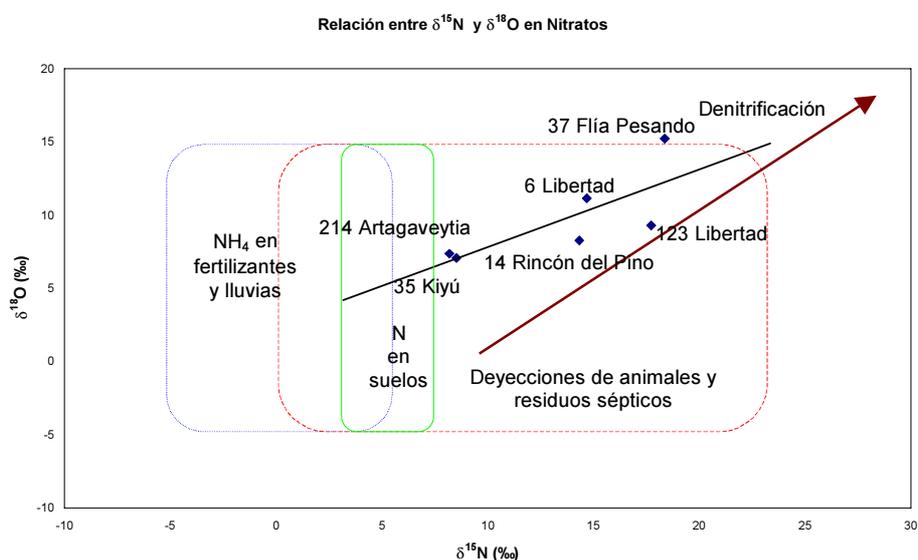


FIG. 17. Relación entre $\delta^{15}\text{N}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ en nitrato de los pozos muestreados.

Las muestras analizadas se comportan en los rangos de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de los nitratos, correspondiente a típicas aguas subterráneas y los resultados se encuentran en el campo correspondiente al nitrato proveniente de deyecciones de animales y de residuos sépticos. Estas fuentes son lógicamente debidas a las actividades antropogénicas de la zona donde se encuentran los puntos de muestreo.

Los otros pozos (214 y 37) ubicados en zonas rurales, de actividad agropecuaria pueden provocar el contenido alto de nitrato.

4.2.8. Conclusiones

- En la región existen dos tipos de acuíferos química e isotópicamente bien diferenciados, que son los acuíferos Raigón y Chuy. Aunque ambos son bicarbonatados sódicos son claramente distintos en la concentración iónica y en la composición isotópica, con mayor concentración iónica en el acuífero Raigón.
- En el acuífero Raigón, las aguas se clasifican en un 81% como bicarbonatadas sódicas y el resto como bicarbonatadas cálcicas.

- El comportamiento isotópico del agua de lluvia local y su similitud con el del agua del acuífero, confirman a las precipitaciones como la fuente principal de recarga
- La edad del agua subterránea del acuífero Raigón se sitúa en el rango de 50 años, según los contenidos de tritio, de carbono-14 y los resultados de los análisis de gases nobles He-3 y He-4.
- En los pozos que contienen mayores niveles de nitrato se comprueba que la procedencia es de origen antropogénico (residuos sépticos) y resultado de las actividades agropecuarias (deyecciones de animales). Esto apoya la hipótesis de aguas modernas infiltradas localmente.

4.3. Modelación hidrogeoquímica

4.3.1. Objetivo

El modelo conceptual aceptado consiste en un sistema acuífero multicapa o al menos de dos capas. La recarga del acuífero es por la infiltración de agua de lluvia, ya sea de manera directa en los afloramientos o después de atravesar la Formación Libertad.

Se aplicaron métodos de modelación hidrogeoquímica a los efectos de validar los modelos manejados y/o proponer nuevos modelos.

4.3.2. Limitaciones a la aplicación de métodos hidrogeoquímicos

La aplicación de estos métodos de análisis presenta limitaciones de importancia en el proyecto:

- La selección de pozos de muestreo que reúnan buenas condiciones para aportar datos confiables, redujo a un número pequeño (21 pozos) de puntos con información disponible.
- En esta distribución de perforaciones, existe una ausencia o escasa representatividad en la cantidad de muestras tomadas en diferentes niveles del acuífero.
- Todos los pozos de muestreo hasta la fecha son pozos de explotación que captan y mezclan niveles, o bien de los cuales no se tiene una información detallada de su litología.
- Si bien las formaciones que conforman la geología del área están caracterizadas litológicamente, no existe una descripción mineralógica específica en los perfiles de los pozos de muestreo, con especial atención al estado de alteración de los minerales que forman el acuífero.
- Dadas estas carencias resulta necesario asumir como correcta la hipótesis de considerar al acuífero como un sistema multicapa en el cual es aceptable considerar una capa única para el análisis hidroquímico y su simulación, una simplificación de la realidad, pero es la mejor alternativa posible de trabajo.

