

Hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible del recurso hídrico

José Luis Peralta Vital	e-mail: peralta@cphr.edu.cu	(1)
Reinaldo Gil Castillo	e-mail: gil@cphr.edu.cu	(1)
Cristina Dapeña Dapeña	e-mail: dapennacris@yahoo.com.ar	(2)
Lourdes Valdez González	e-mail: lourdes@hidraulicos.cu	(3)
Jorge Olivera Acosta	e-mail: yoyi@iga.cu	(4)
Yilian María Morejón Miranda	e-mail: yilian@ucp.pr.rimed.cu	(5)

- (1) Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR), Guanabacoa, Habana.
- (2) Instituto de Geo-cronología y Geología Isotópica (INGEIS), Fac. de Ciencias Exactas y Naturales, Univ. de Buenos Aires, Argentina.
- (3) Empresa de Investig., Proyectos e Ingeniería La Habana (EIPHH), Habana.
- (4) Instituto de Geofísica y Astronomía (CITMA), La Coronela, La Lisa, Habana.
- (5) Dirección Provincial de Suelos y Fertilizantes, Pinar del Río.

RESUMEN

La gestión y protección del agua subterránea, establece una utilización planificada del acuífero, sin causar daños en calidad y cantidad; considerando los factores sociales y económicos del entorno. Se caracterizó mediante el uso de las técnicas nucleares (hidrología isotópica), el acuífero kárstico de la sub-cuenca Artemisa-Quivicán, el cual sustenta la producción alimenticia de la provincia Artemisa y la Habana. Para ello se desarrollaron 3 etapas investigativas: el diseño y definición de la red optimizada para el monitoreo isotópico y fisicoquímico en el agua subterránea y superficial; la caracterización isotópica (tritio, oxígeno disuelto, deuterio) y fisicoquímica (macro-componentes químicos, parámetros físicos y de calidad) del agua de la sub-cuenca y de las precipitaciones registradas en la región y la identificación de las posibles fuentes de contaminación en la sub-cuenca.

Palabras clave: hidrología isotópica, hidroquímica, isótopos.

Isotopic hydrology, nuclear tool for sustainable management of water resources

ABSTRACT

Management and protection of the ground water requires a planned use of the aquifer, considering the social and economic factors of the environment without causing damages in quality and quantity. The karstic aquifer of the sub-basin Artemisa-Quivicán, which supports food production for Artemisa and Havana counties, has been characterised through the nuclear techniques application (isotopic hydrology). Three investigation stages were developed: the design and definition of the optimized network for the isotopic and physicochemical monitoring of ground and surface waters; the isotopic characterization (tritium, dissolved oxygen, deuterium) and physicochemical characterization (chemical macro-components, physical and quality parameters) of the sub-basin water and of registered precipitations in the region; and finally the identification of the possible contamination sources in the sub-basin.

Keywords: isotopic hydrology, hydrochemical, isotopes.

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son lugares muy favorables para grandes asentamientos humanos, y para la ubicación de explotaciones agrarias intensivas y núcleos industriales, por ello la necesidad de agua es alta, principalmente en época estival, y no suele cubrirse con abastecimientos superficiales por lo que se recurre a la extracción intensiva del agua subterránea. Esta situación hidrodinámica tiene graves repercusiones socio-económicas en zonas costeras, pues se traduce en un avance de la zona de mezcla agua dulce - agua de mar y de la cuña salina tierra adentro, con la progresiva salinización del agua subterránea. Este proceso produce una degradación irreversible, tanto de la matriz del acuífero como del agua subterránea, siendo uno de los principales problemas hidrogeológicos en Cuba debido a que la mayoría de los acuíferos cubanos (80 %) son kársticos y costeros, en relación hidráulica con el mar y distribuidos en prácticamente la totalidad de la isla.

La creciente preocupación por evaluar los impactos de una determinada actividad humana en el medio y el hombre, ha potenciado el desarrollo de diferentes metodologías para determinar el posible riesgo. La esfera nuclear, con el desarrollo y uso de la hidrología isotópica, como herramientas de estudio (uso de los radionúclidos naturales de los elementos agua y suelo), combinadas con técnicas no nucleares (geoquímica, etc.), aportan entre otras, la posible estimación y valoración de los impactos ante los fenómenos de degradación de los recursos hídricos. Estas herramientas de análisis brindan valiosa información sobre las fuentes, el movimiento y la contaminación de las aguas subterráneas en los ríos, lagos y cuencas (AMA-CPHR 2010).

El trabajo muestra resultados de 3 años logrados en el marco de un Proyecto I+D del Programa Ramal Ambiental (Protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible cubano), el cual responde al Sub-Programa III (Gestión de los recursos) (Dapeña et al. 2010). Los resultados tributan además a la solución de 2 de los 5 problemas fundamentales del medioambiente dados por el CITMA (contaminación de las aguas terrestres y marinas; pérdida de la diversidad biológica), ya que apoyan a la toma de decisiones y establecimiento de estrategias para la mejora de los ecosistemas y la calidad de vida general en la región estudiada. Por otra parte esta investigación, contribuyen a optimizar la gestión más segura y sostenible de los recursos hídricos de la sub-cuenca subterránea costera Artemisa-Quivicán, aportándole información técnica actualizada, la cual permite al principal gestor (Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Ciudad de la Habana), tomar las medidas necesarias para minimizar la contaminación ya existente, evitar la sobreexplotación, el consumo excesivo y el agotamiento de las fuentes de abasto.

TÉCNICAS EMPLEADAS Y ÁREA DE INTERVENCIÓN

La hidrología isotópica, utilizada en los estudios relacionados con los recursos hídricos, son herramientas muy actuales y constituyen métodos adecuados para obtener modelos conceptuales fenomenológicos; son un instrumento de validación de otras técnicas hidrogeológicas, y tienen probada eficacia en la solución de problemas relacionados con calidad del agua, interconexiones hidráulicas, mezclas de agua, profundidad de circulación, o localización de recargas y de fuentes de contaminación. Las técnicas nucleares basan su empleo en el ciclo hidrológico. La hidroquímica, al proveer información sobre la distribución de los elementos y su evolución espacial y temporal en sistemas hídricos, ayuda a caracterizar los acuíferos y definir los problemas ambientales y plan de remediación. La hidrología isotópica como técnica nuclear, hace uso de los isótopos del agua (^3H ; ^{18}O , ^2H) usándolos como trazadores naturales y haciendo

además parte de la hidroquímica, su combinación es indispensable para estudios hidrogeológicos. Los elementos disueltos como los isótopos del agua, permiten tener información sobre la renovación de las aguas en los acuíferos (recarga), identificación de aguas antiguas (origen y edad del agua), interconexiones hidráulicas entre varios acuíferos, mezcla de aguas de origen diferente, hidrodinámica de los acuíferos (flujos y edad), intrusión de aguas marinas en acuíferos costeros, vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, etc. Con el objeto de caracterizar las aguas de esta sub-cuenca, se realizó un monitoreo mensual durante un año, en 16 puntos de muestreo (13 pozos, 1 río, 1 pluviómetro, agua de mar), comenzando las campañas de muestreo a partir del mes de marzo de 2008 hasta marzo de 2009.

En los territorios de las provincias de Artemisa y la Habana, más del 85 % del agua que se explota es extraída de fuentes subterráneas. A su vez, más del 94 % del volumen total del agua destinada a los acueductos que abastecen a la población en ambas provincias, es de origen subterráneo. Una de las fuentes principales de abasto de agua es precisamente la sub-cuenca Artemisa-Quivicán, perteneciente a Cuenca Sur, ubicada en la provincia de Artemisa. La sub-cuenca subterránea Artemisa-Quivicán (HS3), está ubicada en la parte central del extremo Sur de la provincia Artemisa, pertenece a la denominada Costera Sur o Cuenca Sur (HS); situada en las coordenadas Norte 316.912-348.095 y Este 313.018-317.986 con una extensión superficial aproximada de 1 041 km² (ver figura 1).

