

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA**



**“ESTUDIO DE LA CALIDAD QUÍMICA Y TIPOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN  
LA ZONA SUR ORIENTAL DE LA ISLA DE MARGARITA, EDO. NUEVA  
ESPARTA, VENEZUELA”**

**Trabajo Especial de Grado  
presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela, por la Br. Daniela  
Toro Ascanio, para optar al título  
de Licenciada en Química.**

**Caracas, octubre, 2012**

## DEDICATORIA

A mis queridísimos padres,  
quienes durante 23 años han sabido enseñado tantos valores , los cuales han y lograr esta gran meta, que no fue nada fácil pero que sin ustedes no hubiese podido seguir, porque fueron tantos momentos de angustia, tantos momentos de llanto, tantas noches sin dormir, tantas cosas que pasé, en las que ustedes jamás me dejaron sola y que con su gran e importante apoyo, hablándome y aconsejándome, me ayudaron a entender muchas cosas y a nunca abandonar mi sueño que ya hoy es una realidad. Para ustedes y por ustedes TODO.

Mirtha Ascanio y Abelardo Toro,  
guiarme por el camino correcto y me han sido el pilar fundamental para llegar aquí

A ti, abuela Mita, que a pesar que nos dejaste un dolor tan grande al irte al cielo, me hace sentir realmente feliz saber que desde allí me estas viendo y estas muy orgullosa de mi, porque se que siempre soñaste con que me graduara.

Jamás olvidaré tus sabias palabras que nos decías a todos:

Gradúense, que eso es lo más importante en la vida.

Ustedes son mi ejemplo a seguir, y pues

siempre los llevaré aquí, en mi

CORAZÓN.

## **AGRADECIMIENTOS**

Ante todo a Dios, en quien dudé muchas veces porque pensé que me abandonaba en momentos tan difíciles durante la carrera, pero me hizo comprender que el tiempo de él es perfecto y que todo pasa por algo, así como también me hizo saber que nunca me abandonó; sino que en esos momentos duros y que tuve que hacer tantos sacrificios, me estaba tomando en sus brazos para guiarme, como aquella reflexión que aprendí desde pequeña llamada: Huellas en la arena. Gracias Diosito, más que pedirte tengo que agradecerte. A mi hermosa familia: padres, hermanas y sobrinita; ustedes han sido mi fuerza y mi apoyo en todo momento. Mis padres, Mirtha y Abelardo siempre entendiéndome y dándome fortaleza para nunca abandonar este camino; mis hermanas Adriana, Leticia y Alejandra, quienes siempre me ayudaron en todo lo que pudieron sin problema alguno; mi sobrinita Camila Leticia, quien me dio tanto ánimo al decirme: Tía, te falta poquito para que termines tus tareas y te ganes tu medalla. Los amo! Así como también a mi novio Mario Alejandro Caporales Gómez, quien me tuvo tanta paciencia y comprensión durante la carrera, gracias por tanto, Te Amo. A mis cuatro abuelos, María, Alciro, Mita y Emilio, porque aunque no lo crean siempre pensé en ustedes, más aun en momentos difíciles durante mi carrera y me dieron fuerza para seguir adelante; igualmente a mis tíos, primos, y a todos mis familiares que pusieron un granito de arena durante estos años de estudio, de corazón muchísimas gracias.

Al Instituto de Ciencias de la Tierra, a mi Tutor Ramón Montero, al señor Fernando Ramos, Ángel Rivas, Luis Vilchez y a todo el equipo de trabajo que me ayudó en la parte experimental, gracias por tanta ayuda, sin tener el apoyo del Instituto y sin ustedes no hubiese sido posible culminar con éxito mi trabajo experimental. A mis amigos, José Jesús Pinto, Yamelis Sancler, Javier González y Yerallin Oropeza, quienes estuvieron conmigo en muchos momentos importantes y que incondicionalmente me dieron tanto apoyo, los adoro! A TODOS MIL GRACIAS, por creer en mi... Los llevaré siempre en mi corazón.

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, realizado en la región sur oriental de la isla de Margarita, fueron caracterizadas hidrogeoquímicamente 25 muestras de aguas captadas en 22 pozos de aguas subterráneas y 3 provenientes de aguas superficiales. Dicho estudio se realizó con el objetivo general de determinar los factores que controlan la calidad química y tipos de aguas subterráneas presentes en la referida región. Para llevar a cabo el trabajo, se partió de la toma de muestras de agua en la zona, donde se realizaron las respectivas mediciones de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura; así como otros parámetros como profundidad y ubicación geográfica. Posteriormente, en la etapa de laboratorio, se determinaron los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ; los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y la sílice disuelta  $\text{SiO}_2$ , mediante las técnicas de espectrometría de emisión y absorción atómica con llama, cromatografía iónica, y espectrofotometría UV-Visible, respectivamente; así como también el anión  $\text{HCO}_3^-$ , mediante una titulación potenciométrica. Los resultados obtenidos fueron validados mediante la aplicación de tres metodologías: 1) análisis de una muestra certificada TM 26.3 y su comparación con los valores de fondo reportados de la misma; 2) balance iónico, a través de la construcción de las respectivas relaciones de cationes frente aniones y 3) comparación de la conductividad teórica ideal con la conductividad medida en campo durante el proceso de captación de las muestras de agua.

Los resultados obtenidos para las especies químicas catiónicas y aniónicas fueron proyectadas en un diagrama de Piper, permitiendo la identificación de 4 tipos de agua: bicarbonatadas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ), cloruradas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ ), cloruradas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ ) y bicarbonatadas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ); así como también, las figuras de Stiff fueron útiles para reafirmar la presencia de estos 4 grupos de agua en la zona de estudio.