4.3.2.1. Modelos conceptuales propuestos

El mapa de isoclinas de conductividad eléctrica utilizando todas las mediciones disponibles muestra que los mayores valores se disponen en los sectores de divisorias de aguas, mientras que en las proximidades de las áreas identificadas como de descarga los valores son menores. Esta distribución es opuesta a la evolución natural de un sistema acuífero, que implica el incremento de la salinidad en el sentido del flujo.

La correlación de la geología de superficie con el mapa de isoclinas de conductividad eléctrica permite observar una correspondencia entre las áreas de mayor conductividad y las zonas en que la cobertura del acuífero Raigón (Formación Libertad) es más potente. Esto llevó a una delimitación de zonas caracterizadas por su geología de superficie y valores de conductividad eléctrica .

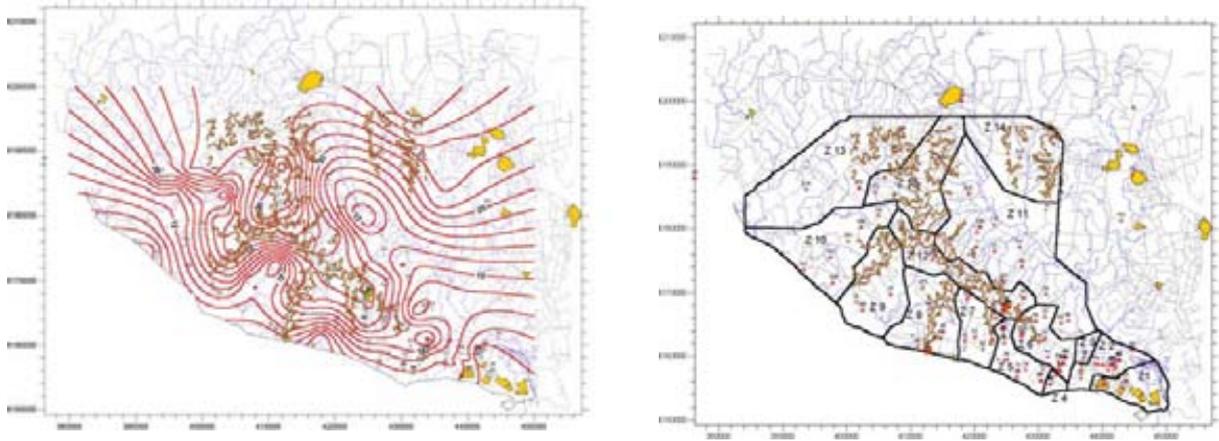


FIG. 18. Mapa de isopiezas OCT 2000 (izq) – Cota de 40 metros SNMM (der).

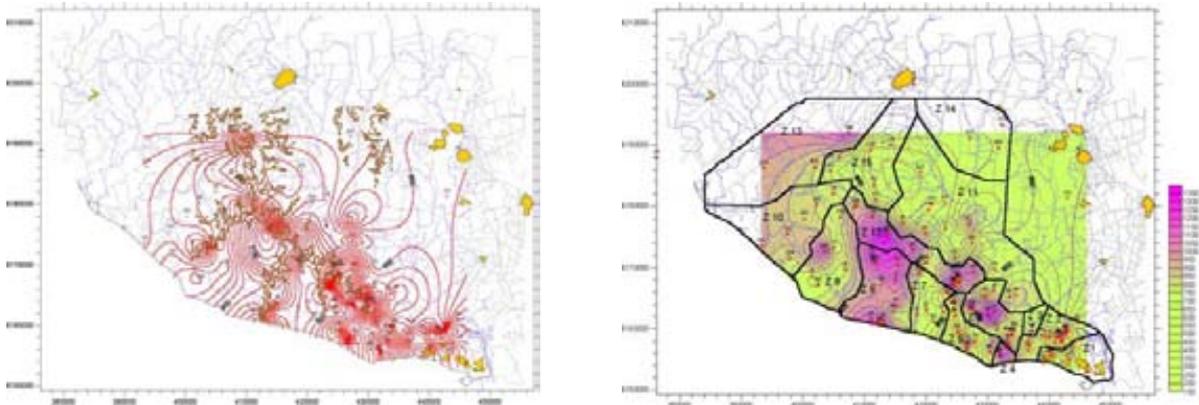


FIG. 19. Mapa de isolíneas de conductividad eléctrica (Campaña 6 de NOV 2000).