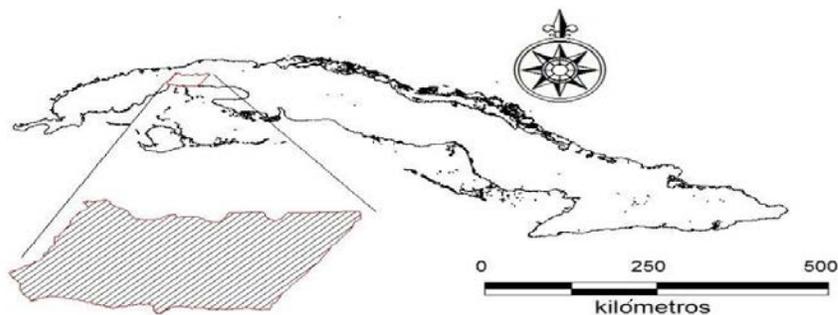


Figura 1. Mapa de localización de la sub-cuenca subterránea Artemisa-Quivicán

Para el logro de los objetivos propuestos, fueron evaluados los parámetros químicos e isotópicos que son referencia de esta técnica nuclear (hidrología isotópica) (Dapeña et al. 2010; Hernández 1991). En la tabla 1 se sintetiza la relación de estos parámetros químicos e isotópicos y la información principal de su aporte en el estudio.

OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE MONITOREO DEL AGUA EN LA SUB-CUENCA

De un primer análisis se evidencia la necesidad de tomar muestras de agua representativas tanto en la superficie (río y mar), en el subterráneo (pozos) como en las precipitaciones (pluviómetro). Los puntos seleccionados deben garantizar posibilidades estructurales y técnicas para realizar un muestreo mensual y hasta al menos 1 año (Dapeña et al. 2010; Hernández 1991; Peralta et al. 2006).

Puntos de muestreo del agua subterránea

Existe una población total de 96 pozos y esta se delimitó atendiendo a las características geológicas de la zona, a las condiciones reales de su estado técnico y función que cumplen en la

red nacional de monitoreo, por comprometer directamente la posibilidad del muestreo (obstrucción, accesibilidad por estructura en la boquilla, diferencia de diámetro y profundidad).

Tabla 1. Parámetros químicos e isotópicos más utilizados y sus principales características

Parámetros químicos e isotópicos	Observaciones
Iones mayoritarios y parámetros físico-químicos	Incluye: Cl^- , Na , K , Ca^{2+} , Mg^{2+} , y los compuestos HCO_3^- , SO_4^{2-} y NO_3^- . El pH , conductividad y temperatura. Caracterizan tipos de agua, establecen proporciones de mezclas, contaminación, profundidad de flujo, etc.
Elementos minoritarios y trazas	Restantes elementos del sistema periódico, incluidos compuestos orgánicos. Complementan la caracterización y el origen del agua.
Isótopos estables (^{18}O y 2H)	Junto al tritio, son trazadores perfectos de la molécula de agua. Se utilizan en la caracterización de aguas, determinación de su origen y mezclas, junto con métodos hidroquímicos convencionales.
Isotopo radiactivo (3H)	Como trazador, identifica recarga, velocidad de flujo, identificación de flujo en fracturas y mezclas con aguas antiguas. Como isótopo producido artificialmente, se utiliza en la datación de aguas posteriores a 1952.

De acuerdo con esta premisa y con el objeto de lograr muestrear el agua subterránea en el pozo, se adoptaron los siguientes criterios de selección: gran profundidad la cual permitirá obtener la presencia de agua en el pozo; buenas condiciones estructurales; existencia de suficientes datos históricos y distribución espacial.

Reduciendo la población a 54, se determina la muestra probabilística (número mínimo de pozos de muestreo de agua subterránea), que aseguren un error estándar menor de 0,08 (fijado por los autores), siendo la población de 54 pozos. Se determina el tamaño de la muestra atendiendo a la diferencia cuadrática de las varianzas de la muestra y de la población. Se hace el ajuste y se calcula finalmente el tamaño de la muestra siguiendo ecuaciones estadísticas establecidas (Peralta et al. 2007). De acuerdo con la ubicación del pozo y las características hidrogeológicas de la formación geológica, se definió una profundidad de muestreo en intervalo de 2,5 a 3 m, a partir del espejo de agua subterránea en el pozo.

Los resultados mostraron la necesidad de al menos 11 pozos, para la representación del muestreo del agua subterránea, siendo seleccionados 13 pozos: pozo “Albertina”(1); pozo “San Agustín”(2); pozo “Güiro Marrero” (3); pozo “Fajardo” (4); pozo “Amaro” (5); pozo “Santa Ana” (6); pozo “Rancherita” (7); pozo “El Punto” (8); pozo “Álvaro Barba” (10); pozo “San Antonio de los Baños” (11); pozo “Sotolongo Díaz” (13), pozo “El Junco (15) y el pozo “Camacho” (16), ver figura 2.

Punto de muestreo de las precipitaciones y el agua de mar

Se eligió como punto de muestreo de agua de mar, la playa “Cajío” (punto 9). La toma de la muestra fue seleccionada a partir de los 2 km mar adentro, con el objeto de evitar incertidumbres con la contaminación antrópica. De los 216 pluviómetros existentes en la red provincial de Artemisa, por orden de prioridad, fue elegido el pluviómetro H-268 (punto 14), ubicado en Quivicán.

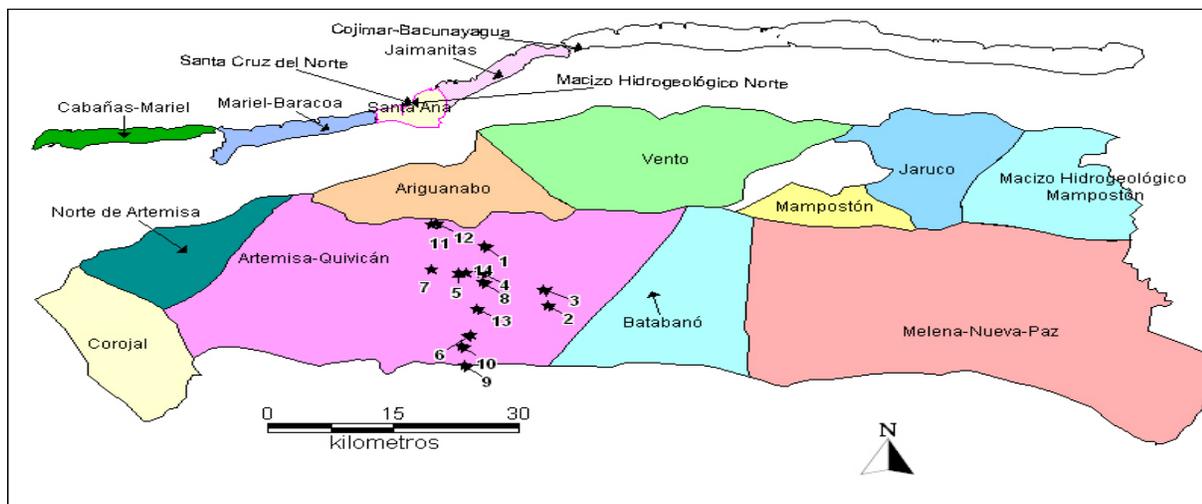


Figura 2. Mapa esquemático de los 16 puntos de muestreo en la red optimizada (vista regional).

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LAS AGUAS EN LA SUB-CUENCA. EVALUACIÓN DE POSIBLES FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Se definieron los parámetros químicos según determinados indicadores de cambio; *Salinidad*: Cl, CE (conductividad eléctrica), SO_4 , STD (sólidos totales disueltos), Mg/Ca , $\delta^{18}O$, δ^2H ; la *Acidez y estado de oxidación-reducción*: pH, HCO_3 , oxígeno disuelto; la *Radioactividad*: Tritio (3H); la *Contaminación agrícola*: NO_3 , SO_4 , K/Na , pesticidas y herbicidas y la *Contaminación por intrusión salina y urbana*: Cl, HCO_3 , hidrocarburos, solventes orgánicos. Atendiendo a estos indicadores, se establece la determinación de los análisis: Parámetros físico-químicos (pH; CE ($\mu s/cm$); STD); Aniones (CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{1-} , NO_2^{1-}) y Cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+}).