De acuerdo a la concentración de los SDT que presentaron las muestras de agua atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N°5021), se encontró que el 68% de las muestras pertenecen a la clase 4 o aceptable; mientras que el 32% restante, pertenecen a las tres primeras clases las cuales son: excelente, muy buena y buena;

en base a una segunda clasificación se estableció que el 76% de las aguas son salobres, el 20% son frescas o dulces y el 4% salinas.

Las características de las aguas analizadas pone en evidencia que existe un proceso de evolución hidrogeoquímica caracterizado por un patrón de enriquecimiento en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  a medida que los sistemas cambian espacialmente a zonas alejadas de las áreas de recarga. De igual manera, las relaciones interiónicas señalan que dicho proceso evolutivo obedece a factores como disolución de sales, influencia de la intrusión marina, e intercambio iónico.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>	
<b>I</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II</b>	<b>REVISIÒN BIBLIOGRÀFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>II.1</b>	<b>Definición de Calidad del Agua.....</b>	<b>4</b>
<b>II.2</b>	<b>Actividad Antrópica.....</b>	<b>5</b>
<b>II.3</b>	<b>Aguas Subterráneas y Acuífero.....</b>	<b>7</b>
<b>II.4</b>	<b>Agentes modificadores de la calidad del agua de los sólidos disueltos totales (SDT).....</b>	<b>11</b>
<b>II.5</b>	<b>Intrusión marina y su impacto en la calidad de las aguas subterráneas .....</b>	<b>17</b>
<b>II.6</b>	<b>Clasificación y uso de las aguas subterráneas.....</b>	<b>18</b>
<b>II.7</b>	<b>Antecedentes de la investigación.....</b>	<b>23</b>
<b>II.8</b>	<b>Zona de Estudio.....</b>	<b>33</b>
<b>II.8.1</b>	<b>Ubicación Geográfica.....</b>	<b>33</b>
<b>II.8.2</b>	<b>Clima.....</b>	<b>34</b>
<b>II.8.3</b>	<b>Vegetación.....</b>	<b>35</b>
<b>II.8.4</b>	<b>Suelos.....</b>	<b>35</b>
<b>II.8.5</b>	<b>Hidrología.....</b>	<b>36</b>
<b>II.8.6</b>	<b>Actividades antrópicas.....</b>	<b>36</b>
<b>III</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>37</b>
<b>III.1</b>	<b>Etapas de Pre-Campo.....</b>	<b>37</b>
<b>III.2</b>	<b>Etapas de Campo.....</b>	<b>40</b>
<b>III.3</b>	<b>Etapas de Laboratorio.....</b>	<b>41</b>
<b>III.4</b>	<b>Tratamiento de datos.....</b>	<b>45</b>
<b>IV</b>	<b>PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
<b>IV.1</b>	<b>Validación de resultados.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.1.1</b>	<b>Análisis de la muestra certificada TM 26.3.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.1.2</b>	<b>Balance iónico.....</b>	<b>50</b>
<b>IV.1.3</b>	<b>Conductividad teórica ideal frente conductividad de campo.....</b>	<b>51</b>

	<b>Pág.</b>
<b>IV.2 Caracterización hidrogeoquímica</b> .....	53
IV.2.1 pH, conductividad, sólidos disueltos totales (SDT) y sílice disuelta (SiO <sub>2</sub> )....	54
IV.2.1.1 pH y conductividad.....	55
IV.2.1.2 Sólidos disueltos totales.....	60
IV.2.1.3 Sílice disuelta SiO <sub>2</sub> .....	61
IV.2.2 Cationes: Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> .....	65
IV.2.2.1 Sodio.....	66
IV.2.2.2 Potasio.....	67
IV.2.2.3 Calcio.....	71
IV.2.2.4 Magnesio.....	72
IV.2.3 Aniones: Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	76
IV.2.3.1 Cloruro.....	77
IV.2.3.2 Sulfato.....	79
IV.2.3.3 Nitrato.....	82
IV.2.3.4 Bicarbonato.....	83
<b>V INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	87
<b>V.1 Facies hidrogeoquímicas y su distribución espacial</b> .....	87
<b>V.2 Evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas</b> .....	95
V.2.1 Relaciones iónicas y disolución de sales.....	97
V.2.2 Intercambio catiónico con arcillas.....	107
V.2.3 Intrusión Marina.....	108
V.2.4 Influencia de la actividad antrópica en la calidad de las aguas.....	110
<b>V.3 Calidad química de las aguas subterráneas y usos asociados</b> .....	112
<b>VI CONCLUSIONES</b> .....	114
<b>VII RECOMENDACIONES</b> .....	116
<b>VIII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	117
<b>APÉNDICES</b> .....	124
Apéndice A (Datos recopilados y generados en el estudio).....	125
Apéndice B (Precisión de los análisis).....	127

	<b>Pág.</b>
Apéndice C (Condiciones experimentales de los análisis).....	129
Apéndice D (Descripción del método empleado para la determinación de sílice disuelta (SiO <sub>2</sub> ) mediante la técnica de fotolorimetría).....	132
Apéndice E (Ecuaciones utilizadas para determinar la precisión de los análisis, cálculo del límite de detección y límite de confianza para las especies químicas en estudio).....	135
Apéndice F (Datos y Ecuaciones del balance de carga).....	138
Apéndice G (Cálculo del error de la pendiente y del punto de corte de las curvas de calibración de las especies químicas determinadas).....	142
Apéndice H (Curvas para la determinación de la alcalinidad, cationes, aniones y sílice disuelta).....	144
Apéndice I (Parámetros y concentraciones de elementos para el agua de mar y aguas subterráneas).....	152
Apéndice J (Mapa de ubicación de los puntos de muestreo en la zona Oriental de la isla de Margarita).....	154

