

ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA DE LA LAGUNA DE TAIGÜAIGÜAY, ESTADO ARAGUA

Omnain KUTOS¹ & Ramón MONTERO¹

¹Instituto de Ciencias de la Tierra, Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. Correo-e.: kutos2@yahoo.com

RESUMEN

En este trabajo fue realizado el estudio hidrogeoquímico de 18 muestras de aguas subterráneas captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, estado Aragua. Para ello, fueron medidos los parámetros pH, conductividad y temperatura; asimismo, se determinaron las especies químicas Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Li, B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba y sílice disuelta (SiO_2).

Los resultados obtenidos permitieron identificar dos tipos de aguas, a saber: $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-$ y $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-$. A su vez, los factores responsables de la composición química y de la calidad de las aguas son: la actividad antrópica, la litología, el tiempo de residencia y el clima.

Por su parte, los procesos involucrados son la interacción agua-roca, a través del intercambio iónico y de la disolución de minerales carbonáticos como calcita, así como la hidrólisis de silicatos y aluminosilicatos. El predominio de estos procesos fue distinguido para cada especie, a través del análisis factorial en modo-R. Por otra parte, se obtuvo que el 67% de las muestras de agua no son aptas para el uso doméstico, según los límites establecidos por el Decreto 883.

Palabras clave: Hidrogeoquímica, acuífero, actividad antrópica, interacción agua-roca.

ABSTRACT

A hydrogeochemical study was carried out in 18 samples of groundwater collected at the Taigüaigüay Lake basin, in Aragua state. Electric conductivity, pH and temperature were measured; also, the chemical species Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Li, B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba and silica (SiO_2) were determined.

Through the results, two types of water were identified: $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-$ and $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-$. Likewise, the factors responsible for the chemical composition and the quality of these waters are: anthropogenic activity, lithology, time of residence and climate.

On the other hand, the involved processes are water-rock interaction, through ionic exchange and dissolution of minerals such as calcium carbonate, as well as the hydrolysis of silicates and aluminosilicates. The dominance of these processes was identified for each species using the R-mode factor analysis method. Furthermore, 67% of the water samples are not suitable for drinking according to the limits established by Decreto 883.

Keywords: Hydrogeochemistry, aquifer, anthropogenic activity, water-rock interaction.

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son un importante reservorio de agua dulce de fácil acceso y de poco impacto por las actividades antrópicas. Es por ello que el rápido crecimiento demográfico y urbanístico de la población venezolana y en particular de la ubicada en el estado Aragua, ha causado un aumento en el aprovechamiento de agua, principalmente para el consumo humano, industrial y agrícola, generando una insuficiencia en el uso del agua superficial para dichas actividades. Como consecuencia, en los últimos años ha ocurrido una creciente tendencia en aprovechar las reservas de aguas subterráneas; no obstante que en muchas ocasiones, el hombre ha modificado su composición natural debido al uso inadecuado de este importante reservorio hídrico. Esto ha traído como resultado, entre algunas consecuencias, la contaminación de la mayoría de los cuerpos de aguas pertenecientes a la cuenca hidrográfica del Lago de Valencia y de las subcuencas contenidas en ella, tal como es el caso de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, particularmente mediante la actividad de riego desarrollada en esta zona (BIONDO & ESTÉVES 2010).

La cuenca de la Laguna de Taigüaigüay está ubicada en el estado Aragua, en la zona sur-oriental de la depresión del Lago de Valencia, entre las coordenadas U.T.M. norte 1124000-1112000 y este 660000-670000, ocupando un área aproximada de unos 198 km². Con el objetivo de realizar un estudio hidrogeoquímico de las

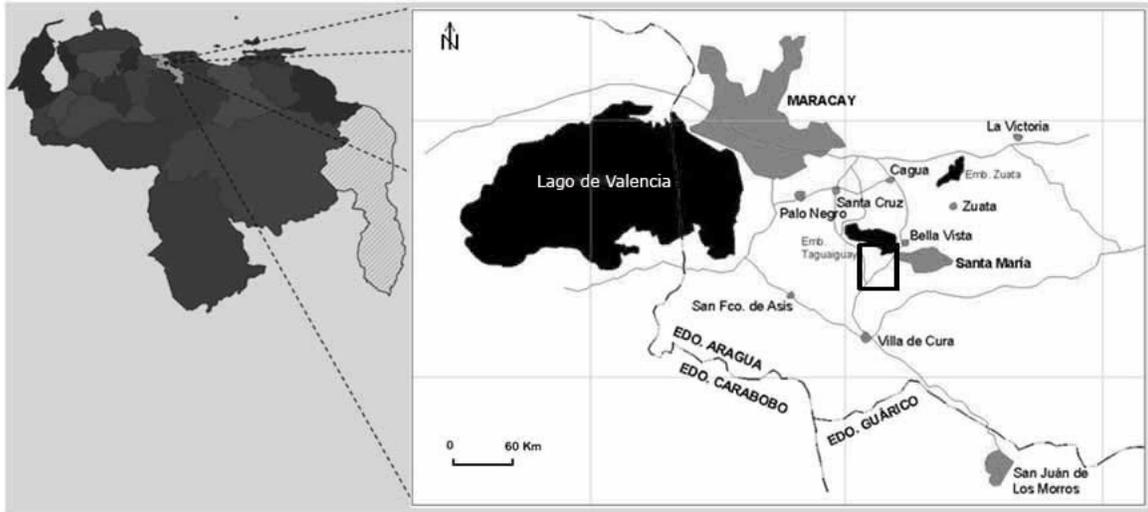


Fig. 1. Mapa de la ubicación de la zona de estudio (Modificado de Abarca, 2004)

aguas subterráneas de dicha cuenca, en el mes de abril 2010 al sur de la misma, fueron captadas 18 muestras de aguas subterráneas, con el propósito de identificar las facies hidrogeoquímicas presentes en la cuenca; realizar una caracterización fisicoquímica a través de la

medición de los parámetros pH, conductividad y la temperatura; inferir los procesos y factores que controlan la presencia de las mismas; y determinar la calidad química de las aguas captadas en los pozos de bombeo muestreados.

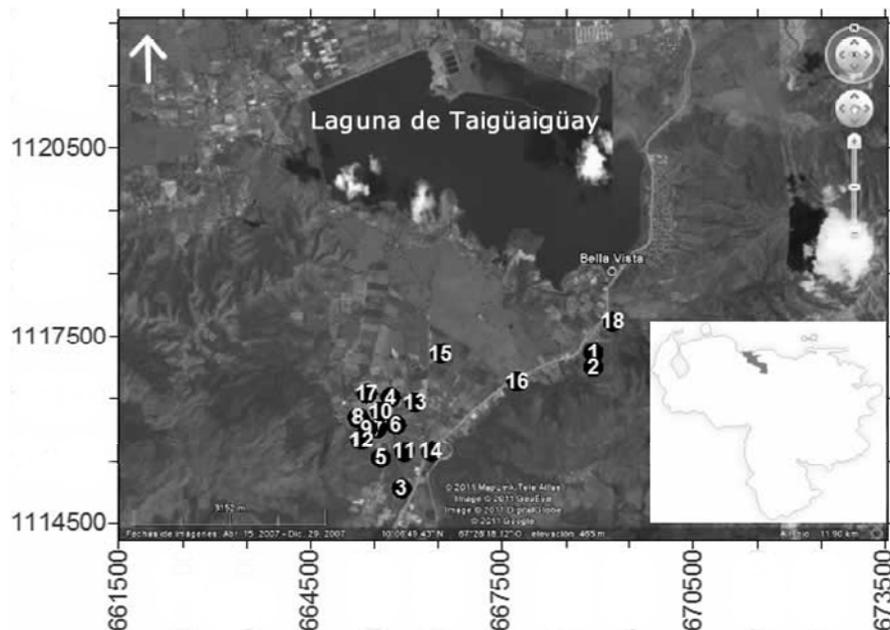


Fig. 2. Ubicación geográfica de los pozos muestreados en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay (Modificado de Google Earth, 2013).