De esto resulta un modelo conceptual que puede describirse de la siguiente forma:

- Las formaciones Libertad y Raigón se encuentran vinculadas hidráulicamente, existiendo un flujo vertical importante de la primera a la segunda.
- La recarga del acuífero Raigón se produce en toda la superficie por infiltración de agua de lluvia a través de la formación Libertad.
- La recarga se produce con un flujo lento (debido a su baja permeabilidad) lo que hace que la calidad del agua de recarga tenga un equilibrio con los minerales de la Fm. Libertad. Estas aguas alcanzarían mayor contenido de sólidos disueltos en los sectores de divisorias de aguas, que corresponden a los mayores espesores de la Formación Libertad. Por otra parte, las áreas próximas a los cursos superficiales que actúan como área de descarga se caracterizan por la ausencia o muy bajo espesor de Fm. Libertad. En esos sectores las características del agua son consecuencia de la mezcla entre el flujo regional proveniente desde la zona de recarga con el agua de infiltración local directa en el acuífero Raigón. La infiltración del agua de lluvia en el acuífero Raigón resultaría en aguas de muy baja carga salina debido a la baja interacción con el terreno, poca cobertura y a tiempo de tránsito bajo. Estas condiciones se verifican en la zona de Rincon de la Bolsa, y además es confirmado por los datos isotópicos que indican una recarga rápida y aguas de muy baja salinidad, muy claramente diferenciadas de las aguas de la Fm. Raigón desde el punto de vista hidroquímico.

Para la propuesta de los modelos hidrogeoquímicos se han considerado la mineralogía descrita del acuífero y los conceptos elementales de geoquímica en lo que hace a velocidades de reacción y fases sobre las cuales puede asumirse como válida la hipótesis del equilibrio químico. Y se han tenido en cuenta los modelos antecedentes sobre el acuífero Pampeano en Argentina, asimilando el comportamiento. El modelo hidrogeoquímico que se corresponde con el modelo conceptual es:

- Zonas en que la recarga se produce a través de la Fm. Libertad: el agua de lluvia atraviesa la Fm. Libertad en condiciones de acuífero libre (en contacto con la atmósfera) y disuelve calcita hasta alcanzar el equilibrio. La composición catiónica está condicionada por procesos de intercambio, especialmente altas proporciones de arcillas (montmorillonita) de hasta un 40%.
- Zonas en las que el agua de lluvia se infiltra directamente en afloramientos del Raigón: aquí se considerará un proceso de mezcla entre agua de lluvia de recarga directa y agua de flujo regional (con la composición de los sectores de mayor salinidad) modificada por procesos locales de intercambio iónico.
- Zona de la Fm. Chuy: infiltración de agua de lluvia en sectores de flujo rápido. Composición química resultante de evaporación en la recarga y procesos de intercambio.

4.3.2.2. Distribución de los índices de saturación en calcita

Partiendo de la hipótesis anterior referida a que debido al lento tiempo de tránsito y a la abundante presencia de carbonato de calcio en la Fm. Libertad, las aguas que se recargan a través de ella debieran estar en equilibrio con calcita, se calculó (utilizando el programa PHREEQC2.0)[2], el índice en saturación en calcita de todos los puntos muestreados de los cuales se dispone de análisis químicos completos.

Los resultados obtenidos son totalmente coherentes con la hipótesis planteada. Las muestras de agua tomadas en los sectores con espesa cobertura de Fm. Libertad tienen un IS en calcita de entre -0.01 y 0.26, lo que indica condiciones de equilibrio o ligera sobresaturación. En cambio en los sectores en donde el espesor de Fm. Libertad es bajo o directamente aflora la Fm. Raigón, los IS de calcita están en valores de entre -0.5 y -2.0, claramente indicativos de subsaturación.

El mapa de líneas de igual valor de IS en calcita muestra la notable coincidencia entre la línea de IS=0 (equilibrio), y los sectores de divisoria de aguas con mayor espesor de Fm. Libertad. Esta evidencia soporta la idea un flujo lento que permite condiciones de equilibrio en la recarga a través de Fm. Libertad, lo que explicaría la mayor salinidad de estas aguas.

4.3.2.3. Modelación inversa para evaluación de modelos conceptuales

De acuerdo con las diferentes hipótesis planteadas se ha considerado de interés utilizar el programa NETPATH [3] para comprobar la existencia de modelos de balance de masas verosímiles que habiliten la consideración de esos modelos conceptuales. A tal efecto se realizaron modelos inversos utilizando como soluciones iniciales a muestras características de cada una de las situaciones propuestas. Los modelos conceptuales a validar son:

- El esquema conceptual I, con dos niveles de acuífero Raigón con flujo desde el nivel superior hacia el inferior a través de un acuitardo.
- Modelo hidrogeoquímico para las aguas de las zonas con afloramientos de la Fm. Libertad y conductividades eléctricas mayores de 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Se utilizará como solución de entrada al agua de lluvia, como solución final a una muestra característica de la zona considerada, y los procesos serán aquellos propuestos en la formulación del modelo conceptual. El agua de lluvia que se infiltra se pone en equilibrio con calcita en un sistema abierto a la atmósfera. También se pone en contacto con el mineral yeso y predominan los procesos de intercambio. Se considera la disolución de NaCl pulverulento o la concentración de Cl⁻ por evaporación del agua de lluvia para explicar los cambios en la concentración de cloruro. Este modelo numérico sirve para validar el modelo conceptual para la zona de geo-conductividad considerada.