El impacto de los asentamientos humanos y la acumulación de residuos se hacen evidentes en la calidad local del agua subterránea. Muchos compuestos químicos ingresan al terreno, pero el deterioro de la calidad del agua puede ser evaluado a través de aquellos constituyentes que son más móviles. Por ello, el Cl y HCO_3 constituyen indicadores primarios de contaminación de localidades, ciudades y vertederos de residuos. Los parámetros químicos del agua tratados en los gráficos de Piper, Stiff y Scholler dados por el software AQUACHEM, muestran una tendencia al cambio del agua que avanza hacia al Sur. Las aguas clasifican como del tipo bicarbonatado-cálcica; excepto los Pozos 10, P6 y P2 los cuales muestran evidente mezcla con agua de mar, clasificando como clorurado-sódica y sulfatado-clorurado-sódica. Los resultados comprueban estar en presencia de un tipo de acuíferos costero consolidado carbonatado. Los gráficos de Schoeller-Berkaloff, confirman en las aguas subterráneas el predominio de los iones calcio y bicarbonato con cloruro asociado. Nuevamente las muestras P10, P6 y P2 muestran una composición intermedia y un notable aumento de los iones cloruro, sodio y magnesio, confirmando la mezcla con agua de mar que se corrobora en el gráfico de Stiff.

Se toman los valores obtenidos en laboratorio e in situ, relacionados con los períodos de seca y lluvia. Atendiendo a las características del punto de monitoreo (ubicación y uso del agua), se hace una evaluación y comparación de los valores obtenidos con los límites deseables y admisibles dados en las normas cubanas. Para agua potable se utiliza (NC-93-02:1985, anteproyecto NC-93-02:1997); con los sistemas de abastecimiento público de agua (NC-93-

03:1985); con las fuentes de abastecimiento de agua (NC-93-11:1986) y con los vertimientos de aguas residuales a las aguas superficiales y al alcantarillado (NC-27:2012). Para evaluar las posibles fuentes contaminantes, se tuvieron en cuenta los factores naturales (intrusión marina, etc.) y los factores antrópicos (73 instalaciones diferenciadas en su función social), las cuales son reales focos de contaminación del agua subterránea en el área de estudio, atendiendo a las características de solubilidad y permeabilidad de la roca (ver figura 3).

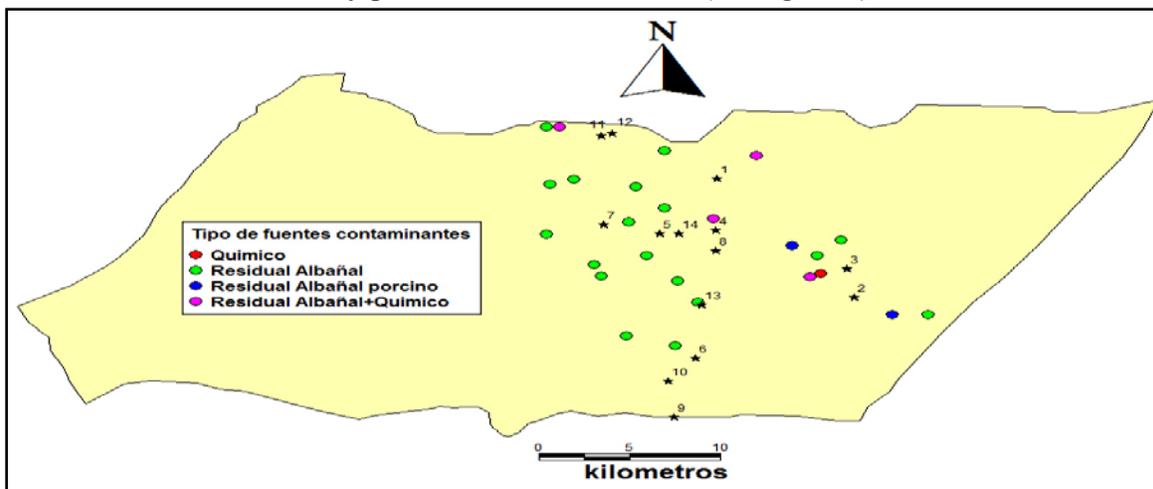


Figura 3. Mapa temático vinculado con los posibles focos contaminantes

CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA DE LAS AGUAS EN LA SUB-CUENCA

Isotopo radiactivo (^3H -Tritio)

Los actuales niveles de tritio reportados en lluvias en Cuba son muy bajos, por esto se siguieron los protocolos actuales del OIEA para los casos de reducción de inventarios de tritio a nivel global. Se trabajó con muestras compuestas de los 6 meses del período húmedo (mayo-octubre 2008), para cada uno de los puntos de muestreo. Los valores de tritio en las muestras van desde 2,8 UT (pozo 7) hasta 1,4 UT (pozo 11). Se evidencian valores de tritio relativamente altos en la parte Oeste del área estudiada, vinculándose a zonas de posibles recargas. No se evidencia la influencia de intrusión salina en los puntos cercanos a la costa, lo cual pudiera deberse a mezclas con aguas muy recientes. Con el objeto de aplicar la técnica del tritio (^3H) a la datación de aguas subterráneas se emplearon los análisis semicuantitativo y cuantitativo.

Interpretación semicuantitativa

Esta interpretación puede ser válida cuando la información disponible es escasa, se conoce poco el funcionamiento del acuífero, o los niveles presentes de tritio son bajos (como en el actual estudio). En este caso, este tipo de aproximación puede ser empleada tomando en cuenta que los datos de tritio medidos han sido sólo de la temporada húmeda. Esta aproximación establece los siguientes intervalos para la clasificación de la recarga a las aguas subterráneas en las zonas costeras.

Para datar las aguas subterráneas dados los bajos valores de ^3H , se hace un análisis semicuantitativo. Esta aproximación establece intervalos para clasificar la edad de las aguas subterráneas: Tritio (0): aguas sub-moderna, edad superior a 100 años, sin recarga reciente; Tritio (0-5): edad superior a 50 años o mezclas de aguas sub-modernas y con recarga reciente;

Tritio (5-7): edad moderna o reciente de 3 a 5 años; Tritio (7-20): pico termonuclear dominante; Tritio (> 20): tritio artificial asociado a posible zona de contaminación, basureros, residuos industriales.

Según esta premisa, los registros actuales en los puntos de muestreo no superan las 3 UT, lo cual es consecuencia, fundamentalmente, de la caída en los valores de tritio presentes en las precipitaciones (fundamental vía de alimentación). Acorde con esta clasificación, se considera un acuífero con mezclas de aguas sub-modernas y de recarga reciente (muy lógico cuando se tiene en cuenta la geología de la zona de estudio). En el acuífero evaluado, conociendo sus condiciones hidrogeológicas, es evidente que lo más probable es la presencia de mezclas de aguas de diferentes edades, algo común en acuíferos carsificados. Este indicador del radionúclido del agua, confirma el comportamiento lógico de la geología existente en la zona de estudio. Se señala que este fenómeno fue también visto en estudios anteriores realizados en la cuenca Almendares-Vento (AMA-CPHR 2010).

Interpretación cuantitativa

Para la realización de este análisis se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en los estudios relacionados con la hidrología isotópica realizados anteriormente en la Cuenca Sur y además se aplicaron metodologías estandarizadas para la datación de aguas, los cuales permitieron obtener estimaciones de tiempos de residencia. En el área de estudio se realizó, a mediados de los años 90, una investigación que utilizaba las técnicas nucleares, incluyendo el empleo del tritio. Los valores medidos, superiores a los actuales, fluctuaron entre 3,1-5,5 UT, sólo en una cala cercana a la línea de costa se obtuvo un valor de 0,6 UT posiblemente asociado con la mezcla con agua de mar. En el trabajo antes mencionado se estimó la función de entrada del tritio tomando en cuenta los registros de diferentes estaciones y modelos de estimación. Para los años 90, fecha del estudio, las concentraciones de tritio en las precipitaciones se mantenían alrededor de las 3 UT, también superiores a las actuales existentes en la zona.