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está geográficamente ubicada en el estado Aragua, específicamente en la zona nor-central de Venezuela, entre las coordenadas 09°23'06" y 10°32'38" de latitud norte y 66°32'50" y 67°52'54" de longitud oeste (Figura 1). Dicho estado está limitado al

norte con el mar Caribe, al sur con el estado Guárico, al este con Miranda y Distrito Capital más al norte y al oeste con el estado Carabobo, abarcando una extensión de unos 7.014 km².

Por su parte, en el estado Aragua, con coordenadas U.T.M. norte 1124000-1112000 y este 660000-670000,

a 5 km al sur de la ciudad de Cagua, explícitamente en la zona sur-oriental de la depresión del Lago de Valencia, municipio Zamora y ocupando un área aproximada de unos 198 km², se encuentra la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay (Figura 2).

Geología local

La cuenca de la laguna de Taigüaigüay está constituida por capas de sedimentos permeables, semipermeables e impermeables de composición mineralógica heterogénea, como consecuencia de las diferentes unidades litológicas presentes en la zona. Las capas permeables están compuestas por gravas y arenas granodecrecientes de base a tope (desde muy finas a gruesas), características de ambientes aluviales. Sus posiciones verticales varían en espesor y extensión, con cotas comprendidas entre los 530 m y 545 m de altitud. La litología es favorable para la acumulación y extracción del agua subterránea, lo cual ha permitido la concentración de los pozos de producción en esta zona. (ALVARADO, 1989).

Los afloramientos presentes a lo largo de la cuenca de la laguna de Taigüaigüay están en contacto con el aluvión. Las unidades presentes en la zona de estudio están compuestas principalmente por rocas metamórficas, que según URBANI (1999), corresponden a la Filita de Tucutunemo, Filita de Paracotos, Metalava de Los Naranjos y Complejo El Tinaco.

Hidrogeología

La cuenca de la Laguna de Taigüaigüay presenta una disminución de los niveles de agua, comparando la variación de la superficie piezométrica correspondiente a los años 1986 y 2010. Asimismo, el agua subterránea fluye en sentido noroeste, en la misma dirección en la cual la permeabilidad aumenta. Este acuífero se divide en dos tipos: uno de régimen libre ubicado al sur y otro de régimen semiconfinado ubicado al noroeste, en donde las reservas permanentes del acuífero son de 237.755.925 m³ de agua. (BIONDO & ESTÉVEZ, 2010)

La litología de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay está compuesta por capas permeables, semipermeables e impermeables. Hacia el noreste existe una mayor cantidad de material fino de tamaño de granos arcilla, indicando una zona impermeable en el sector de Cagua; mientras que al noroeste en los sectores de El Castillo y Turagua se presentan sedimentos gruesos de tamaño de granos arena en forma granodecreciente de base a tope y grava que evidencian una mayor permeabilidad (BIONDO & ESTÉVEZ, 2010).

MÉTODO EXPERIMENTAL

La metodología de trabajo implementada en este estudio se dividió en tres fases, a saber: pre-campo, campo y post-campo. La etapa de pre-campo consistió en la realización de la recopilación de información bibliográfica, mapas de vialidad, geológico e hidrológico. De igual manera, en esta fase fueron tratadas las botellas de polietileno de 1 L de capacidad para ser usadas durante la campaña de campo, un grupo de ellas rotuladas con el número 1, destinadas para ser utilizadas para la determinación de cationes, metales traza y sílice disuelta (SiO₂), lavadas con HNO₃ al 10% (v/v) por 24 horas; esto para evitar la adsorción de cationes y metales en las paredes del envase, seguido del lavado con abundante agua destilada y deionizada (APHA 1995). Un segundo grupo de envases, identificados con el número 2, a ser usados para la recolección de muestras para la determinación de aniones y alcalinidad, fueron lavados únicamente con abundante agua destilada y agua deionizada.

Por su parte, la etapa de campo consistió en la toma de las muestras de agua subterránea en 18 pozos de bombeo; simultáneamente se midieron “in situ” los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura y conductividad del agua, utilizando una sonda multiparamétrica provista de los respectivos electrodos específicos. Las muestras recolectadas en los envases usados para los aniones, se preservaron a una temperatura no mayor a 5 °C para evitar la descomposición del NO₃⁻ y la pérdida o ganancia de HCO₃⁻ (APHA 1995). La figura 1 muestra la ubicación de la zona de estudio y la figura 2, los puntos de muestreo.

Por otro lado, la etapa de post-campo que incluye al trabajo de laboratorio, consistió en inicialmente filtrar las muestras de agua captadas en los envases rotulados como 1, empleando una membrana de filtro de 0,45 µm, con el fin de eliminar los sólidos suspendidos presentes. Seguidamente, las muestras se acidificaron con 2 mL de HNO₃ concentrado bidestilado, de manera que el pH fuese inferior a 2; esto para evitar la adsorción de cationes y metales sobre las paredes de los envases. Posteriormente, se procedió a realizar la determinación de la alcalinidad, aplicando el método de GRAN (1952), a través de una titulación potenciométrica. Para la determinación de los cationes mayoritarios Na⁺ y K⁺, se realizó aplicando la técnica de espectrometría de emisión atómica en llama; mientras que para

Tabla 1. Resultados de las mediciones de los parámetros conductividad, pH y temperatura

Muestra	Coordenadas UTM (WGS84)		Valores de Campo		
	N	E	Cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)
MASSM-1	1117227	668930	587	6,1	29
MASSM-2	1116996	668924	555	6,4	31
MASMI-3	1115045	665925	1031	6,7	29
MASMII-4	1116513	665751	817	6,7	29
MASMII-5	1115540	665597	988	6,7	28
MASMII-6	1116076	665834	993	6,7	28
MASMII-7	1116014	665532	880	6,6	27
MASMII-8	1116187	665249	955	6,7	28
MASMII-9	1116016	665383	1032	6,6	27
MASMII-10	1116289	665589	1089	6,9	-
MASMII-11	1115646	665976	1082	6,9	27
MASMII-12	1115827	665296	987	6,8	28
MASMII-13	1116435	666134	1039	6,8	28
MASMII-14	1115648	666395	1015	6,5	28
MASTD-15	1117208	666538	1102	6,9	28
MASTD-16	1116768	667742	558	6,8	28
MASMII-17	1116574	665375	1001	6,7	28
MASSM-18	1117739	669232	1078	6,9	27

Tabla 2. Concentración de las especies mayoritarias, minoritarias y sólidos disueltos totales