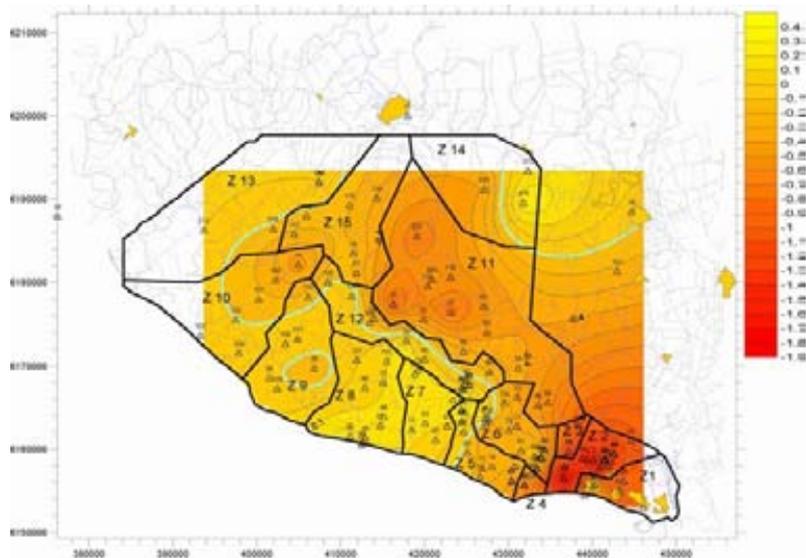


FIG. 20. Valores del IS de calcita. La línea blanca indica el valor de equilibrio.

- Modelo hidrogeoquímico para las aguas de las zonas con bajo o nulo espesor de la Fm. Libertad y conductividades eléctricas menores de $800 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. Se busca explicar la composición del agua subterránea en zonas en donde al acuífero Raigón aflora o la cobertura es de baja potencia. Los procesos reactivos son los mismos que los que determinan la composición del agua subterránea en los sectores de geo-conductividad correspondientes a las divisorias, pero son cuantitativamente mucho menores, lo cual podría corresponderse con el menor tiempo de tránsito en los sedimentos de la cobertura o en los sedimentos poco reactivos de la Fm. Raigón.
- Modelo hidrogeoquímico alternativo para las aguas de las zonas del punto anterior (sin afloramientos de la Fm. Libertad y conductividades eléctricas menores de $800 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$). Se simulará una mezcla entre una solución de entrada de agua de lluvia y una solución de agua de las zonas de alta conductividad, y como solución final a una muestra característica de la zona considerada, y los procesos serán aquellos propuestos en la formulación del modelo conceptual. Según el esquema conceptual de flujo, la composición hacia las áreas de descarga es el resultado de la composición con la que llega el agua del flujo regional más la entrada de infiltración de agua de precipitación en el lugar por tratarse de un acuífero libre. Para probar esta hipótesis se simulará una mezcla entre una solución de entrada de agua de lluvia y una solución de agua de las zonas de alta conductividad (áreas de recarga), y como solución final a una muestra característica de la zona considerada, y los procesos serán aquellos propuestos en la formulación del modelo conceptual.
- Modelo hidrogeoquímico para el sector del acuífero en la Fm. Chuy, con agua de lluvia como solución inicial y como solución final una muestra característica del acuífero, o incluyendo un flujo proveniente desde la Fm. Raigón. Se analizaron dos modelos posibles. El primero de ellos es que el agua en la Fm. Chuy debe su composición solo a la recarga local y a la reactividad con el bajo espesor de cobertura en la Fm. Dolores. El segundo se realizó para analizar la posibilidad de un flujo lateral desde la Fm. Raigón hacia la Fm. Chuy, mezclado con la recarga local. Como se observa el origen de las aguas de la Fm. Chuy puede explicarse por la infiltración de agua de lluvia con un leve incremento de la salinidad por procesos reactivos de poca significación. Las aguas de este sector son las más subsaturadas en calcita, lo cual se relacionaría con menos tiempo de tránsito en una formación portadora del mineral.

La inclusión de yeso en los modelos debe ser revisada cuando se disponga de información mineralógica más precisa. No obstante ello se considera que los modelos resultantes tienen validez general por cuanto el balance de masas de sulfato es relativamente poco significativo. El probable

proceso alternativo a la disolución de yeso podría ser la disolución de Na_2SO_4 que podría estar presente en el sistema por precipitación tras la evaporación del agua meteórica.

El aspecto más destacable en estos modelos es que la composición del agua de lluvia, es decir de la infiltración local, tiene una mayor participación en la composición del agua subterránea. Podría según esto decirse que el aporte de agua por infiltración local es también en volumen más importante que los aportes por el flujo regional.