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.		Pág.
1.	Representación esquemática de las distintas zonas que conforman el ambiente subterráneo.....	8
2.	Representación esquemática de un acuífero y su clasificación.....	10
3.	Esquema del diagrama de Piper.....	19
4.	Mapa político de la isla de Margarita. En rojo la zona suroriental de la isla.....	34
5.	Esquema que resume el aspecto metodológico realizado.....	39
6.	Bureta automática Jencons Digitate.....	42
7.	Equipo de emisión y absorción atómica AAnalyst 200.....	43
8.	Equipo de Cromatografía Iónica Dionex DX-100.....	44
9.	Equipo para la técnica de fotolorimetría. Spectronic 20 Baush & Lomb....	45
10.	Relación del balance de carga catión-anión para las 25 muestras estudiadas.....	51
11.	Relación de la conductividad ideal a 25°C contra la conductividad determinada en campo.....	52
12.	Cajas gráficas para los valores de pH, conductividad, sólidos disueltos totales y sílice disuelta.....	54
13.	Mapa de distribución espacial del pH en la zona de estudio.....	58
14.	Mapa de distribución espacial de la conductividad en la zona de estudio....	59

<b>Fig.</b>	<b>Pág.</b>
<b>Fig.</b>	<b>Pág.</b>
15. Mapa de distribución espacial de los sólidos disueltos totales en la zona de estudio.....	63
16. Mapa de distribución espacial de la sílice disuelta en la zona de estudio....	64
17. Cajas gráficas para los valores de concentración de sodio, potasio, calcio y magnesio.....	65
18. Mapa de distribución espacial del sodio en la zona de estudio.....	69
19. Mapa de distribución espacial del potasio en la zona de estudio.....	70
20. Mapa de distribución espacial del calcio en la zona de estudio.....	74
21. Mapa de distribución espacial del magnesio en la zona de estudio.....	75
22. Cajas gráficas para los valores de concentración de cloruro, sulfato, nitrato y bicarbonato.....	76
23. Mapa de distribución espacial del cloruro en la zona de estudio.....	80
24. Mapa de distribución espacial del sulfato en la zona de estudio.....	81
25. Mapa de distribución espacial del nitrato en la zona de estudio.....	85
26. Mapa de distribución espacial del bicarbonato en la zona de estudio.....	86
27. Diagrama de Piper para la totalidad de las muestras de agua captadas en la zona sur oriental de la isla de Margarita.....	89
28. Figuras de Stiff generadas para las muestras MASPSJ-2, MASPC-3, MASSJ-4, MASSJ-5, MASSJ-6 y MASSG-10.....	91
29. Figuras de Stiff generadas para las muestras MASSG-11, MASSG-12, MASSG-15, MASSG-16, MASSS-19 y MASEV-23.....	92

30.	Figuras de Stiff generadas para muestras MASPEV-24 y MASPEV-25.....	92
31.	Figuras de Stiff generadas para las muestras MASS-7 y MASSJ-8.....	93
32.	Figuras de Stiff generadas para las muestras MASEE-1, MASSG-13, MASSG-14, MASMA-17, MASMM-21.....	93
33.	Figuras de Stiff generadas para las muestras MASLM-9, MASSC-18, MASSP-20, MASLI-22.....	94
34.	Correlación molar $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ .....	101
35.	Correlación molar $\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ .....	101
36.	Correlación molar $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ .....	102
37.	Correlación molar $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ .....	102
38.	Correlación molar $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ .....	103
39.	Correlación molar $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ .....	103
40.	Correlación molar $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ .....	104
41.	Correlación molar $\text{Mg}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ .....	104
42.	Correlación molar $\text{Na}^+/\text{SO}_4^{2-}$ .....	105
43.	Correlación molar $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ .....	105
44.	Correlación $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (no logarítmica).....	106

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Pág.</b>
1.	Comparación de calidad de agua superficial y subterránea atendiendo diversos parámetros fisicoquímicos y elementos mayoritarios.....	11
2.	Tipos relevantes de contaminantes capaces de modificar la calidad del agua.....	13
3.	Clasificación de las aguas subterráneas de acuerdo a su ambiente de origen y al ión predominante.....	20
4.	Usos asociados en función de la clasificación según los tipos de agua de acuerdo al Decreto 883.....	21
5.	Límite de algunos parámetros que determinan la calidad de las aguas de acuerdo al decreto 883.....	22
6.	Concentración de las especies determinadas durante la etapa de laboratorio.....	48
7.	Concentraciones obtenidas y reportadas de las especies químicas mayoritarias en la muestra de referencia TM 26.3.....	49
8.	Índices hidrogeoquímicos correspondiente a la relación $Cl^-/HCO_3^-$ para cada una de las muestras representativas de la zona de estudio.....	109
1A.	Datos de localidad, ubicación geográfica, profundidad, pH, conductividad y temperatura de los pozos muestreados, recopilados durante la etapa de campo.....	126
1B.	Parámetros de la estadística descriptiva calculados en las réplicas de la muestra MASEE-1 para determinar la precisión de los análisis.....	128
1C.	Condiciones experimentales de análisis por Espectrometría de Absorción y Emisión Atómica.....	130