Muestra	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	SDT
	± 1 mg/L	$\pm 0,1$ mg/L	± 1 mg/L	± 1 mg/L	± 3 mg/L	± 2 mg/L	± 1 mg/L	± 1 mg/L	± 1 mg/L	± 1 mg/L
MASSM-1	24	2,4	60	14	69	37	32	168	22	428
MASSM-2	38	3,9	51	12	60	52	32	142	26	417
MASMI-3	43	2,0	99	44	73	54	110	368	39	831
MASMII-4	28	2,1	77	41	43	35	37	403	43	708
MASMII-5	41	2,0	99	42	64	44	71	437	44	843
MASMII-6	33	2,2	96	49	58	52	80	439	43	853
MASMII-7	41	2,1	86	38	49	31	44	438	40	769
MASMII-8	29	2,2	95	47	36	51	93	433	42	827
MASMII-9	37	2,2	104	47	58	41	88	445	45	867
MASMII-10	39	2,2	113	51	61	45	74	513	47	944
MASMII-11	52	2,3	100	50	73	68	62	447	45	901
MASMII-12	29	2,0	104	43	49	38	108	411	44	827
MASMII-13	33	2,2	100	54	62	53	101	424	49	877
MASMII-14	43	2,1	100	45	68	56	80	403	42	840
MASTD-15	36	2,2	109	59	79	55	35	534	51	958
MASTD-16	16	2,0	59	23	40	20	8	262	39	469
MASMII-17	33	2,0	107	47	65	54	48	456	47	858
MASSM-18	58	1,9	129	12	92	65	9	439	28	833

Tabla 3. Resultados de la concentración de los elementos traza

Muestra	Li	Mn	Fe	Cu	Sr	Ba
	± 1 µg/L	± 2 µg/L				
MASSM-1	47	< LD	104	< LD	229	77
MASSM-2	44	94	< LD	< LD	152	52
MASMI-3	56	< LD	< LD	< LD	562	252
MASMII-4	41	< LD	278	< LD	552	211
MASMII-5	44	< LD	< LD	< LD	702	377
MASMII-6	50	< LD	< LD	20	675	249
MASMII-7	50	< LD	< LD	< LD	617	223
MASMII-8	52	< LD	< LD	< LD	716	200
MASMII-9	49	< LD	< LD	< LD	704	358
MASMII-10	46	< LD	124	< LD	757	398
MASMII-11	53	< LD	< LD	< LD	642	379
MASMII-12	47	< LD	< LD	< LD	713	358
MASMII-13	44	< LD	< LD	< LD	645	373
MASMII-14	57	23	< LD	< LD	602	254
MASTD-15	46	< LD	< LD	< LD	662	511
MASTD-16	64	< LD	100	< LD	231	199
MASMII-17	46	< LD	< LD	< LD	640	394
MASSM-18	78	< LD	< LD	< LD	850	81

Las concentraciones de los elementos traza B, Cr, Ni y Zn de todas las muestras resultaron por debajo del Límite de Detección.

el Ca²⁺ y el Mg²⁺, se aplicó la espectrometría de absorción atómica de llama. Por otra parte, la determinación de los elementos traza y sílice disuelta (SiO₂) se realizó mediante la técnica de espectrofotometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP); mientras que la concentración de los aniones Cl⁻, NO₃⁻ y SO₄²⁻, fue conocida por medio de la técnica de cromatografía iónica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio, son presentados en las tablas 1, 2 y 3; mientras que, en la tabla 4 están indicados los límites de detección de cada una de las especies químicas. Asimismo, estos resultados fueron validados mediante el balance iónico, obteniéndose para todas las muestras, un error menor del 10%, lo que indica que los resultados son confiables desde el punto de vista geoquímico (HEM, 1985).

La utilización de una serie de herramientas geoquímicas fue útil para poder identificar las facies hidrogeoquímicas presentes, así como inferir los factores y procesos que influyen sobre la composición química de las aguas subterráneas captadas.

Facies hidrogeoquímicas presentes en la cuenca de Taigüaigüay

Con el propósito de identificar y clasificar el o los tipos de agua presentes en la zona de estudio, fue construido el diagrama de Piper. Dicho diagrama que representa el total de las muestras captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, permitió conocer la presencia de dos tipos de aguas, a saber: Ca²⁺-Na⁺-HCO₃⁻-Cl⁻, ubicadas al este, cerca de la zona de recarga; y Ca²⁺-Mg²⁺-HCO₃⁻-Cl⁻, en el oeste, hacia la planicie de la cuenca (Fig. 3).

Tabla 4. Límites de detección (LD) calculados para cada especie

Especie	LD (mg/L)	Especie	LD (µg/L)
Na ⁺	10	B	22
K ⁺	0,1	Cr	16
Ca ²⁺	2	Cu	12
Mg ²⁺	6	Fe	13
Cl ⁻	8	Mn	10
SO ₄ ⁼	4	Ni	17
NO ₃ ⁻	2	Zn	24
SiO ₂	1	Li	22
		Sr	15
		Ba	32