Se empleó para datar las aguas el modelo exponencial, el cual presentó un rango de tiempos de renovación entre 5-20 años. Se concluyó que este modelo no explicaba la presencia de concentraciones superiores en el acuífero a las estimadas, las que se supusieron asociadas con fuentes de contaminación atmosféricas cercanas a la región. De forma general se decidió que no era posible datar con el tritio la zona, aunque se afirmó que las altas concentraciones de tritio se vinculaban con la presencia de aguas muy recientes. Posteriormente, al correlacionar las concentraciones de tritio con la conductividad eléctrica, calcularon el tiempo medio de tránsito del agua mediante la ecuación de decaimiento radiactivo, obteniendo aproximadamente 6,2 años. Se afirma en el trabajo que este valor sólo debería estar asociado con el tiempo de tránsito del agua subterránea desde la zona de infiltración hasta la zona de descarga.

Isotopos estables (^{18}O y ^2H)

La ocurrencia de los isótopos estables (^{18}O y ^2H) presentes en las aguas meteóricas muestran una fuerte correlación con la temperatura, lo que permite, conociendo la variación estacional presente, poder datar aguas subterráneas. Mediante el registro de las variaciones estacionales de ^{18}O o ^2H en las lluvias y en el agua subterránea, puede ser establecido el tiempo medio de residencia. La lluvia de entrada se puede aproximar a una función sinusoidal y puede ser expresada como función del tiempo en ecuaciones. La amplitud de las variaciones estacionales del ^{18}O y ^2H son disminuidas o atenuadas durante la recarga del acuífero, mientras más se mantengan en las aguas subterráneas estas variaciones estacionales, menores son los tiempos medios de residencia. La disminución de las variaciones estacionales se asocia con los

parámetros físico-hidráulicos de la zona no saturada o del acuífero. La tasa de atenuación es proporcional a la longitud de recorrido del flujo y al tiempo de viaje. De esta forma el tiempo de viaje puede ser conocido.

En esta investigación se tomaron, de la información isotópica disponible, los datos del comportamiento del ^{18}O y ^2H en las precipitaciones del año 2008, la cual evidencia la distribución del ^{18}O y ^2H para el año 2008 y se compararon con los datos obtenidos para el acuífero en los meses de febrero, septiembre y octubre. La comparación evidencia la atenuación de la variabilidad estacional asociada con el paso del agua meteórica al acuífero, llegando hasta reducciones de 7‰ para el ^{18}O y alrededor de 13‰ para el ^2H . Los puntos de ambos isótopos correspondientes con la lluvia de los meses septiembre y octubre no se tomaron en cuenta en el análisis debido a su comportamiento anómalo. Estos valores se van fuera de la tendencia general al compararlo con los registros en la lluvia para la estación “La Quebrada”, ubicada a 13 km al Norte. Siguiendo el desarrollo de la metodología se estimaron los valores de amplitudes de las curvas del comportamiento ^{18}O y ^2H en las precipitaciones y los registros en el acuífero. Los valores obtenidos de tiempo medio de residencias según los 2 isótopos, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Tiempos de residencia obtenidos

Isotopos	Tiempo de residencia estimado (años)
^{18}O	3,85
^2H	2,88

Los tiempos obtenidos están en el rango de 3-4 años, son aproximados y no se asocian con un punto en específico. Estos resultados se vinculan con el tiempo de tránsito total del agua subterránea desde la zona de infiltración, ubicada en la zona norte del acuífero, hasta la zona de descarga en la costa y se aproximan a los valores obtenidos por el análisis de tritio para los puntos cercanos a la zona de descarga de la sub-cuenca.

Datos isotópicos de las precipitaciones

Para determinar la evaluación de la función de entrada al sistema se analizó la composición química e isotópica de la precipitación y para ello se utilizaron los datos de la estación H-268 (punto 14), durante el período febrero a octubre 2008 (períodos húmedo y seco). Los registros de composición isotópica de precipitación en la zona son escasos, razón por la cual no se puede elaborar una recta meteórica local. Como dato adicional de la función de entrada se considera la composición isotópica del agua del río Ariguanabo (febrero y noviembre 2008). No se encontró correlación entre la composición isotópica y la cantidad de precipitación en las muestras disponibles. En la tabla 3 se presentan las lluvias analizadas conjuntamente con el exceso de deuterio (d) y la cantidad de precipitación. Las lluvias entre febrero y agosto muestran valores muy enriquecidos ($\delta^{18}\text{O}$ entre -1,2‰ y -2,5‰ y $\delta^2\text{H}$ entre 1‰ y -11‰), mientras que las de los meses de septiembre ($\delta^{18}\text{O} = -7,3‰$; $\delta^2\text{H} = -49‰$) y octubre ($\delta^{18}\text{O} = -4,6‰$ y ‰; $\delta^2\text{H} = -24‰$) son más empobrecidas.

Para la posterior interpretación isotópica se calculó el promedio ponderado $\delta^{18}\text{O} = 2,8‰$ y $\delta^2\text{H} = -13‰$ considerando los datos disponibles dados en la tabla 3. Los excesos de deuterio (d) de estas precipitaciones tienen valores en general <10 para el período lluvioso (mayo-octubre). La figura 4, muestra un diagrama convencional $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ con las lluvias individuales del 2008 así como el promedio ponderado, la recta de aguas meteóricas global y el río Ariguanabo.

Para el análisis isotópico se seleccionaron las muestras de los meses de febrero y octubre (períodos húmedo y seco). Las muestras corresponden a agua subterránea y superficial (río

Ariguanabo) (ver figuras 5, 6 y 7 y la tabla 4). En el caso del agua de mar se pudo obtener una sola muestra en enero 2009, por lo que se utilizaron además datos de trabajos anteriores. En cada caso se calculó el exceso de deuterio, cuando d es <10 indica posibles procesos de evaporación (ver tabla 4).

Tabla 3. Composición isotópica precipitaciones- estación H-268 (año 2008)

Mes	$\delta^{18}O^{\text{‰}} \pm 0.2$	$\delta^2H^{\text{‰}} \pm 1$	$d^{\text{‰}}$	mm
Febrero	-1,2	1	10	24,3
Marzo	-1,2	1	11	93,9
Mayo	-2,2	-9	8	177,6
Junio	-1,6	-4	8	373,4
Agosto	-2,5	-11	9	150,1
Septiembre	-7,3	-49	9	128,4
Octubre	-4,6	-24	13	127,1

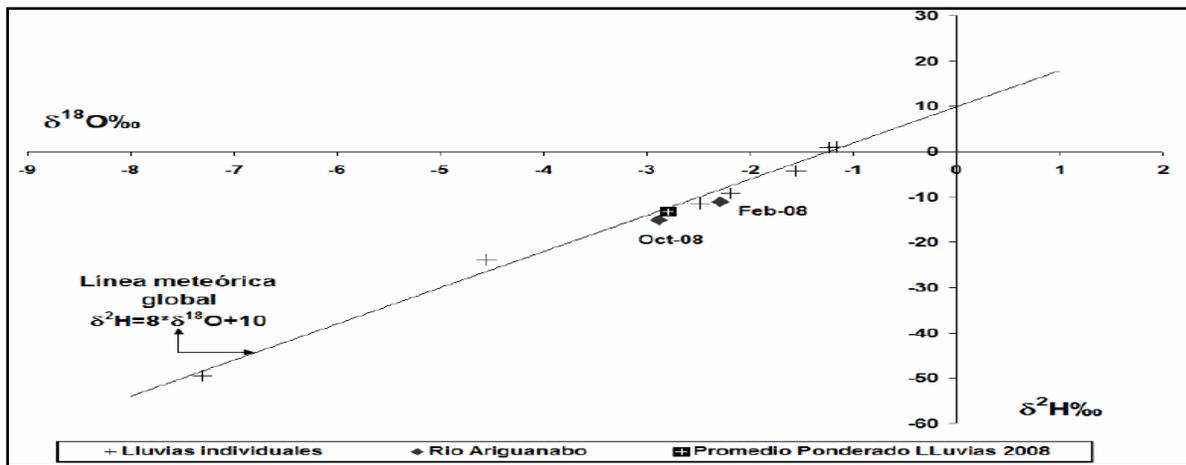


Figura 4. δ^2H vs. $\delta^{18}O$, línea de aguas meteóricas mundial, lluvias individuales 2008, promedio ponderado lluvias 2008 y río Ariguanabo