4.3.2.4. Hipótesis alternativa y el problema de la contaminación con nitratos

Vista la distribución de conductividades, con los mayores valores en el sector de divisoria de aguas sobre la cual se dispone la traza de la ruta 1 y varias localidades sin sistema de saneamiento, resulta probable la hipótesis de asignar esta mayor salinidad a origen antrópico, estrictamente a problemas de contaminación. Esta hipótesis es fuertemente sostenida por la existencia de pozos en el sector con altas concentraciones de nitratos, cuyo origen antrópico ha sido ya demostrado con estudios isotópicos.

Debe destacarse que ambas hipótesis no son excluyentes, y que la hidroquímica del agua del sector debe ser consecuencia tanto de los procesos reactivos al atravesar la infiltración a la Fm. Libertad más los componentes disueltos añadidos por la actividad humana.

La existencia de muestras con concentraciones elevadas de nitrato constituye una clara evidencia de procesos de contaminación puntual en el acuífero. Estos procesos deberán ser estudiados para encontrar alternativas de mitigación y prevención de la contaminación. No obstante ello, dado el carácter puntual de la contaminación, este problema no se considera en profundidad en este informe cuyo objetivo está orientado al conocimiento de patrones regionales de comportamiento hidrogeoquímico.

4.3.2.5. Concentración de sílice disuelta

Las aguas del acuífero Raigón contienen en todos los casos analizados concentraciones de sílice en solución de entre $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. El estudio de los índices de saturación muestra que las aguas se hallan sobresaturadas en todos los silicatos incluidos en la base de datos, por lo que no serían estos los responsables de la sílice en solución, o al menos de tan grandes concentraciones. En cambio se observa que las soluciones se encuentran ligeramente subsaturadas en sílice amorfa. La sílice amorfa sería la fase sólida que se disuelve y es responsable de los contenidos observados.

Si bien no ha sido mencionado en las descripciones mineralógicas observadas, por analogía con el acuífero Pampeano de la Argentina, resulta posible suponer que la Fm. Libertad contiene proporciones importantes de vidrios volcánicos formados por sílice en estado coloidal.

4.3.2.6. Concentración de tritio

Se efectuó una representación de la distribución zonal del tritio medido en 2000. Puede apreciarse una relación entre las aguas más antiguas y la zona más potente de la Fm. Libertad, así como de aguas más jóvenes en las zonas de posibles descargas. Esto se encuentra de acuerdo con lo expresado en los diferentes modelos hidrogeoquímicos propuestos.

4.3.3. Conclusiones

- Las observaciones realizadas han permitido proponer un modelo para explicar las variaciones hidrogeoquímicas observadas, pero que tiene además implicancias muy importantes en la determinación de condiciones de recarga y flujo.
- El modelo conceptual supone que la recarga se realiza en toda la superficie de la cuenca, y que se efectúa de manera más rápida y directa en aquellos sectores en los que no existe cobertura de formación Libertad o es muy delgada. De esta manera puede explicarse la “inversión”

observada en la distribución de salinidades (valores más altos en las divisorias de aguas que disminuyen hacia las áreas de descarga). En los sectores de divisorias en donde el espesor de la Fm. Libertad es mayor (más de 20 m) el agua de infiltración atraviesa lentamente esta Fm. antes de llegar al acuífero Raigón, disolviendo carbonato de calcio hasta alcanzar el equilibrio, disolviendo yeso, con procesos de intercambio catiónico, y con incrementos de salinidad debidos al lavado de las sales depositadas por evaporación del agua de lluvia.

- En cambio en los sectores cercanos a las descargas, con baja o nula cobertura de Fm. Libertad, estos procesos son mucho menos significativos. La posibilidad de incorporar iones a la solución una vez ingresada el agua al acuífero Raigón es baja, dado que éste se compone de silicatos de muy lenta cinética de reacción y el agua tiene un tiempo de residencia muy corto en el acuífero (máximo de 50 años). Por este motivo las aguas en estos sectores (y en la Fm. Chuy) tienen una baja salinidad.
- Los modelos de balance de masas realizados indican que en las zonas próximas a la descarga en los ríos San José y Santa Lucía el agua subterránea en el acuífero Raigón tiene una componente de entre un 70% y 80% de recarga local y un 30% a 20% de flujo regional profundo.
- La hidroquímica muestra una diferenciación absoluta de las aguas del acuífero contenido en la Fm. Chuy de aquellas del acuífero Raigón. Según los modelos de balances de masas la transferencia lateral de aguas de la Fm. Raigón hacia la Fm. Chuy es inferior al 20% o nula.