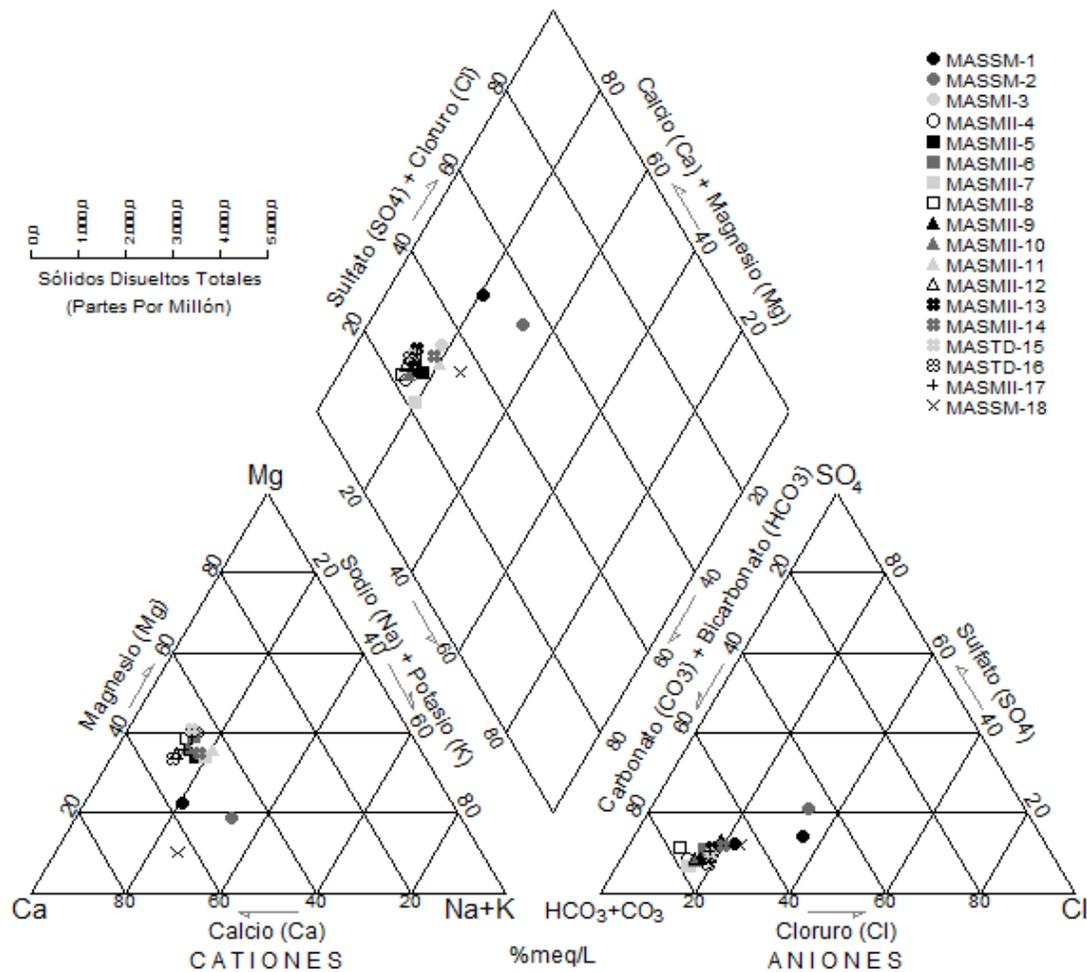


Fig. 3. Diagrama de Piper

Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas

Es importante señalar que las aguas subterráneas captadas circulan a través de sedimentos provenientes de la meteorización de formaciones litodémicas como la Filita de Tucutunemo, Filita de Paracotos, Metalava de Los Naranjos y el Complejo El Tinaco CECPV (2011). Asimismo, BIONDO & ESTÉVEZ (2010) indican que el flujo regional de las aguas subterráneas en la cuenca se dirige en dirección noroeste; por lo tanto, la zona de recarga se ubica en el este y la zona de descarga hacia la Laguna de Taigüaigüay. Esta tendencia explica por qué en el sector este, se obtuvieron menores concentraciones de los sólidos disueltos totales (SDT) y de las especies químicas analizadas, así como los más bajos valores de conductividades y pH. Igualmente, en el sector oeste dichas concentraciones tienden a ser mayores, incrementándose a medida que el flujo del agua va en dirección hacia la zona de descarga, como consecuencia

del mayor contacto entre el agua y el medio poroso, que conlleva el efectivo proceso de disolución de minerales presentes en el sustrato.

En la tabla 5 se presentan los valores máximos y mínimos, así como la mediana para cada una de las variables físicoquímicas y concentración de especies químicas consideradas en este estudio. Nótese que en términos generales, el catión más abundante es el Ca²⁺, seguido del Mg²⁺, Na⁺ y en menor proporción el K⁺ (Fig. 4). Este comportamiento parece estar asociado al proceso de disolución de rocas carbonáticas; en ese sentido, GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980) señalan la presencia de mármoles dentro de la secuencia que constituye a la Filita de Tucutunemo, cuyo proceso de disolución del mineral calcita conlleva al aporte de Ca²⁺ al agua. Asimismo, CECPV (2011) señala que en la zona de estudio predominan rocas metamórficas como filitas carbonáceas, esquistos calcáreos y metalavas, los

cuales durante el proceso de meteorización química, se constituyen en las principales fuentes de Ca^{2+} .

Tabla 5: Valores máximos, mínimos y la mediana para cada una de las variables determinadas.

	Max	Min	Mediana
Ca^{2+} (mg/L)	129	51	100
Mg^{2+} (mg/L)	59	12	45
Na^+ (mg/L)	58	16	36
K^+ (mg/L)	3,9	1,9	2,2
HCO_3^- (mg/L)	534	142	435
NO_3^- (mg/L)	110	8,4	67
Cl^- (mg/L)	92	36	62
SO_4^{2-} (mg/L)	68	20	52
SiO_2 (mg/L)	51	22	43
Li (μ g/L)	0,078	0,041	0,048
Sr (μ g/L)	0,84	0,15	0,64
Ba (μ g/L)	0,51	0,052	0,25
SDT (mg/L)	958	417	837
pH	6,9	6,1	6,7
EC (μ S/cm)	1089	555	997
T ($^{\circ}$ C)	30	27	28

En el mismo orden de ideas, el CECPV (2011) indica que la Filita de Tucutunemo está constituida por metaconglomerados con cantos volcánicos y fragmentos de basalto en las calizas, lo cual pudiese aportar Mg^{2+} al agua. Asimismo, los minerales ferromagnesianos presentes en las metalavas de la zona pudiesen constituirse en otro de los minerales que aportan esta especie química al agua.

Atendiendo a las características del relleno sedimentario de la cuenca, las concentraciones de Na^+ obtenidas pueden estar asociadas a la interacción del agua con los sedimentos, a través del proceso de intercambio catiónico con las arcillas.

El Na^+ se caracteriza por ser muy soluble, por lo que es difícil que precipite, más aún es afectado fácilmente por el proceso de intercambio catiónico (CUSTODIO & LLAMAS 1976). No obstante, el aporte del Na^+ también puede provenir de la meteorización química de las rocas metamórficas que están presentes en la zona de estudio. CECPV (2011) reporta la presencia de esquistos calcáreos de las formaciones Tucutunemo y Paracotos, los cuales contienen minerales como la albita, de tal forma que durante su alteración a través del proceso de hidrólisis, libera Na^+ hacia las aguas subterráneas.

El K^+ en aguas naturales es generalmente el producto de la meteorización de minerales silicatados ricos en K^+ , como la ortosa, contenidos en las filitas de la Formación Tucutunemo y Paracotos. Igualmente, puede estar asociado a las muscovitas, biotitas y anfíbol; siendo éstos minerales presentes en los esquistos de la Formación Tucutunemo (CUSTODIO & LLAMAS 1976) (CECPV 2011).

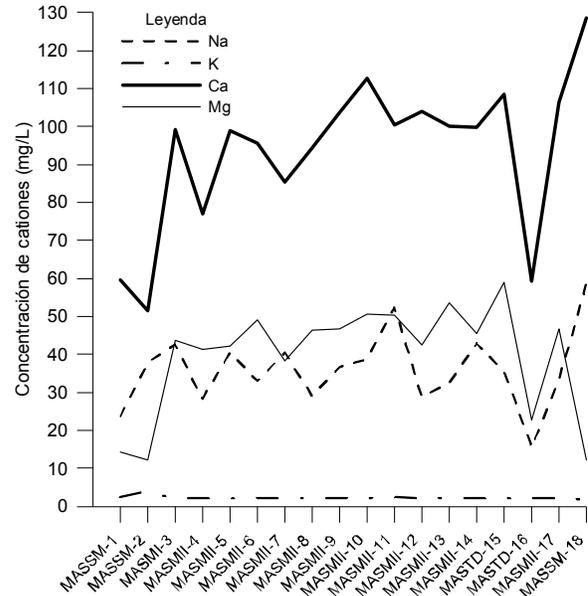


Fig. 4. Representación gráfica de la concentración de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+

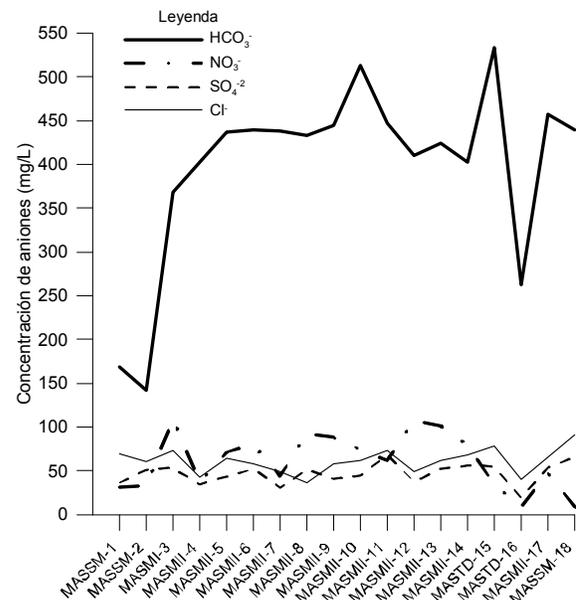


Fig. 5. Representación gráfica de la concentración de aniones HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-

Con respecto a los aniones, en la figura 5 se observa que la variación en la concentración de los aniones mayoritarios se presentan siguiendo la siguiente secuencia $HCO_3^- > NO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$. Esto pareciera ser consecuencia del dominio de la interacción del agua con rocas carbonáticas, así como con el equilibrio CO_2-H_2O y con la actividad antrópica.