2C.	Condiciones experimentales de análisis por Cromatografía iónica.....	130
3C.	Condiciones experimentales de análisis por Espectrometría de absorción molecular en el UV-Vis.....	130
4C.	Reactivos utilizados para la preparación de las soluciones madres para la preparación de los patrones para la construcción de las curvas de calibración.....	131
1F.	Datos del balance de carga: sumatoria de cationes y aniones, % de error del balance de carga, conductividad ideal calculada y conductividad medida en campo.....	139
2F.	Conductividades equivalentes de los iones en solución acuosa a 25°C.....	140
1I.	Parámetros y concentraciones de elementos para el agua de mar y aguas subterráneas.....	153

## I. INTRODUCCIÓN

En la naturaleza no existe el agua químicamente pura, ya que, en su ciclo hidrológico ella disuelve, absorbe, almacena y arrastra minerales, gases, compuestos orgánicos, vegetales y microorganismos que le confieren características muy peculiares. La calidad del agua depende entonces de la mayor o menor concentración de esas sustancias, extrañas a su composición. <sup>[1]</sup>

La calidad de cualquier masa de agua, superficial o subterránea depende tanto de factores naturales como de la acción humana. El agua subterránea tiende a ser dulce y potable, pues la circulación subterránea tiende a depurarla de partículas y microorganismos contaminantes. Sin embargo, éstos llegan al acuífero por la actividad humana. Por otro lado, la contaminación puede deberse a factores naturales, si los acuíferos son demasiado ricos en sales disueltas o por la hidrólisis natural de ciertas formaciones rocosas. Debido a que el agua subterránea se mueve a través de un medio poroso, el cual puede ser alguna formación rocosa o suelos, durante su tránsito disuelve parte del material con el cual interacciona, formando parte de la carga disuelta del agua. Por dicha razón, el agua subterránea muy frecuentemente puede contener más sustancias que las presentes en el agua superficial. <sup>[1]</sup>

Los acuíferos costeros pueden contaminarse por intrusión salina y las fosas sépticas, las cuales son, quizá, las fuentes de aguas residuales que más contribuyen a la contaminación del agua subterránea. <sup>[1]</sup>

Para conocer el grado de calidad de las aguas, independientemente del posible uso al que vayan a ser destinadas, se parte de la toma de muestras para la determinación de una serie de parámetros e indicadores. Estos datos, analizados y procesados, posteriormente se convierten en un valor numérico, que permite obtener una serie de índices que determinan el estado general de las aguas en función de unos intervalos de calidades establecidos.

El agua tiene un extenso uso a nivel mundial y por ende es de suma importancia evaluar su calidad, esto a fin de clasificarla según sea el caso como, excelente, muy buena, buena o aceptable, lo que permite destinarla a un uso específico, a fin de evitar consecuencias adversas tanto para los seres humanos, como para las industrias, la agricultura, la ganadería y la naturaleza, entre otros. [2]

En Venezuela existen importantes reservas de aguas subterráneas, que en ocasiones han sido poco evaluadas, no solo desde el punto de vista hidrogeoquímico sino además de su calidad.

En ese sentido, una de las regiones de más interés en función del estudio de calidad de las aguas son las insulares, puesto que en ella se conjugan una serie de factores que comprenden no sólo las condiciones climáticas, sino además, su ubicación geográfica y por ende, la dificultad que existe de suplir a su población de agua dulce. Cabe destacar que los acuíferos en las regiones insulares, son sistemas bastante dinámicos, de tal manera que las aguas almacenadas en los mismos, son susceptibles a cambios evolutivos que generalmente traen como consecuencia un incremento en la salinidad.

La isla de Margarita ha experimentado un importante crecimiento demográfico, ello aunado a que en épocas de vacaciones ocurre un aumento significativo en la demanda de agua para consumo humano, lo que hace ineficiente e insuficiente el agua que es enviada desde tierra firme. Por ello, la necesidad de evaluar las reservas existentes en la isla, con el propósito de conocer su calidad desde el punto de vista químico y de minimizar el déficit ya existente.

En base a los puntos antes señalados, se planteó el siguiente objetivo general:

Determinar los factores que influyen en la calidad química y en tipos de las aguas subterráneas de la zona sur oriental de la isla de Margarita, Edo. Nueva Esparta, Venezuela.

Para poder alcanzar el objetivo general antes mencionado, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar fisicoquímicamente las aguas subterráneas a través de la medición de los parámetros pH, conductividad eléctrica y temperatura.
- Caracterizar desde el punto de vista hidrogeoquímico, las aguas subterráneas a través de la cuantificación de los sólidos disueltos totales (SDT), y de las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ).
- Identificar las facies hidroquímicas de aguas subterráneas, presentes en la zona de estudio.
- Identificar los diversos factores que influyen sobre la calidad química de las aguas subterráneas estudiadas.
- Establecer los tipos de aguas subterráneas en función de su calidad química.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Seguidamente son discutidos y definidos una serie de términos y conceptos asociados con las aguas y su evaluación, que serán de utilidad durante el proceso de adquisición de resultados e interpretación de los mismos para el presente estudio.