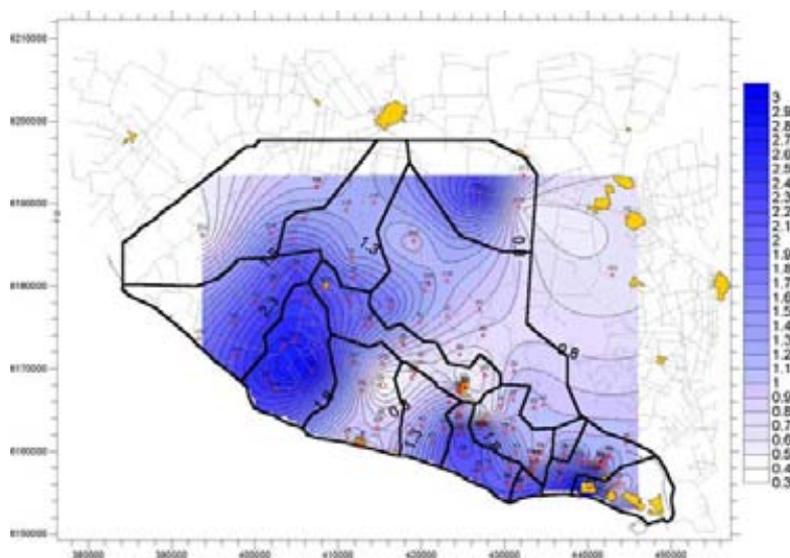


FIG. 21. Distribución zonal del tritio.

5. Conclusiones generales

Como resultado de los estudios efectuados a través del Proyecto RLA/8/031 se han logrado importantes avances en el conocimiento del acuífero Raigón.

Aplicando tecnologías isotópicas y convencionales se ha podido establecer un modelo hidrogeológico conceptual para el acuífero Raigón.

La isotopía jugó un rol preponderante a través del uso de los isótopos ^2H , ^{18}O , ^3H , ^{14}C , ^{13}C y ^{15}N , que permitió la determinación de las características de la recarga, uno de los principales componentes del modelo hidrogeológico.

Se ha confirmado que el acuífero está compuesto por varias capas de distinto comportamiento.

La edad del agua subterránea se sitúa en el rango de los 50 años y la principal fuente de recarga del acuífero es la precipitación actual.

En la región existen dos tipos de acuíferos química e isotópicamente bien diferenciados, que son los acuíferos Raigón y Chuy. La transferencia lateral de aguas de la formación Raigón hacia la formación Chuy es inferior al 20% o nula.

La recarga se produce en toda la superficie y es más rápida y directa donde la formación Libertad, bastante impermeable, es poco potente.

Con este modelo hidrogeológico conceptual se está desarrollando un modelo matemático como herramienta de gestión del recurso.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección Nacional de Meteorología en la persona de su Director Nacional, Cr. Raúl Michelini y al personal de las estaciones meteorológicas de Colonia, San José, Punta del Este y Laguna del Sauce por su apoyo logístico.

Al Dr. Jorge Bossi de la Cátedra de Geología de la Facultad de Agronomía por su aporte de conocimientos.

REFERENCIAS

- [1] DE SANTA ANA H., GOSO C., MUZZIO R, OYHANTCABAL P., VEROSLAVSKY G.; Bacia do Santa Lucía (Uruguay). Evolucao tectónica e sedimentar (1992) .Actas Revista Brasileira de Geología.
- [2] PARKHURST, D.L. y CAJ APPELO (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 99-4259, 1-312.
- [3] PLUMMER, L.N., E.C. PRESTEMON y D.L. PARKHURST (1991) An Interactive Code (NETPATH) for Modelling NET Geochemical Reactions Along a Flow PATH. U.S.G.S. Water Resources Investigations, 4078, 1-227.
- [4] PLATA-BEDMAR, A., Hidrología Isotópica e Hidroquímica del Acuífero Raigón, Informe final del proyecto URU/8/012 (2001), IAEA, Viena.
- [5] PLATA-BEDMAR, A., Datación con carbono-14 de las Aguas Subterráneas del Acuífero Raigón, Informe final del proyecto URU/8/012 (2001), IAEA, Viena.
- [6] SOLOMON, K., Informe de avance técnico anual del Proyecto Nacional para el período junio de 2002 a julio de 2003 (2003), IAEA, Viena.

LISTA DE PARTICIPANTES (contrapartes principales):

COLOMBIA

- Curvelo Redondo, Julio Segundo** Corporación Autónoma Regional de La Guajira (CORPOGUAJIRA)
Carrera 7, #12-25
Riohacha
La Guajira
Colombia
Tel.: 0057 91 7272581
Fax: 0057 91 7273904
Email: corpogua@col3.telecom.com.co
- García Sepúlveda, José Olimpo** Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER)
Calle 24 No. 7-29, Piso 5
Pereira 3559
Colombia
Tel.: 0057 6 3354152
Fax: 0057 6 3355501
Email: ogarcia@carder.gov.co
- Herrera Parra, Héctor Mario** Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE)
Carrera 25 No. 22 -29 Edificio Don Miguel
Avenida las Penitas
Sincelejo
Sucre
Colombia
Tel.: 0057 95 2821801
Fax: 0057 95 2811417
Email: hectormarioherrera@gmail.com
- Medina Morales, Guillermo** Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) - Grupo de Aguas Subterráneas
Carrera 56 No. 11-36
Cali
Colombia
Fax: 0057 2 3393393
Email: medinamg@CVC.gov.co
- Otálvaro, Doris Liliana** Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER)
Calle 24 No. 7-29, Piso 5
Pereira 3559
Colombia
Tel.: 0057 6 3354152
Fax: 0057 6 3355501
Email: liliotalvaro@yahoo.com