CUSTODIO & LLAMAS (1976) indican que el aporte atmosférico del Cl^- es en promedio de 0,3 a 3 mg/L, por lo que para este estudio se infiere que este ion proviene

de otras fuentes aparte del atmosférico, debido a que las muestras poseen concentraciones superiores al intervalo antes señalado. Es importante señalar que el proceso de muestreo fue realizado en el mes de abril, época que corresponde con el período de mayor evaporación en la zona de estudio; por ello, el aporte de Cl^- puede ocurrir durante el proceso de preconcentración de sales a través de la evaporación del agua meteórica y su posterior disolución e infiltración hacia el subsuelo debido a la actividad de riego en la zona.

Por su parte, la fuente principal del SO_4^{2-} es la disolución de sales como el yeso (CUSTODIO & LLAMAS 1976); sin embargo, en la literatura no están reportados dichos minerales para la zona de estudio, pero sí en áreas cercanas, tal como es el caso de la cuenca del Lago de Valencia (MARTÍNEZ 2003). Otra fuente menor pudiese ser la oxidación de sulfuros como la pirita, el cual está reportado por CEPV (2011) y por HERNÁNDEZ & MARTÍNEZ (2008), como uno de los minerales indicados en la Filita de Tucutunemo, presente en el área de interés. Asimismo, las actividades antrópicas a través del uso de los fertilizantes en esta zona agrícola, puede conllevar a un aumento en la concentración de SO_4^{2-} en las aguas subterráneas.

En cuanto al NO_3^- , uno de los factores que influyen en su concentración es la actividad antrópica, predominantemente la actividad agrícola. Muchos fertilizantes sintéticos contienen en su composición al nitrógeno, el cual mediante el proceso de nitrificación, es posteriormente convertido por las bacterias del suelo en NO_2^- y NO_3^- . El NO_3^- ingresa a las aguas subterráneas por el alto índice de lixiviación que tiene esta especie (CASANOVA 2005).

A su vez, el HCO_3^- proviene de la interacción del agua con el CO_2 atmosférico, para luego ser transportado al acuífero por infiltración (CUSTODIO & LLAMAS 1976). En este estudio, el aporte de HCO_3^- parece estar asociado a los mismos procesos que los señalados con anterioridad para el Ca^{2+} , lo que permite señalar que su aporte está asociado a la meteorización de silicatos y aluminosilicatos como feldespatos, plagioclasas y piroxenos, así como a minerales carbonáticos como la calcita. Asimismo, tiene una distribución similar a la mostrada por el pH, por lo que podría inferirse que esta especie es el principal controlador de este parámetro en la zona de estudio.

Comportamiento de los elementos traza

El estudio geoquímico de los elementos traza en las aguas subterráneas, es de relativa importancia, ya que muchos de estos elementos pueden ser usados para realizar interpretaciones sobre el grado de interacción agua-sustrato poroso, así como establecer la calidad de las mismas (WHITE 2003). En este estudio se obtuvieron datos para analizar los elementos Sr, Ba y Li. Para los restantes elementos determinados B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu

y Zn, no se obtuvieron suficientes datos para utilizar estas herramientas porque presentaron concentraciones inferiores al límite de detección (tabla 4).

El Sr puede estar presente en minerales como la calcita, plagioclasas y feldespatos o en menor cantidad a las micas, debido a que su ion puede sustituir al Ca y al K presentes en dichos minerales, esto como consecuencia de poseer propiedades químicas similares. Igualmente, puede estar formando fases minerales como la estroncionita SrCO_3 y la celestina SrSO_4 . A su vez, puede estar presente en minerales constituyentes de rocas sedimentarias como las calizas y areniscas (MASON & MOORE, 1982). En este sentido, en la zona de estudio se infiere que el origen del Sr puede deberse a la hidrólisis de minerales como plagioclasas cálcicas, feldespatos y carbonatos presentes en las filitas, metareniscas o calizas reportadas por CEPV (2011).

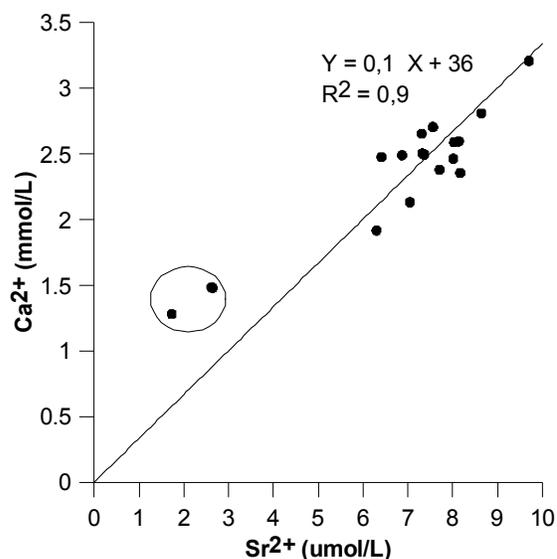


Fig. 6. Gráficos de correlación entre los elementos $\text{Ca}^{2+}/\text{Sr}^{2+}$.

Asimismo, la figura 6 permite identificar la presencia de dos grupos de muestras; un primer grupo que con una alta correlación entre el Ca^{2+} y el Sr^{2+} descrito a través de su R^2 igual a 0,97 y una pendiente igual a 0,33; y un segundo grupo alejado de la tendencia general. La correlación observada en el primer grupo, apunta hacia una fuente común en ambas especies, la cual pudiese estar asociada a la presencia de plagioclasas y de calcita en las rocas que pertenecen a la cuenca de la laguna de Taigüaigüay. Por su parte, el segundo grupo podría estar indicando que dichas especies químicas se originen por las actividades antrópicas.

No obstante, para el caso de las especies Ca^{2+} y K^+ fue obtenida una baja correlación, indicando que en este caso dichos iones no tienen una asociación geoquímica importante, descartando a minerales como los

feldespatos potásicos o las micas como fuente de Sr a las aguas estudiadas.

Por otro lado, el Ba puede estar presente en minerales como la barita (BaSO_4), asociado a yacimientos de calizas o en arcillas (KLEIN & HURLBUT 2001). Sin embargo, en la litología reportada en el GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980) y el CECPV (2011), no se reporta la presencia de este mineral en esta zona, aunado a que no hay una correlación entre el Ba^{2+} y el SO_4^{2-} .

MASON & MOORE (1982), indican que el Ba puede estar presente en las rocas ígneas sustituyendo al K, aunque en menor proporción al Ca y al Mg, debido a las propiedades químicas similares.

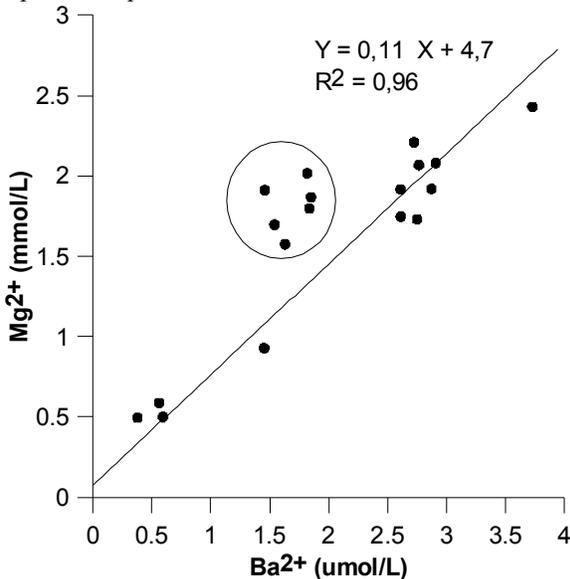


Fig. 7. Gráficos de correlación entre los elementos $\text{Mg}^{2+}/\text{Ba}^{2+}$.