### II.1 Definición de calidad del agua

Al considerar la calidad del agua, surge la idea de que el agua “ideal” es aquella formada solamente por hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, el agua en estado natural nunca está en estado puro, sino que presenta sustancias disueltas y en suspensión. Estas sustancias pueden limitar, de modo igualmente natural, el tipo de uso del agua. <sup>[1]</sup>

En este sentido, la hidrología, es la ciencia que trata de las aguas en la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades físicas y químicas y su influencia sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos. <sup>[1]</sup>

La calidad del agua no es un criterio completamente objetivo, pero está socialmente definido y depende del uso que se le piense dar al líquido, por lo que cada uso requiere un determinado estándar de calidad. Por esta razón, para evaluar la calidad de la misma, se debe ubicar en el contexto del uso probable que tendrá. Así por ejemplo, el estándar de calidad para el agua apta para consumo humano, no tendrá los mismos parámetros de calidad que los necesarios para el agua que forma parte de una laguna. <sup>[2]</sup>

En consecuencia, la calidad de un cuerpo de agua se puede definir como las características físicas, químicas y biológicas de las aguas naturales que determinan su composición y utilidad al hombre y demás seres vivos. <sup>[2]</sup>

## II.2 Actividad antrópica

Las actividades realizadas por el hombre, como la asociada a la agricultura, la ganadería, la industrial y minera, generalmente pueden introducir contaminantes hacia los diferentes sistemas naturales, conllevando a la alteración de su composición química original, en algunos casos hasta niveles que pueden llevar al solapamiento de los procesos geoquímicos que operan en el sistema subterráneo.<sup>[3]</sup>

En la naturaleza, el agua puede adquirir una variedad de constituyentes, clasificados éstos como inorgánicos y orgánicos.

Los solutos inorgánicos son aportados mediante el contacto del agua subterránea con el ambiente a través de la atmósfera, las rocas, disolviendo minerales y con sistemas contaminados por el hombre. De esta manera, la lluvia disuelve los gases presentes en la atmósfera, entre ellos  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  y  $SO_2$ , en su circulación por encima y a través de la corteza terrestre; el agua reacciona con los minerales del suelo y de las rocas, lo que le aporta principalmente  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$  de  $Na^+$  y  $K^+$ , y óxidos de Ca y Mg. Las actividades humanas aportan una variada gama de componentes inorgánicos, que llegan a los cuerpos de agua por escurrimientos o por vertidos directos.<sup>[4]</sup>

Por su parte, los constituyentes orgánicos son aportados por flujos de agua de escorrentía que han estado en contacto con excremento de animales o con desechos de la vida acuática. La actividad humana también aporta elementos orgánicos al agua natural, ya sea esto a través de la descomposición de desechos humanos o a través de las aguas servidas vertidas directamente a los reservorios de agua. Otra actividad que aporta constituyentes orgánicos, puede estar asociado al derrame de crudos y derivados.<sup>[4]</sup>

Así mismo, las prácticas agrícolas constituyen un foco de contaminación de carácter difuso, derivado de su desarrollo sobre grandes áreas; por el contrario, la ganadería,

constituye un foco puntual, derivado de las deficiencias en las instalaciones y de la incorrecta eliminación de residuos. <sup>[4]</sup>

La aplicación incorrecta de los fertilizantes, con frecuencia no adaptada a las necesidades de nutrientes de los cultivos, junto con las prácticas de riego por gravedad y por sistemas de alta presión en zonas vulnerables, favorecen el lavado de  $\text{NO}_3^-$  y su incorporación a los acuíferos. <sup>[4]</sup>

La contaminación del agua subterránea procedente de la ganadería tiene fundamentalmente un carácter orgánico y bacteriológico, ésta se produce a consecuencia del vertido incorrecto e los residuos animales y de su aplicación como abonos, generalmente en las áreas próximas a los puntos de producción. <sup>[4]</sup>

La principal característica de la contaminación del agua por causa de la industria es la gran variedad de sustancias químicas, orgánicas e inorgánicas, susceptibles de degradar la calidad natural del recurso. <sup>[4]</sup>

La determinación de las características químicas del agua y la observación de su evolución temporal, permite conocer la situación de la calidad de los recursos subterráneos. La evaluación de la carga contaminante procedente de los sectores urbano, agrícola e industrial, permite establecer relaciones entre los procesos de degradación detectados y el potencial origen de los contaminantes. <sup>[4]</sup>

Desde el punto de vista del agricultor, el agua que sale de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas contiene en condiciones normales unos  $200\text{-}400 \text{ mg.L}^{-1}$  más de sales disueltas que el agua de abastecimiento de la zona urbana. <sup>[5]</sup>