Toro Espitia, Luis Eduardo

Corporación Autónoma Regional de La Guajira
(CORPOGUAJIRA)
Carrera 7, #12-25
Riohacha
La Guajira
Colombia
Tel.: 0057 91 7272581
Fax: 0057 91 7273904
Email: luis.toro@corpoguajira.gov.co

Vargas Quintero, María Consuelo

Ministerio de Minas y Energía
Instituto Colombiano de Geología y Minería
(INGEOMINAS)
Diagonal 53 No. 34-53
Apartado Aéreo 4869
4865 Bogotá
Colombia
Tel.: 0057 1 2200149
Email: mvargas@ingeominas.gov.co
Fax: 0057 1 2220824

COSTA RICA

Cordero, Doris

Empresa de Servicios Públicos de Heredia
Heredia
Costa Rica
Tel.: 00506 2261 1941
Email: doriscor@hotmail.com

Lezama, Eduardo

Instituto Costarricense de Acueductos y
Alcantarillados
Edificio Aya-Pavas
Apartado Postal 1097-1200
1000 San José
Costa Rica
Tel.: 00506 2222 5062
Fax: 00506 2255 2398
Email: eduardo.lezama@aya.go.cr

Reynolds Vargas, Jenny

Universidad Nacional
Apartado Postal 86
Heredia 3000
Costa Rica
Tel.: 00506 2602715
Fax: 00506 2602715
Email: jreynold@una.ac.cr

Valiente Álvarez, Carmen Isabel

Instituto Costarricense de Acueductos y
Alcantarillados
Edificio Aya-Pavas
Apartado Postal 1097-1200
1000 San José
Costa Rica
Tel.: 00506 2225062
Fax: 00506 2552398
Email: eduardo.lezama@aya.go.cr

Zeledón, José Miguel

Ministerio de Ambiente y Energía
Departamento de Aguas
Apartado 1690-2100
Goicoechea
San José
Costa Rica
Tel.: 00506 2257 7943
Fax: 00506 2255 4856
Email: mzeledon@meteo.imn.ac.cr

CHILE

Aguirre Dueñas, Evelyn Susana

Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN)
Departamento de Aplicación Nucleares
Laboratorio de Isótopos Ambientales
Amunategui No. 95
Casilla 188-D
Santiago
Chile
Tel.: 0056 2 3646113
Fax: 0056 2 3646277
Email: eaguirre@cchen.cl

Atenas, Mesenia

Dirección General de Aguas
Departamento Conservación y Protección de Recursos
Hídricos
Morandé 59, Oficina 826
Santiago
Chile
Tel.: 0056 2 3612429
Email: mesenia.atenas@moptt.gov.cl

Cepeda Rodríguez, Nancy

Ministerio de Obras Públicas
Superintendencia de Servicios Sanitarios
Moneda 673, 7° Piso
6500721 Santiago
Chile
Tel.: 0056 2 3824019
Fax: 0056 2 3824004
Email: ncepeda@siss.cl

Iriarte Díaz, Sergio

Water Management Consultant
Alcantara 44, Piso 3
755-0159 Las Condes, Santiago
Chile
Tel.: 0056 2 2069000
Fax: 0056 2 2463518
Email: siriarte@watermc.com
Internet: <http://www.sernageomin.cl>

Jofre Chamy, Juan Carlos

Comisión Nacional del Medio Ambiente
Departamento Planes y Normas
Obispo Donoso 6
Casilla 265, Correo 55, Providencia
Santiago
Chile
Tel.: 0056 2 2405664
Fax: 0056 2 2441262
Email: jjofre@conama.cl

Tore, Corrado

Aguas Andinas S.A.
Avenida Presidente Balmaceda 1398
Santiago
Chile
Tel.: 0056 2 6942159
Fax: 0056 2 6942909
Email: ctore@aguasandinas.cl

ECUADOR

Altamirano Benavides, César Augusto

Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica
Calle Juan Larrea 1536 y Riofrio
Casilla 17-01-2517
Quito
Ecuador
Tel.: 00593 2 2545649
Fax: 00539 2 2563336
Email: oiarla8031@hotmail.com

Arias, Nelson Eduardo

Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable
Calle Mariana de Jesús e Italia
Quito
Pichincha
Ecuador
Tel.: 00593 2 446325
Fax: 00593 2 446326

Cepeda Tobar, Héctor Alonso

CORSINOR
Pedro Moncayo #6-46 y Bolivar
Ibarra
Imbabura
Ecuador
Tel.: 00593 6 956 590
Fax: 00593 6 952 444
Email: corsinor@imbanet.net