Tabla 4. Análisis isotópicos de las muestras

Muestra	$\delta^{18}O$	δ^2H	d	$\delta^{18}O^{\text{‰}}$	$\delta^2H^{\text{‰}}$	d	Tipo
	Febrero 2008			Octubre 2008			
P1	-2,4	-13	7	-3,0	-16	8	Subt.
P2	-3,4	-18	9	-3,7	-19	11	Subt.
P3	-3,2	-18	8	-3,2	-18	7	Subt.
P4	-2,6	-14	7	-3,0	-16	8	Subt.
P6	-2,8	-14	8	-3,4	-20	7	Subt.
P7	-3,1	-17	8	-3,3	-18	8	Subt.
P8	-2,6	-13	8	-3,0	-14	10	Subt.
P8b (zona de mezcla)				-2,4	-15	4	Subt.
P10	-2,5	-14	6	-2,2	-15	3	Subt.
P11	-2,7	-14	8	-3,2	-16	10	Subt.
P12	-2,3	-11	7	-2,9	-15	8	Subt.
P13	-2,6	-13	8	-3,1	-17	8	Subt.
P13b (zona de mezcla)				-2,6	-14	7	Subt.

Con el fin de interpretar los resultados, se graficaron los datos isotópicos en diagramas convencionales $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ (ver figuras 6, 7 y 8), donde además se representa la línea de aguas meteóricas mundial i.e: $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰}$, las lluvias individuales, el promedio ponderado de las lluvias 2008, agua de mar 2009 y los datos de agua de mar obtenidos de la literatura. Los resultados de los análisis isotópicos señalan que las manifestaciones de aguas superficiales y las aguas subterráneas son de origen meteórico. En la figura 5 se han graficado las muestras correspondientes al muestreo de febrero. El diagrama muestra pozos con mezcla de agua marina y posibles procesos de evaporación.

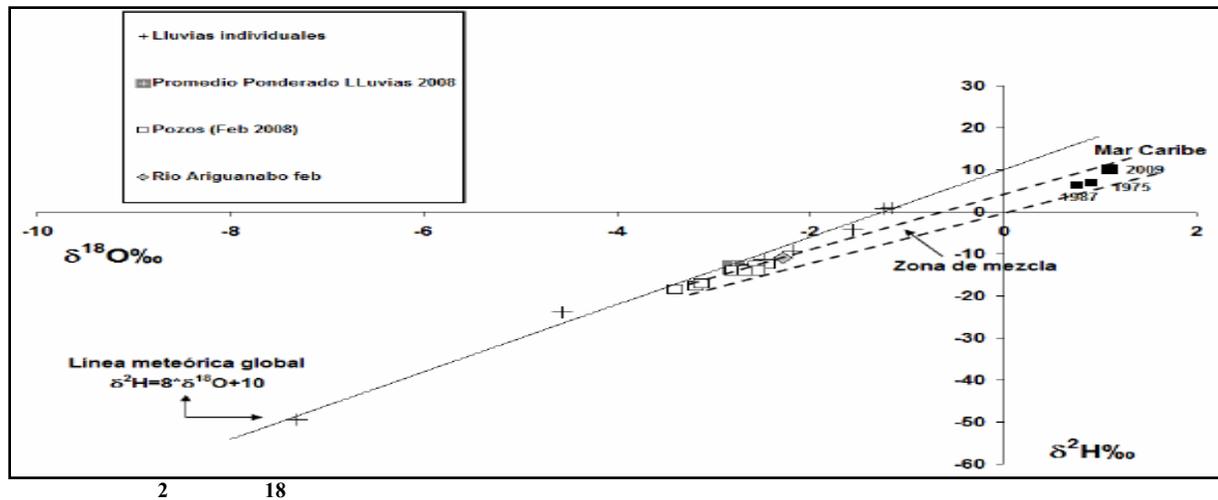


Figura 5. $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$, línea agua meteórica mundial, lluvias individuales 2008, promedio ponderado lluvias 2008, muestras de febrero analizadas, río Ariguanabo, agua de mar.

En la figura 6 se han graficado las muestras correspondientes al muestreo de octubre. Nuevamente en este diagrama se observa que hay pozos que muestran la mezcla con agua marina y, simultáneamente, posibles procesos de evaporación. Es importante confirmar la mezcla con otro elemento conservativo y en este caso se utilizan los cloruros, conjuntamente con los isótopos (en esta investigación se utilizó el ^{18}O). Los datos se representan en un diagrama Cl^- vs. $\delta^2\text{H}$ (ver figura 7) donde se observa que las muestras que podían ser mezcla en las figuras 5 y 6, se ubican en relación con su salinidad como mezcla de polos definidos. Es decir, entre el agua de mar (máxima salinidad, máximo enriquecimiento isotópico) y aguas meteóricas (mínima salinidad, mínimo enriquecimiento isotópico). La zona de mezcla ha sido representada como una banda debido a las variaciones en la composición isotópica del agua de mar y las aguas meteóricas presentes en la isla.

OBTENCIÓN DE CRITERIOS ISOTÓPICOS Y FÍSICO-QUÍMICOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN EN LA SUB-CUENCA

El empleo de las técnicas isotópicas ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, ^3H), y los análisis físico-químicos realizados, permitieron establecer los criterios isotópicos para apoyar la toma de decisiones en el manejo adecuado de los recursos hídricos de la sub-cuenca. Con el objetivo de mejorar la actual red de observación de régimen y calidad de las aguas se realizó la interpretación integral de los resultados obtenidos (isotópicos, físico-químicos, etc.). Para el análisis los principales elementos que se tomaron en cuenta, por su posible impacto a la calidad de las aguas, fueron la intrusión

salina (acuífero costero de tipo abierto) y la vulnerabilidad de las aguas a la contaminación por causas naturales y antrópicas.

Análisis de la intrusión salina

Las técnicas de hidrología isotópica tienen el potencial de identificar la presencia de mezclas con el agua de mar, apoyándose en la evaluación de las variaciones (fraccionamiento isotópico) de las especies isotópicas presentes (^2H , ^{18}O). Este proceso consiste en el reacomodo de las especies isotópicas entre las distintas sustancias o fases intervinientes, de forma que las concentraciones de las mismas resultan ser diferentes a las del estado inicial (en el agua de mar es mayor el grado de enriquecimiento isotópico que en las aguas meteóricas). Con los resultados isotópicos de los puntos muestreados en el mes de octubre, se representó $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ (figura 8), se marcó la línea meteórica global y se pudo trazar una zona de mezcla de aguas (en rojo intermitente), dentro de la cual se pudieron identificar los puntos con presencia de intrusión salina.