### II.3 Aguas subterráneas y acuífero

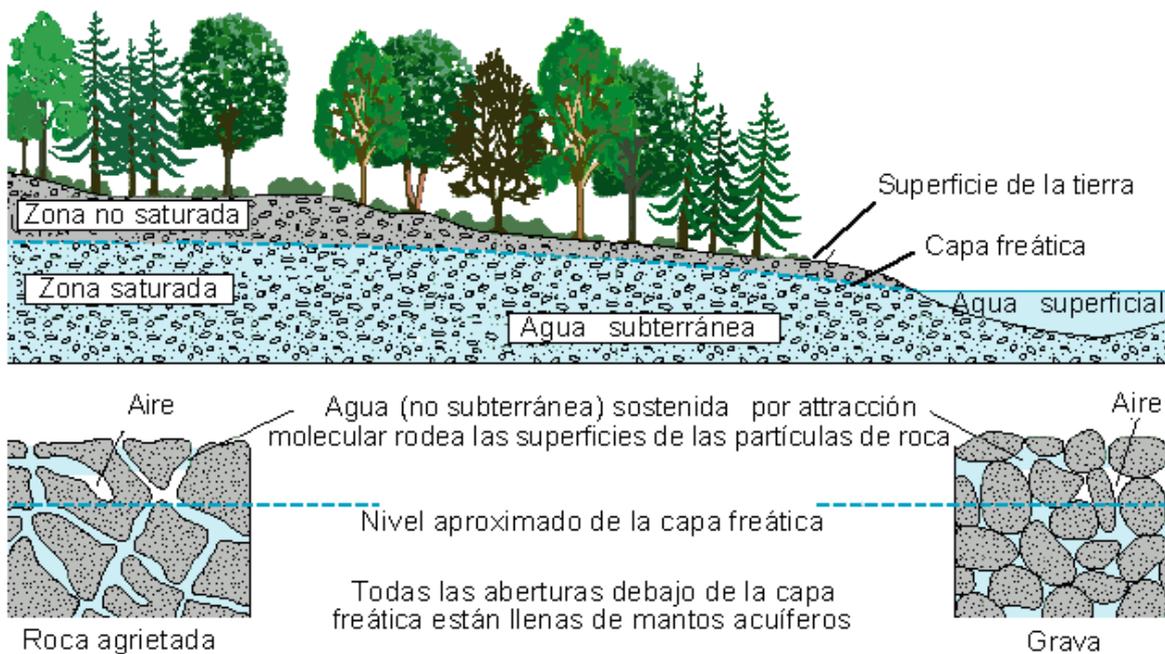
La contaminación del agua consiste en la incorporación de materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y de otros tipos; así como por aguas residuales. Estas materias deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos pretendidos. [6]

El agua subterránea, representa una fracción importante de la masa de agua presente en los continentes. Es aquella que se aloja en los acuíferos bajo la superficie de la tierra, ésta se almacena y se mueve lentamente a través de rocas altamente permeables conocidas como acuíferos. En ese sentido, un acuífero puede ser una capa de grava o arena, una capa de arenisca o caliza o incluso una formación rocosa, como el granito fracturado, que tiene aberturas de tamaño considerable. En términos de almacenamiento, en cualquier instante en el tiempo, el agua subterránea es la mayor fuente única de agua dulce disponible para uso humano. [7]

En un sentido amplio, puede señalarse que el agua subterránea no es más que el agua del subsuelo que satura por completo los poros o grietas en suelos y rocas. Ésta se recarga por la precipitación y dependiendo del clima local y la geología, es distribuido de manera desigual, tanto en cantidad como en calidad. Cuando cae la lluvia, parte del agua se evapora, y otra parte se acumula en los arroyos, infiltrándose en algunos de los poros o grietas de la tierra y rocas. Inicialmente, el agua que penetra a través del suelo sustituye al agua que se ha evaporado o utilizado por las plantas durante un período seco anterior. Entre la superficie de la tierra y el agua del acuífero está una zona que los hidrólogos llaman la zona no saturada. En esta zona, por lo general hay al menos un poco de agua, sobre todo en los pequeños poros de las secuencias sedimentarias y las rocas donde los poros de mayor tamaño, por lo general contienen aire en lugar de agua. Después de una lluvia importante, esta zona puede llegar a saturarse de agua, mientras que después de un largo período de sequía, puede llegar a secarse. Sin embargo, una parte del

agua puede quedar atrapada en la zona no saturada, por atracción molecular, por lo que no fluirรก hacia manantiales o pozos. [7]

En la Figura 1 se muestran esquemรกticamente las zonas que conforman los ambientes que constituyen al sistema subterrรกneo.



**Figura 1:** Representación esquemática de las distintas zonas que conforman el ambiente subterráneo. [7]

En contraste con la zona no saturada, los poros en la zona saturada se llenan totalmente de agua, es en esta zona donde el agua presente se conoce como agua subterránea. La superficie superior de la zona saturada se denomina nivel freático, donde la presión del agua es lo suficientemente grande como para permitir que entre agua y fluya hacia los pozos, facilitando de ese modo que el agua subterránea sea captada para su uso. [8]

Por otro lado, puede señalarse que un acuífero es una unidad geológica saturada que contiene y transmite agua, de tal manera que pueda extraerse en cantidades económicamente aprovechables. De acuerdo con las condiciones de presión a la que está sometida el agua en el subsuelo, los acuíferos pueden ser clasificados como libre o confinado.