Palacio Salcedo, Marino

PREDESUR
Vela # 1323 entre 9 de Octubre y Sucre-Machala
Machala
El Oro
Ecuador
Tel.: 00593 7 932517
Fax: 00593 7 931277
Email: ppuyango@predesur.gov.ec

Pérez Guamanzara, Paulina Jady

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito
Avenida Río Coca 1734
Quito
Ecuador
Tel.: 00 593 22 545277
Fax: 2467061
Email: dimeambiental@hotmail.com

NICARAGUA

Montenegro Guillén, Salvador
(UNAN)

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
Centro para la Investigación de los Recursos Acuáticos
de Nicaragua (CIRA)
Hosp. Monte España 300 mts al Norte
Apartado Postal 4598
Managua
Nicaragua
Tel.: 00505 2786981
Fax: 00505 2678169
Email: salmon@cira-unan.edu.ni

Corrales Pérez, D.
(UNAN)

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
Centro para la Investigación de los Recursos Acuáticos
de Nicaragua (CIRA)
Hosp. Monte España 300 mts al Norte
Apartado Postal 4598
Managua
Nicaragua
Tel.: 00505 2786981
Fax: 00505 2678169

PERU

Benavent, Ignacio

Universidad de Piura (UDEP)
Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería
Sanitaria
Avenida Ramón Múgica 131
Urb. San Eduardo
Apartado Postal 353
Piura
Perú
Tel.: 0051 74 304308
Fax: 0051 74 304308
Email: ibenaven@udep.edu.pe

Chávez Sernaque, Ana María

Universidad de Piura (UDEP)
Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería
Sanitaria
Avenida Ramon Mugica 131
Urb. San Eduardo
Apartado Postal 353
Piura Perú
Tel.: 0051 74 304308
Fax: 0051 74 301308
Email: amchavez@udep.edu.pe

Otiniano Nanez, Jaime

Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes
Panamericana Norte Km 4,5
Tumbes
Peru
Tel.: 0051 72 525356
Fax: 0051 72 525356
Email: pebptdi@terra.com.pe

Sebastián Calvo, Carlos Raúl

Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN)
Oficina Técnica de la Autoridad Nacional
Avenida Canaval Moreyra 425, Oficina 92
Lima 27
San Isidro
Perú
Tel.: 0051 1 4885050
Fax: 0051 1 4422330
Email: csebastian@ipen.gob.pe

Valencia Herrera, Jacinto

Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN)
Dirección de Aplicaciones Nucleares
Avenida Canadá 1470
Apartado 1687
Lima 41
Perú
Tel.: 0051 1 4885050 243
Fax: 0051 1 2251709
Email: jvalencia@ipen.gob.pe

URUGUAY

Araujo, Daniel

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP)
División Suelos y Aguas
Garzón 456
Montevideo, Uruguay
Tel.: 00598 2 3052778
Fax: 00598 2 3055307
Email: duma@adinet.com.uy

Carballo, Ernesto

Programa de Manejo de Recursos Naturales y
Desarrollo del Riego
Corrito 315 Piso 1
Montevideo, Uruguay
Tel.: 00598 2 9154392
Fax: 00598 2 9154399
Email: beatrize@prenader.gub.uy

Carrión, Roberto

Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM)
Dirección Nacional de Minería y Geología
(DINAMIGE)
Hervidero 2861
Casilla de Correo 11800
Montevideo, Uruguay
Tel.: 00598 2 2001951
Fax: 00598 2 2094905
Email: dinamige@adinet.com.uy

de los Santos, Jorge

Universidad de la República
Facultad de Ingeniería
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería
Ambiental
Julio H. y Reissig 565
Casilla de Correo 30
11300 Montevideo
Uruguay
Tel.: 00598 2 7113386
Fax: 00598 2 7115446
Email: jedls@fing.edu.uy

Odino Moure, María del Rosario

Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM)
Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear
(DNETN)
Mercedes 1041, 2do. Piso
11.100 Montevideo
Uruguay
Tel.: 00598 2 2001951 164
Fax: 00598 2 2001951 143
Email: r.odino@dinaten.miem.gub.uy

Pacheco Valerio, Rubén Fernando

Consortio Guaraní
Patria 566
Montevideo
Uruguay
Tel.: 00598 2 7105133
Fax: 00598 2 7105133
Email: fpacheco.csag@gmail.com.uy

Postiglione Mild, Mary

Ministerio de Transportes y Obras Públicas (MTOB)
Dirección Nacional de Hidrografía
Rincón 575 - Segundo Piso
11.000 Montevideo
Uruguay
Tel.: 00598 2 9167522 20162
Fax: 00598 2 9164667
Email: mpostig@adinet.com.uy

Roma Zóboli, María Teresa

Obras Sanitarias del Estado
Carlos Roxlo 1275
11200 Montevideo
Uruguay
Tel.: 00598 2 19521922
Fax: 00598 2 19521901
Email: mtroma@adinet.com.uy