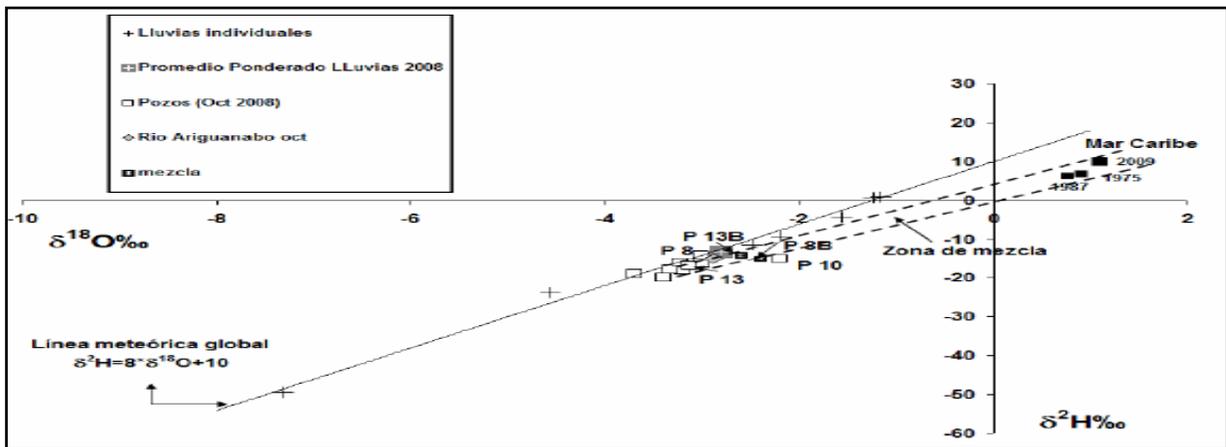


Figura 6. $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, línea de agua meteórica mundial atendiendo al promedio ponderado de lluvias caídas en la zona de estudio para el año 2008, a las muestras totales analizadas en los pozos, el río Ariguanabo y el agua de mar

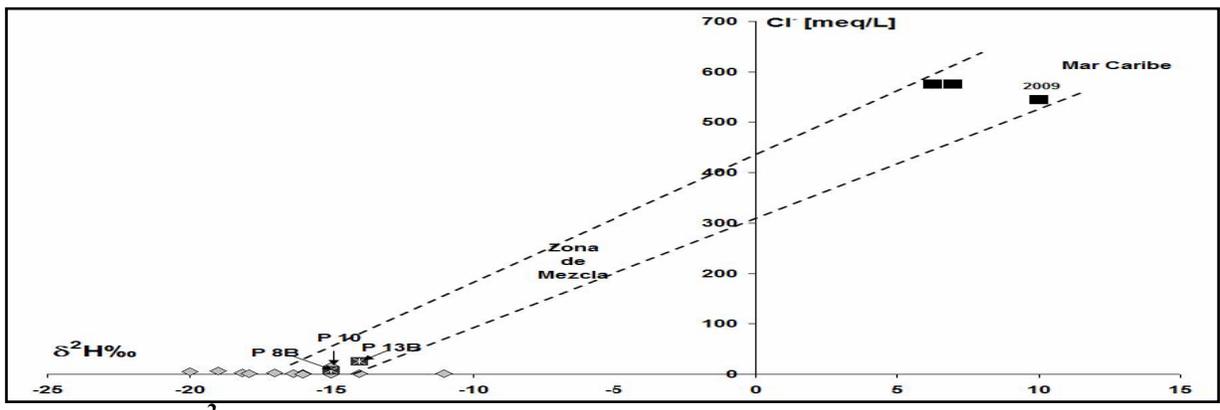


Figura 7. $\delta^2\text{H}$ vs. Cl^- , líneas de aguas meteóricas mundial, lluvias individuales

Los resultados de los análisis isotópicos señalan que las manifestaciones de aguas superficiales y las aguas subterráneas son de origen meteórico y que presentan proporciones variables de mezcla con agua de mar.

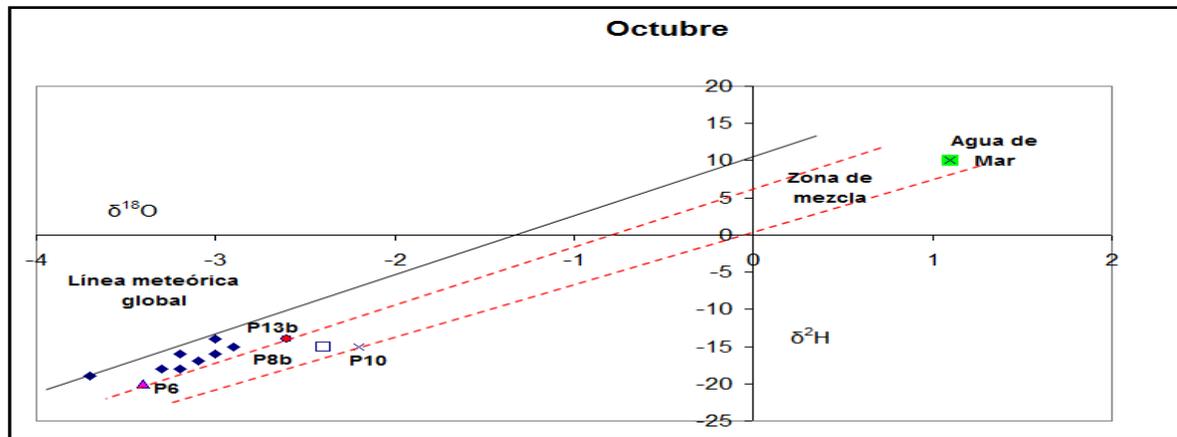


Figura 8. Detalle del gráfico $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ de los datos isotópicos del mes de octubre

Analizando los datos isotópicos en la figura 8, se logra reconocer dentro de la zona de mezcla (línea intermitente en rojo), los siguientes puntos: el pozo P10 ubicado cercano a la costa y los pozos P8b, P13b, muestreados a la profundidad donde aparece la zona de mezcla con el agua de mar. También aparece cerca del límite superior de esta zona, el pozo P6, que aunque sus valores de Cl⁻ no son los más elevados, la CE medida aparece por encima de 1000 uS/cm² y se ubica a distancias relativamente cercanas a la costa. La posición relativa de estos puntos en el gráfico, entre el agua de mar y las precipitaciones, representa los diferentes niveles de intrusión salina presente en sus aguas; según se observa en la figura 9, el de mayor por ciento de contaminación es el P10 y el de menor el P6. La relación completa es: P10>P8b>P13b>P6. Estas evaluaciones sobre las mezclas de agua presentes en el acuífero son confirmadas por los análisis físico-químicos realizados.

Los análisis físico-químicos realizados (CE y Cl⁻) confirman los puntos previamente mencionados (P10, P8b, P13b, P6) con presencia de mezclas con aguas de mar, adicionalmente se identificaron los puntos P15 y P16, muestreados a la profundidad donde también aparece mezcla con el agua de mar. Teniendo en cuenta estos resultados se obtiene un esquema de la cuña de intrusión salina en el área de estudio de la sub-cuenca. La figura 9, muestra la cuña de intrusión salina, la cual tiene una extensión Norte-Sur aproximada a los 13,7 km (evidenciada por los pozos P8 y P10) y con extensión Este-Oeste aproximada a los 18 km (evidenciada por los pozos P15 y P16).

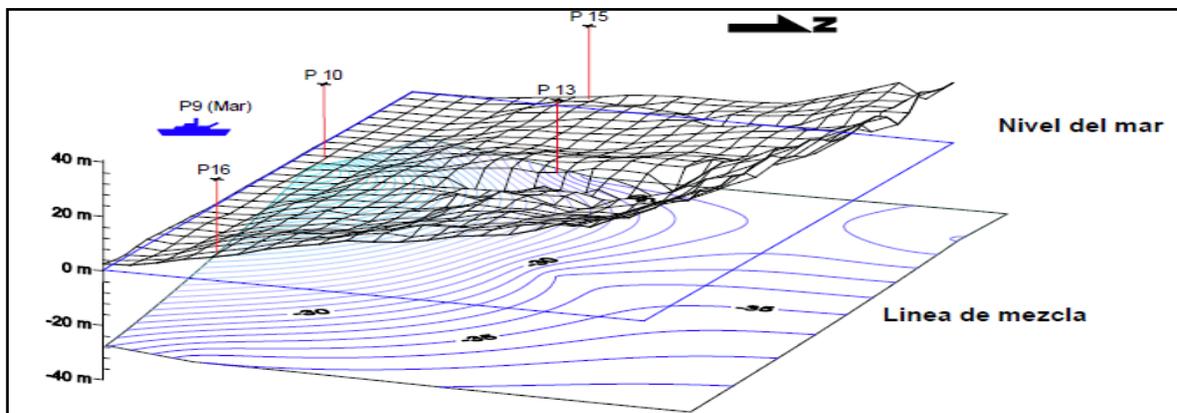


Figura 9. Esquema de la cuña de intrusión salina en el área de estudio de la sub-cuenca

Para el mejoramiento de la red de monitoreo de las aguas subterráneas, los puntos identificados (P6, P8, P10, P13) son relevantes para controlar el comportamiento de la intrusión salina en la región y en los mismos deberán controlarse los parámetros relacionados con este fenómeno; CE, STD, Cl^{1-} , Na^{1+} , K^{1+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} .

Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación

La vulnerabilidad de un acuífero es una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a impactos humanos y/o naturales. En esta investigación se evaluó la posibilidad de contaminación natural y antrópica del acuífero mediante el análisis de la vulnerabilidad, así como la evaluación de los resultados de los análisis físico-químicos de los puntos muestreados, teniendo en cuenta la presencia y posible impacto de los distintos focos contaminantes.

Se empleó la metodología GOD (**G**roundwater confinement, **O**verlying strata, **D**epth to groundwater table) utilizando las indicaciones técnicas dadas por Escolero (1992) y asumiendo los resultados de estudios anteriores en la región de estudio (Carrasco et al. 2002) para determinar la vulnerabilidad a la contaminación por la ocurrencia de eventos superficiales que posibiliten el paso de contaminantes al acuífero. Esta metodología toma en cuenta la litología, los niveles freáticos y las características del acuífero para evaluar la susceptibilidad del mismo.

Se trabajó con mapas de la cuenca para cada uno de los 3 parámetros mencionados, los mismos reciben valores entre 0 y 1 acorde con sus características en el área de estudio. Por ejemplo un acuífero semiconfinado toma el valor de 0,3, las areniscas el valor de 0,7 y las calizas 0,9. Los niveles freáticos influyen de forma inversa en la vulnerabilidad final. Para profundidades menores de 2 m su valor es 1 y si es mayor de 100 m se establece el valor de 0,4. La escala final de vulnerabilidad obtenida mediante la multiplicación de los 3 parámetros va desde insignificante (0,1) hasta extrema (de 0,7 a 1).

En el área de estudio se encuentran diferentes tipos de focos contaminantes puntuales y difusos (ver figura 3), que pueden afectar la calidad de las aguas; cuya distribución espacial puede condicionar el cumplimiento o no de las normas de calidad de agua. Como focos puntuales de contaminación aparecen residuos de animales de granjas, descargas de residuales industriales y productos químicos para la agricultura y la industria. Como focos difusos se aprecia la aplicación de fertilizantes en la agricultura, que pueden provocar altas concentraciones en el suelo y en el agua de cloruros, calcio, amonios, nitratos, fósforos, sulfatos, potasio, magnesio y manganeso. En el mapa de vulnerabilidad (ver figura 10) se destaca una zona de vulnerabilidad extremadamente alta que ocupa el 57 % del área, y una zona de alta vulnerabilidad que ocupa el 17 %; es decir, la mayoría de los puntos de muestreo están en la zona de alta vulnerabilidad, sólo el punto P10 se ubica en la zona de baja vulnerabilidad. Esto significa que el acuífero en estudio es altamente vulnerable de forma natural ante una posible contaminación y deben evaluarse cuidadosamente los posibles impactos asociados por la presencia de fuentes contaminantes.

Para evaluar la presencia de contaminación en las aguas se realizaron análisis físico-químicos y bacteriológicos. De los análisis bacteriológicos se identificó la presencia de coliformes fecales en los puntos P1, P2, P3, P7, P8 y P12, asociándose con contaminación antrópica (vertimiento y afluencia de este contaminante desde otras zonas). La presencia de nitritos está relacionada con la contaminación con residuales de la ganadería y se reportaron valores elevados en el punto P1 asociado con su ubicación en una granja ganadera. El punto P12 se ubica en el río, y durante el muestreo se evidenció la presencia de descargas de aguas albañales responsables de esta contaminación. Sobre nitratos vinculados con la contaminación con residuos de fertilizantes, sólo el punto P7 supera los límites de las normas y se vincula con la existencia de un almacén de

fertilizantes cercano. Existen valores elevados de este parámetro en los puntos P4, P3 y P8 asociados con focos difusos de contaminación por actividades agrícolas.

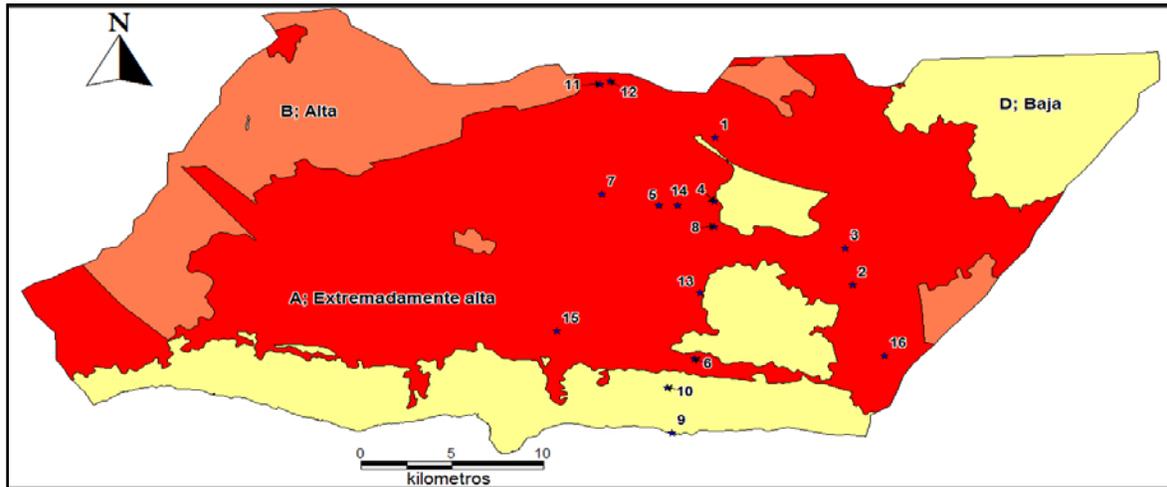


Figura 10. Mapa de vulnerabilidad de la sub-cuenca Artemisa-Quivicán

Definición de posibles áreas y zonas vulnerables a la contaminación. Evaluación de los sistemas de recarga de las aguas de la sub-cuenca

Para la definición de los puntos o áreas vulnerables a proteger dentro de la sub-cuenca, se tuvo en cuenta las características del acuífero (dinámica, áreas de recarga, etc.), la vulnerabilidad a la contaminación y adicionalmente se evaluaron las fuentes de abasto identificadas en el área durante el estudio. Con esta información se elaboró un mapa que muestra, dentro del área de estudio, las áreas propuestas a proteger (ver figura 11).