En ese sentido, la buena correlación observada entre el Mg^{2+} y el Ba^{2+} podría estar asociado a las rocas metavolcánicas reportadas, como en la Metalava Los Naranjos, así como a los cantos o peñones volcánicos en Tucutunemo y Paracatos (CECPV, 2011). Asimismo, en la figura 7 se proyecta la concentración del Mg^{2+} y Ba^{2+} determinada en las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay. Nótese la presencia de dos grupos: uno con una alta correlación cuyo R^2 es igual a 0,96, y un segundo grupo que no presenta correlación alguna. En ese sentido, se puede inferir de por lo menos dos fuentes de aporte de Ba en la zona de estudio, uno asociado a una fuente común, posiblemente a las metalavas y otra fuente de origen antrópico u otro quizá asociado al proceso de intercambio iónico.

Finalmente, el Li tiende a sustituir al Mg en minerales como piroxenos, anfíboles y especialmente en micas (MASON 1982). Por su parte, SÁNCHEZ *et al.* (1998) señalan que este metal puede estar presente en las arcillas por su pequeño radio iónico y enriquecerse por

procesos intercambio iónico con Na^+ y K^+ . En ese sentido, considerando las condiciones litológicas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, así como de los sedimentos presentes en la planicie de la misma, se puede inferir que el Li puede estar vinculado con las arcillas y carbonatos presentes en la zona. GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980) señala que la Formación Tucutunemo está constituida por arcillas calcáreas, lutitas y filitas carbonáceas entre otros.

Por otra parte, las relaciones interiónicas entre especies mayoritarias, minoritarias y/o traza han permitido indicar los probables procesos involucrados durante la interacción agua-roca, así como identificar procesos como disolución, precipitación y/o intercambio iónico entre otros (MONTERO, 1996).

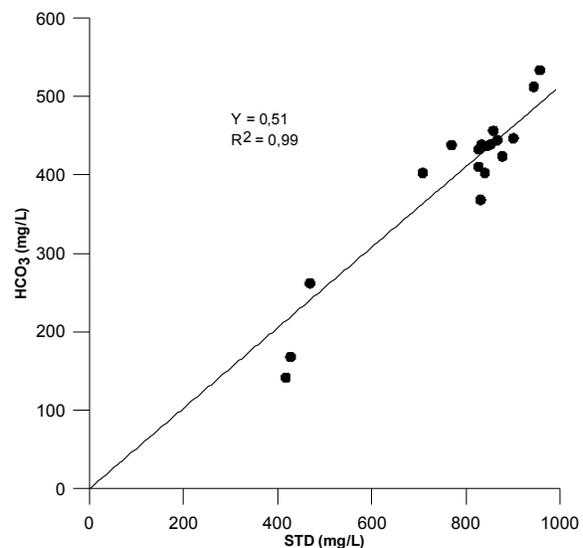
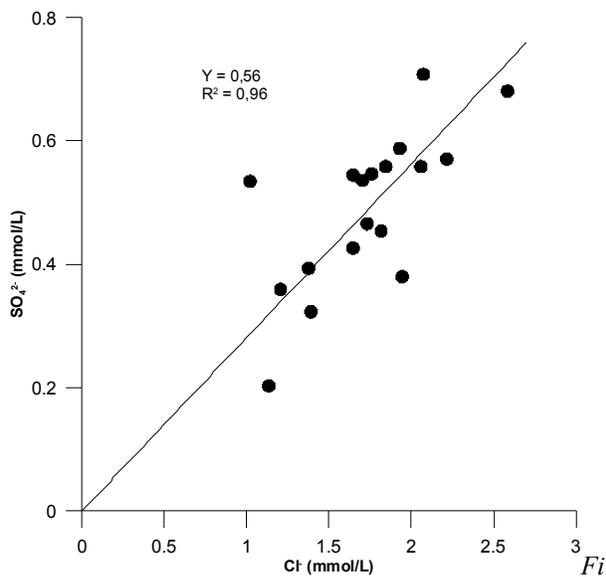


Fig. 8. Relación entre el bicarbonato y los STD

Factores y procesos controladores de la composición química de las aguas subterráneas

La relación entre el HCO_3^- y los STD presenta un elevado coeficiente de correlación de $R^2=0,99$, indicando que la especie HCO_3^- contribuye fuertemente con los STD (Fig. 8). Por su parte, no existe una correlación del SO_4^{2-} con el Ca^{2+} , permitiendo sugerir que el SO_4^{2-} puede estar siendo aportado hacia las aguas subterráneas mediante el uso extensivo de fertilizantes. Asimismo, la relación entre el SO_4^{2-} y el Cl⁻ presenta una buena correlación, con un coeficiente de 0,97 (Fig. 9). SUBRAMANI (2010) señala que la correlación entre estos iones implica el efecto de la contaminación superficial, especialmente del retorno de la irrigación al flujo.

Por otro lado, en la figura 10 que presenta la relación molar de Na^+/Cl^- frente a la conductividad permite indicar que la composición química de las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taguaguay



g. 9. Relación entre el sulfato y el cloruro

está controlada por los procesos de meteorización de silicatos y del intercambio iónico. RAJMOHAN & ELANGO (2009) proponen que las muestras de agua cuya composición es influenciada por la meteorización de silicatos, son proyectadas hacia el sector donde la relación molar Na^+/Cl^- es superior a 1; de manera que reaccionan minerales como el feldespato con el ácido carbónico con la presencia del agua, liberando HCO_3^- . Asimismo, indican que el campo donde predomina el proceso de intercambio iónico, se caracteriza por presentar una relación molar Na^+/Cl^- inferior a 1.

En otro orden de ideas, para poder interpretar e identificar algunos procesos que influyen en las aguas subterráneas de la zona de estudio, se construyó la relación propuesta por DATTA & TYAGI (1996) quienes grafican la relación entre la suma de los cationes $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ y de los aniones $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ en meq/L. Dicha relación indica que los puntos ubicados cercanos o en la línea 1:1, son el resultado de la disolución de minerales carbonáticos y sulfatados, representados por minerales como la calcita, dolomita y yeso. Sin embargo, en la figura 11 se muestra la presencia de un exceso de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, puesto que varios de los puntos se ubican por

encima de la línea 1:1, permitiendo inferir de la existencia de otra fuente del $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ tal como en las reacciones de intercambio iónico (SUBRAMANI 2010).