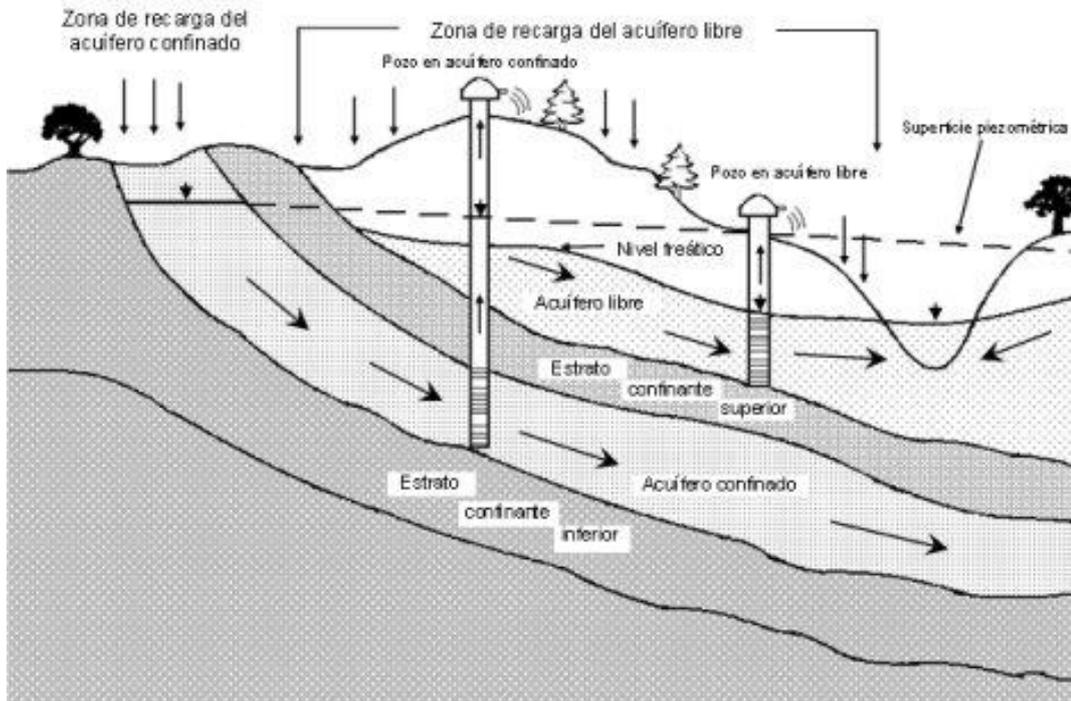
Cuando el agua almacenada en un acuífero está en contacto directo con la atmósfera a través de los poros y fisuras de la roca, el acuífero se denomina libre, debido a que el peso de la roca no ejerce ninguna presión sobre el agua en que ella se almacena; es decir, que el esqueleto del acuífero es una estructura independiente y estable. Mientras que, cuando un acuífero está aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables, se le denomina confinado. Un acuífero confinado está siempre saturado de agua y en todos sus puntos, ésta se encuentra a una presión mayor que la atmosférica.<sup>[9]</sup>

En general, los acuíferos reciben agua de la precipitación atmosférica, aunque puede recibirla por otras vías, se pueden definir tres zonas: zona de alimentación o recarga, zona de circulación y zona de descarga.

La zona de alimentación es aquella donde el agua de precipitación se infiltra; por su parte, la zona de descarga es aquella donde el agua sale del acuífero, esto puede ser a través de un manantial o como descarga al mar o a un río. Así mismo, la zona de circulación es la parte comprendida entre la zona de alimentación y la zona de descarga.<sup>[7]</sup>

En este sentido, la superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero, se denomina superficie piezométrica, y en un punto concreto, en un pozo, se habla de nivel piezométrico.<sup>[7]</sup>

En la Figura 2 se esquematizan los acuíferos confinados y freáticos, así como los distintos términos asociados a los mismos.



**Figura 2:** Representación esquemática de un acuífero y su clasificación. <sup>[9]</sup>

En otro orden de ideas, las fuentes de contaminación se pueden originar en la superficie del terreno, durante las actividades agrícolas, en el subsuelo por arriba del nivel freático, en las áreas de acumulación de desechos urbanos a cielo abierto y en el subsuelo por debajo del nivel freático, como es el caso de pozos abandonados; esto es tomando como criterio de evaluación de una posible contaminación, características físicas como: temperatura, pH, turbidez, olor, color; y químicas como: sólidos disueltos totales (SDT), tipo y concentración aniónica y catiónica y otros compuestos solubles. <sup>[10]</sup>

En la Tabla 1 se comparan los valores de pH y de la concentración de las principales especies químicas. Nótese que las aguas subterráneas poseen mayores niveles de concentración que las superficiales, esto como producto del mayor tiempo de residencia de la misma en el acuífero. <sup>[10]</sup>

**Tabla 1.** Comparación de calidad de agua superficial y subterránea, atendiendo diversos parámetros fisicoquímicos y elementos mayoritarios. <sup>[10]</sup>

Parámetro o elemento	Agua superficial	Agua subterránea
Temperatura	Varía con la estación	Constante
pH	6-8	7,4
Na <sup>+</sup>	6,3 mgL <sup>-1</sup>	30,0 mgL <sup>-1</sup>
K <sup>+</sup>	2,3 mgL <sup>-1</sup>	3,0 mgL <sup>-1</sup>
Ca <sup>2+</sup>	15,0 mgL <sup>-1</sup>	50,0 mgL <sup>-1</sup>
Mg <sup>2+</sup>	4,1 mgL <sup>-1</sup>	7,0 mgL <sup>-1</sup>
Cl <sup>-</sup>	7,8 mgL <sup>-1</sup>	20,0 mgL <sup>-1</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3,7 mgL <sup>-1</sup>	30,0 mgL <sup>-1</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	58,0 mgL <sup>-1</sup>	200,0 mgL <sup>-1</sup>
SiO <sub>2</sub>	14,0 mgL <sup>-1</sup>	16,0 mgL <sup>-1</sup>
SDT	120,0 mgL <sup>-1</sup>	350 mgL <sup>-1</sup>

#### II.4 Agentes modificadores de la calidad del agua y de los sólidos disueltos totales (SDT)

Aunque el 70 % de la corteza terrestre está cubierta por agua, sólo el 0,65 % es potable, el 2,05 % está constituida por los glaciares como hielos continentales; mientras que la mayor parte que corresponde al 97,3 %, está en los océanos y mares, cuya característica resaltante es su contenido de más de 30 g.L<sup>-1</sup> de sólidos disueltos totales (SDT), lo que evidentemente no la hace apta para el consumo humano y animal. <sup>[11]</sup>