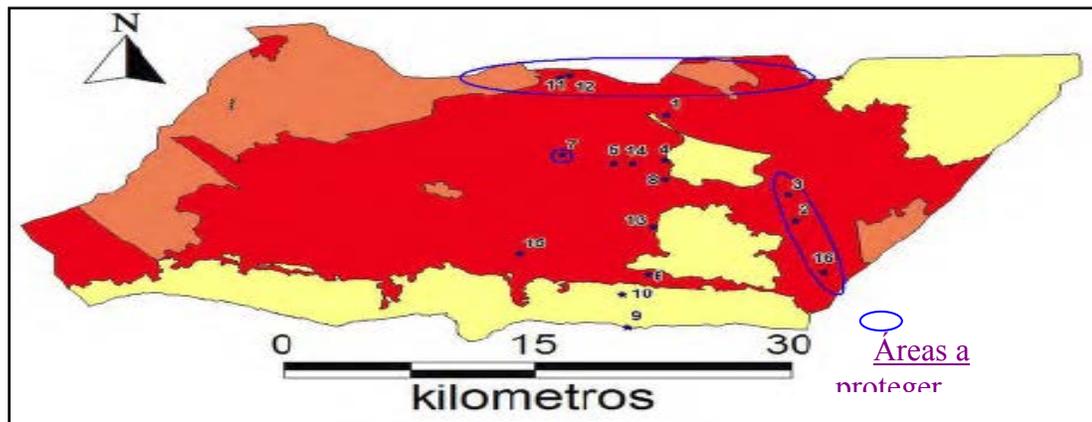


Figura 11. Ubicación de las áreas y zonas vulnerables propuestas a proteger

Apoyado en el análisis de los tiempos de tránsito determinados para el acuífero, mediante las técnicas isotópicas (^3H), se lograron confirmar e identificar zonas de recargas del acuífero (ver figura 12). Las mismas se ubican en la parte norte donde se encuentran los puntos 11 y 12 y como esta zona es la vía principal por donde el acuífero se recarga de agua fresca, son áreas muy sensibles a la contaminación.

Para estas áreas deben establecerse zonas de protección sanitaria, reduciendo el posible impacto negativo de actividad antrópica debido a su relevancia para los sistemas naturales de

reposición de la cuenca. Debe priorizarse la reducción de las descargas al río, en el punto P12 que actúa como sumidero y es una de las fuentes naturales de recarga de la sub-cuenca. En la figura 11, el área de protección se representa como una franja extendida por el norte del área incluyendo los puntos 11 y 12. Los otros puntos de interés identificados fueron el P7, P2, P3, P16, ubicados al centro y al este del área de estudio.

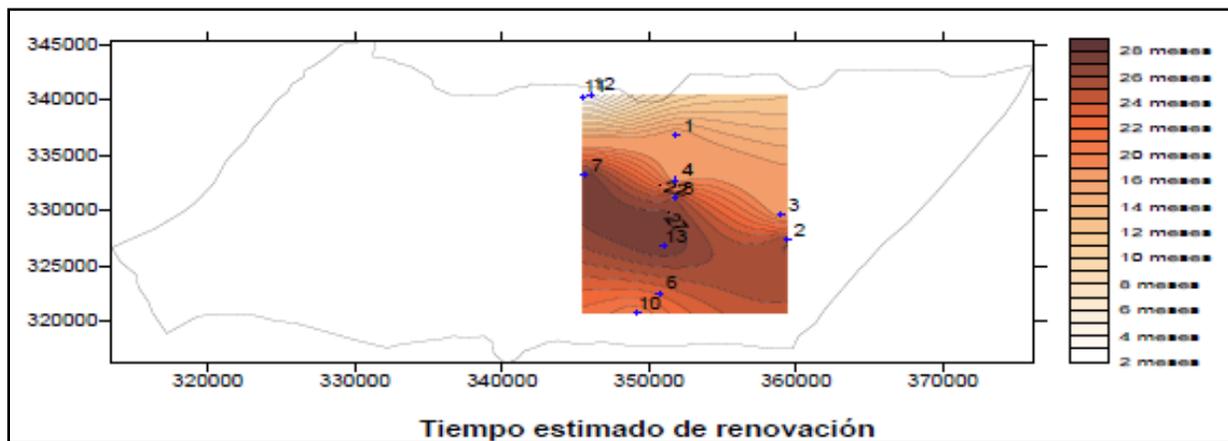


Figura 12. Distribución de los tiempos de tránsito estimados en el área evaluada

En la cercanía de estos puntos se ubican fuentes de abasto de agua para la población y la agricultura, por lo que deben definirse para ellos las zonas de protección sanitarias. En el estudio desarrollado se han definido áreas y zonas vulnerables a la contaminación. En la figura 12, debido a su alineamiento espacial, la zona de protección de los puntos P2, P3, P16 se representa como una franja alargada en la zona este de la sub-cuenca. El punto 7, vinculado con una fuente de suministro de agua para un área de gran actividad agrícola se le propone una zona de protección sanitaria circular (ver figura 11). A pesar de haber definido áreas vulnerables y priorizadas para la protección de la sub-cuenca, se debe tener en cuenta que debido a la importancia económica de esta sub-cuenca y la alta vulnerabilidad del acuífero, se deben limitar o eliminar todas las posibles fuentes de contaminación antrópica (liberaciones, descargas, etc.) en toda su extensión.

CONCLUSIONES

- Se diseña y optimiza una red de puntos de monitoreo del agua subterránea, superficial y de lluvia, para el muestreo más representativo de la sub-cuenca Artemisa - Quivicán.
- Los parámetros químicos del agua, tratados en los gráficos de Piper, Stiff y Scholler dados por el software AQUACHEM, muestran una tendencia al cambio del agua que avanza hacia al Sur. Las aguas que de forma general clasifican como del tipo bicarbonatada cálcica, varían su composición al tipo clorurada sódica, lo cual muestra evidente mezcla con agua de mar,
- Se obtienen los criterios isotópicos y físico-químicos que permiten identificar posibles zonas de vulnerabilidad a la contaminación en la sub-cuenca. Los análisis cualitativo y cuantitativo de los valores químicos y su correspondencia espacial con las instalaciones existentes, permitieron identificar fuentes de contaminación, natural (intrusión salina) y antrópica (residual albañal, residual albañal porcino y vacuno, residual albañal químico, residual por fertilizantes).

- Se confirman la existencia de una cuña de intrusión salina con extensión Norte-Sur aproximada a los 13,7 km y con extensión Este-Oeste aproximada a los 18 km. Esta cuña se profundiza en la dirección Sur-Norte, en igual medida en que aparecen los pozos más profundos de explotación y abasto a la población y la agricultura.
- La hidrología isotópica muestra ser una herramienta eficaz para la evaluación de los recursos hídricos, permitiendo con sus resultados, lograr su mejor conservación, explotación y sostenibilidad.

REFERENCIAS

- AMA-CPHR** (2010). “Aplicación de las técnicas nucleares (isotopía hidrológica) para la evaluación de los recursos hídricos de la Cuenca costera Artemisa Quivicán (Cuenca Sur). Medidas para su mejor explotación”. Proyecto Ramal Ambiental. Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR). Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada (AENTA). La Habana, Cuba.
- Carrasco H., Jiménez S. y Valcarce R. M.** (2002). “Evaluación de la vulnerabilidad de la cuenca sur de La Habana”. II Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: Caracterización y Evaluación. Ciudad de La Habana, Cuba.
- Dapeña C., Peralta J. L., Gil R., Leyva D., Ducós E., Valdes L., Olivera J., Panarello H.O., Malban L.** (2010). “Caracterización isotópica y química de la cuenca kárstica costera Artemisa Quivicán”. X Congreso Latinoamericano de Hidrología subterránea (ALHSUD). Aguas subterráneas y desarrollo sustentable de los pueblos latinoamericanos. Caracas, Venezuela.
- Escolero O.** (1992). “Metodología para evaluar la vulnerabilidad en un acuífero a la contaminación”. Comisión Nacional del Agua. México.
- Hernández R.** (1991). “Metodología de la investigación. Enfoques cuantitativos, cualitativos y mixtos”. McGraw-Hill interamericana de México, S.A. ISBN 968-422-931-3, P.E-919087654123. México.
- Peralta J.L., Dapeña C., Panarello H.O., Gil Castillo R.** (2007). “Isotope hydrology application in Cuba for assessment of water resource management in the most important Basin of Havana City”. Proceedings of the IAEA International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in Sustainable Water Resources Management. Organismo internacional de Energía Atómica (OIEA). Austria, Viena.
- Peralta J. L., Gil R., Molerio L., Leyva D., Dapeña C., Panarello H.O., Carrazana J., Pin M.** (2006). “Uso de la hidrología isotópica en la evaluación de una importante Cuenca kárstica Cubana, para la gestión sostenible de sus recursos hídricos”. VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología subterránea (ALHSUD). Asunción, Paraguay.