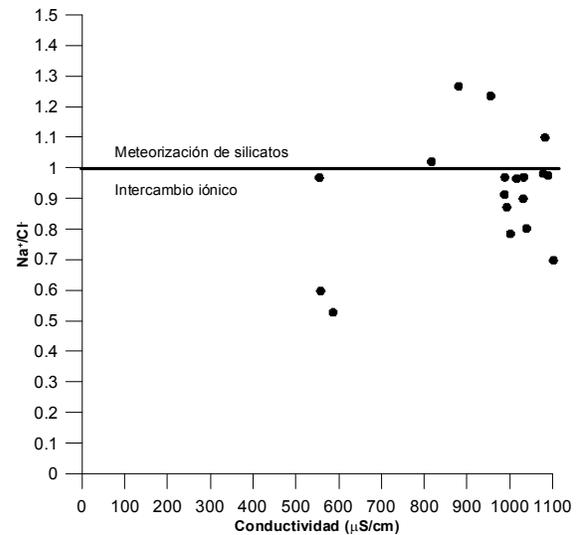


Fig. 10. Relación entre el sodio y el cloruro con la conductividad

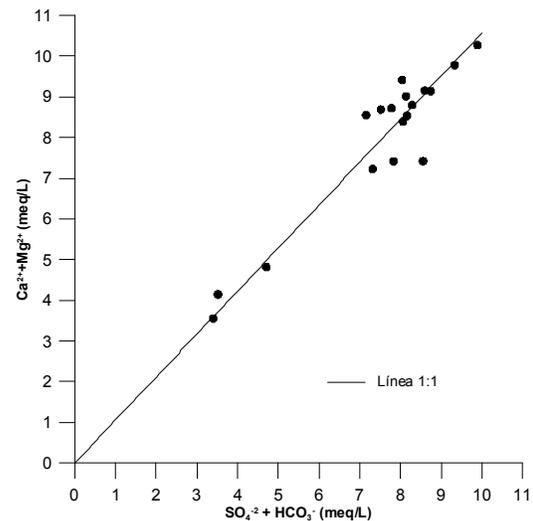


Fig. 11. Relación entre el magnesio y el calcio en función del sulfato y el bicarbonato

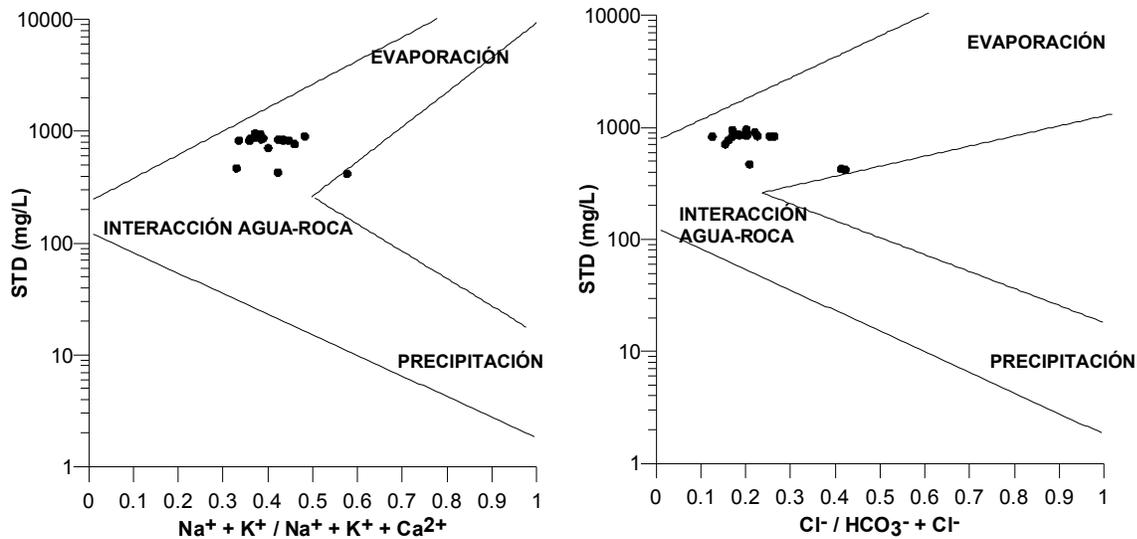


Fig. 12. Diagramas de Gibbs

Por otra parte, con el propósito de identificar algunos de los factores que pudiesen estar controlando la composición de las aguas subterráneas de la Laguna de Taigüaigüay, se construyeron los diagramas de GIBBS (1970) (Fig. 12), los cuales consisten en la proyección de los STD en mg/L en función de la relación $\text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$ y de STD frente a $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$ (RAJMOHAN & ELANGO, 2004).

En la figura 12 se observa que la mayoría de las muestras están ubicadas en la zona central con una ligera tendencia hacia el campo de la evaporación, lo que permite señalar que uno de los procesos controladores de la composición química, es el de la interacción agua-roca, no descartando la influencia del factor climático a través de la evaporación atmosférica.

En otro orden de ideas, con el propósito de distinguir el predominio de los procesos involucrados en la concentración de cada una de las especies determinadas en las aguas subterráneas captadas en este estudio, se aplicó el análisis factorial en modo-R. Este método es uno de los más usados en hidrogeoquímica, particularmente para los estudios medio ambientales, debido a que pueden distinguirse procesos naturales y antrópicos en determinadas zonas (JIANG *et al.* 2009). Variables como el pH, la conductividad y las especies químicas Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Li, Sr, Ba y sílice disuelta (SiO_2) fueron procesadas mediante el software estadístico PSPP, obteniéndose así cuatro factores establecidos, el porcentaje de la varianza y el porcentaje acumulado de la varianza. Los factores están representados por un valor para cada una de las variables, indicando que están involucrados diferentes

procesos que controlan la composición química de las aguas captadas; mientras más alto es el valor, mayor es el predominio de ese proceso (tabla 6). Cada uno de los factores fue establecido según los datos obtenidos; en este sentido, los factores 1, 2 y 3 corresponden a la interacción agua-roca, mientras que el factor 4 se asocia con las actividades antrópicas. Los primeros tres factores fueron diferenciados por los diferentes tipos de minerales involucrados en la interacción agua-roca. Debido a esto, el factor 1 corresponde a los silicatos, por el valor alto de SiO_2 , HCO_3^- y Mg^{2+} ; el factor 2, a las arcillas y al factor climático, por los valores altos de Li, Na^+ y Cl^- ; y el factor 3, corresponde a los minerales carbonatados como la calcita, debido a los altos valores de HCO_3^- y Ca^{2+} . Por su parte, el factor 4 se asoció con las actividades antrópicas, ya que el valor de NO_3^- es muy elevado.

Ya establecidos los factores, en la tabla 7 se observa cuales son los factores dominantes en cada especie. Estos resultados indicaron que el Ca^{2+} y el HCO_3^- están contenidos en las aguas subterráneas mediante el proceso de interacción agua-roca, por disolución de minerales como la calcita o de silicato como las plagioclasas cálcicas. En cambio, el Mg^{2+} parece estar controlado por la hidrólisis de silicatos magnesianos contenidos en las rocas metavolcánicas. A su vez, el Cl^- y el Na^+ están contenidas en las aguas subterráneas principalmente debido a la evaporación.

Finalmente, desde el punto de vista de la calidad de las aguas estudiadas, la Normativa para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos del Decreto

Tabla 6. Análisis factorial R-modo.

	F1	F2	F3	F4	Dominancia
pH	0,65	0,20	0,53	-0,21	F1>F3>F4>F2
EC	0,62	0,55	0,42	0,35	F1>F2>F3>F4
Ca ²⁺	0,49	0,57	0,59	0,22	F3>F2>F1>F4
Mg ²⁺	0,87	0,01	0,05	0,42	F1>F4
Na ⁺	0,02	0,90	0,19	0,02	F2>F3>>F1=F4
K ⁺	-0,30	0,14	-0,84	-0,09	F3>F1>F2>F4
HCO ₃ ⁻	0,79	0,26	0,49	0,16	F1>F3>F2>F4
Cl ⁻	-0,05	0,87	0,05	-0,19	F2>>F4
NO ₃ ⁻	0,29	0,02	0,02	0,92	F4>>F1
SO ₄ ²⁻	0,12	-0,05	-0,05	0,16	F4>F1
SiO ₂	0,94	0,15	0,15	0,20	F1>>F4>F2=F3
Li	-0,44	0,69	0,69	-0,32	F2=F3>F1>F4
Sr	0,53	0,61	0,61	0,33	F2=F3>F1>F4
Ba	0,94	0,03	0,03	0,12	F1>F4
% varianza	50,45	22,09	11,24	5,83	
% acum. varianza	50,45	72,54	83,78	89,61	

Tabla 7. Distribución de la calidad de las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay

Especie química (mg/L)	Límites por Decreto 1508 (mg/L)	Especies químicas (mg/L)	Especie química (mg/L)	Límites por Decreto 1508 (mg/L)	Especies químicas (mg/L)
pH	6,5 - 8,5	6,1 - 6,9	SO ₄ ⁻	370	20 - 68
Conductividad (µS/cm)	2000	555 - 1089	NO ₃ ⁻	10	8 - 110
SDT	1300	417 - 957	HCO ₃ ⁻	370	142 - 534
Na ⁺	140	16 - 58	Fe	1	ND - 0,3
K ⁺	20	2 - 4	Li	2,5	0,04 - 0,08
Mg ²⁺	70	12 - 59	Mn	0,1	ND - 0,09
Ca ²⁺	200	51 - 129	Cu	0,2	ND - 0,02
Cl ⁻	250	36 - 92	Ba	0,7	0,05 - 0,5

Presidencial 883 (GACETA OFICIAL N° 5.021, 1995), fue usada para las aguas muestreadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay. Esto se llevó a cabo comparando los límites para las especies químicas analizadas y los parámetros medidos como el pH y los sólidos disueltos totales (SDT). En la tabla 7 fueron comparados los límites indicados por el Decreto 883, tanto para los parámetros como para las principales especies químicas consideradas con las obtenidas en este estudio.

El Decreto 883 indica que el valor de pH de las aguas para el uso doméstico, industrial y agrícola debe estar comprendido entre 6,0 y 8,5 unidades y que el límite de los sólidos disueltos totales en las aguas naturales es de 1500 mg/L y de 2000 µS/cm para el riego; por consiguiente, las aguas evaluadas en este estudio son consideradas aptas para dicho uso.

Asimismo, es preciso evaluar la concentración de las especies químicas analizadas para cada una de las

muestras desde el contexto de su calidad química, debido a que algunas de estas especies pueden ser nocivas para la salud o causar daño a los suelos que son usados para las actividades agrícolas, esto si no están dentro de los límites considerados por la normativa. En este sentido, en la tabla 7 están indicados los límites de las especies químicas que están reportados en el Decreto 883, observándose que todas las muestras de aguas captadas se clasifican de tipo 1, esto en relación a la concentración de especies como Na⁺, Cl⁻ y SO₄²⁻. Sin embargo, la mayoría de las muestras contienen concentraciones de NO₃⁻ por encima del límite recomendado por la Normativa, por lo que 67 % de ellas no se recomiendan para el uso doméstico. Se exceptúan de este grupo de muestras a aquellas cuyo límite de concentración de NO₃⁻ está por debajo del recomendado, tales como las rotuladas como MASSM-1, MASSM-2, MASMII-4, MASMII-15, MASTD-16 y MASSM-18.

El alto contenido de NO_3^- es perjudicial para la salud pudiendo causar cáncer gástrico, malformación en fetos, metahemoglobinemia en lactantes e hipertensión, entre otras enfermedades (WHO, 2007).

CONCLUSIONES

En la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay se identificaron dos tipos de aguas, a saber: $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-$, ubicadas al este, cerca de la zona de recarga y $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-$, en el oeste, más distante de la zona de recarga.

De acuerdo a los valores de SDT, las muestras de agua estudiadas se clasifican como dulces.

El proceso que controla la composición química de las aguas de la localidad es principalmente el de interacción agua-roca, a través de la disolución de minerales como los carbonatos de calcio; así como la hidrólisis de silicatos y aluminosilicatos. Igualmente, el proceso de intercambio catiónico parece estar operando en las aguas estudiadas.

Los factores que se consideran responsables de la composición química y de la calidad de las aguas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay son principalmente la actividad antrópica, la litología, el clima y el tiempo de residencia.

El 67 % de las muestras de agua no puede estar disponible para el uso doméstico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, así como a la Facultad de Farmacia. Asimismo, a la Universidad Bolivariana, a través de la Profa. Vanessa Ojeda.

BIBLIOGRAFÍA

ABARCA A. (2004). *Planificación del Aprovechamiento de la tierra de las Estaciones Experimentales de la Universidad Central de Venezuela. Estación Experimental Santa María*. Trabajo de ascenso, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. 285p.

ALVARADO J. (1989). Regiones y características hidrogeológicas de Venezuela. *VII Congreso Geológico Venezolano, Barquisimeto, edo. Lara*.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington DC. 932-938.

BIONDO L. & N. ESTEVES. 2010. *Evaluación Hidrogeológica de la Laguna de Taigüaigüay, Municipio Zamora, Estado Aragua*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela. 139 p

CASANOVA E. (2005). *Introducción a la ciencia del suelo*. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela. 487 p

CÓDIGO ESTRATIGRÁFICO DE LAS CUENCAS PETROLÍFERAS DE VENEZUELA (CECPV), 2011. PDVSA. Disponible: www.pdv.com/lexico Consulta: 2010-2011

CUSTODIO E. & M. LLAMAS. 1976. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, S.A. Casanova. España. 2359 p.

GACETA OFICIAL N° 5.021 1995. *Decreto 883*, Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o efluentes líquidos. República de Venezuela Sección III: 89-90.

GIBBS R. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science Journal*, 170: 795-840.

GONZÁLEZ DE JUANA C., J. ITURRALDE DE AROZENA & X. PICARD. (1980). *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*. Ediciones Foninves. Primera Edición. 1031 p.

GRAN G. 1952. Determination of the Equivalence Point in Potentiometric Titrations. Part II, *Analyst*, 77: 661-671.

HERNÁNDEZ M. & R. MARTÍNEZ. 2008. *Análisis de los parámetros geomecánicos en la excavación del túnel de trasvase Taguaguay Valles de Tucutunemo, estado Aragua*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 173 p.

JIANG Y., Y. WUE, C. GROVES, D. YUAN & P. KAMBESIS. 2009. Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in the Nandong karst underground river system in Yunan, China. *Journal of Contaminant Hydrology* 109: 49-61.

KLEIN C. & C. HURLBURT. (2001). *Manual de Mineralogía*. Reverté. 4ª Ed. Barcelona. Vol.2, 289 p.

MARTÍNEZ M. 2003. *Caracterización geoquímica de las aguas subterráneas de la cuenca del Lago de Valencia, estado Carabobo, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 103 p.

MASON B. & C. MOORE. (1982). *Principles of geochemistry*. John Wiley and Sons. New York.

MONTERO R. (1996). *Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas asociadas a zonas de explotación de hidrocarburos*. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra. 203 p.

RAJMOHAN N. & L. ELANGO. 2004. Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. *Environmental Geology* 46:47-61.

SÁNCHEZ F., A. PULIDO & J. CALAFORRA. 1998. Hydrogeochemical processes in an arid region of Europe, Almeria, SE Spain. *Applied Geochemistry* 14: 735-745.

- SUBRAMANI T., N. RAJMOHAN & L. ELANGO. (2010). Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. *Environ Monit Assess*
- URBANI F. (1999). Revisión de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Revista Geos*. Universidad Central de Venezuela. 33: 1-170.
- WHITE W. (2003). *Geochemistry*. Cornell University. Disponible: <http://www.imwa.info/white-geochemistry.html> . John - Hopkins University Press. Consulta: 2011, Octubre.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), 2007. Nitrate and nitrite in drinking-water. WHO/SDE/WSH/07.01/16.