Existe un grupo importante de agentes capaces de modificar la calidad de las aguas, a saber: aguas residuales y otros residuos que demandan oxígeno, en su mayor parte materia orgánica, cuya descomposición produce la desoxigenación del agua;

agentes infecciosos que inhiben el desarrollo de otras formas de vida, como las bacterias; nutrientes vegetales que pueden estimular el crecimiento de las plantas acuáticas, éstas a su vez, interfieren con los usos a los que se destina el agua, ya que al descomponerse, agotan el oxígeno disuelto y producen olores desagradables; productos químicos, destacando los pesticidas, diversos productos industriales, las sustancias contenidas en los detergentes, y los productos de la descomposición de otros compuestos orgánicos; los hidrocarburos y derivados, especialmente el procedente de los vertidos accidentales; las hidrólisis de minerales inorgánicos y compuestos químicos; sedimentos formados por partículas del suelo y minerales arrastrados por las tormentas y escorrentías desde las tierras de cultivo, los suelos sin protección, las explotaciones mineras, y las carreteras; y sustancias radiactivas procedentes de los residuos producidos por la minería y el refinado del uranio y el torio, las centrales nucleares y el uso industrial, médico y científico de materiales radiactivos. [6]

En la Tabla 2 se presentan los tipos relevantes de contaminantes que pueden conllevar a modificar la calidad del agua.

**Tabla 2.** Tipos relevantes de contaminantes capaces de modificar la calidad del agua. <sup>[10]</sup>

Tipo de Contaminación	Causa	Efectos
Térmica	Industriales; procesos de enfriamiento.	Temperaturas elevadas reducen los niveles de oxígeno disuelto y aumentan la velocidad de actividades biológicas y químicas.
Sólidos suspendidos	Materiales inertes, cerámicos, efluentes industriales.	Depósitos en lechos de río, lagos, modificando el ecosistema. El aumento de turbidez dificulta el pasaje de la luz a las plantas acuáticas.
Aceites/ grasas	Efluentes industriales, fugas de tanques de almacenamiento, entre otros.	Evita la absorción de oxígeno, lo que determina reducciones en su concentración e inhibe la flora y fauna acuática.
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Arrastres debido al empleo de fertilizantes nitrogenados en la agricultura intensiva. Descomposición de residuos orgánicos.	Causa crecimiento excesivo de algas y vegetales acuáticos. Puede reducir los niveles de oxígeno disuelto. Puede contribuir a eutroficación en lagos.
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Presente en fertilizantes y detergentes así como en efluentes industriales.	No considerado directamente como tóxico; niveles elevados están asociados con eutroficación.
Residuos orgánicos	Descargas industriales.	Reducción dramática del oxígeno disuelto, aumentando la demanda biológica de oxígeno.
pH	Descargas industriales; también debidas a tipos de suelo y a la geología.	Acidez y/o alcalinidad excesiva, pueden ser tóxicas a peces, plantas, microorganismos.
Microcontaminantes	Descargas industriales, pesticidas, etc.	Tóxico, en particular si se trata de compuestos orgánicos aromáticos o alifáticos halogenados.

El término sólido se refiere a la materia suspendida o disuelta presente en un medio acuoso. Los sólidos disueltos totales (SDT) comprenden las sales inorgánicas, principalmente de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y pequeñas concentraciones de materia orgánica que están disueltas en el agua. La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo o medio para conducir la corriente eléctrica; es decir, para permitir el paso a través de él, de partículas cargadas, en este caso iones, los cuales transportan la carga en disoluciones de electrolitos. Los SDT y la conductividad eléctrica están estrechamente relacionadas, ya que se ha determinado que existe una correlación directa entre conductividad y los SDT para cuerpos de agua dulce y salobre. Dicha correlación no se extiende a ambientes "hipersalinos" (salinidad > 5% p/v), donde la conductividad es afectada por la composición específica de iones presentes en el agua. En estos ambientes, la conductividad puede ser significativamente diferente, dado que las distintas especies iónicas presentan variados niveles de conductancia específica. [12]

Los sólidos disueltos en las aguas, se determinan mediante análisis específicos y posteriormente se convierten en un valor numérico para determinar la calidad de la misma. Como los silicatos, carbonatos, sulfatos y cloruros son los principales formadores de las rocas, en general, los iones más abundantes en las aguas son:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , denominados mayoritarios; mientras que los minoritarios lo constituyen especies como  $\text{F}^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ ; los traza están representados por los elementos Li, B, Sr, Ba, Fe, Ni, Cu, Zn, Cr, Hg, As, entre otros. Así como la sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ), la cual es también incluida en los componentes minoritarios. [13]

El ión  $\text{SO}_4^{2-}$  puede provenir del uso de fertilizantes y efluentes industriales [14]. En aguas dulces, la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  puede variar entre 2 y 150  $\text{mg.L}^{-1}$ ; en las aguas salinas puede llegar a 5000  $\text{mg.L}^{-1}$ ; y en salmueras puede alcanzar hasta 200000  $\text{mg.L}^{-1}$ . [15]

Por su parte, el ión  $\text{Cl}^-$  presente en las aguas subterráneas puede ser originado de la disolución de partículas sólidas existentes en la atmósfera, especialmente en las regiones áridas. La concentración de  $\text{Cl}^-$  en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  a más de 2000 ó 3000  $\text{mg.L}^{-1}$ ; no obstante que en salmueras puede llegar a casi 200000  $\text{mg.L}^{-1}$  [16]

Finalmente, el ión  $\text{NO}_3^-$  presente en las aguas subterráneas frecuentemente tiene un origen orgánico. Pocas rocas contienen cantidades apreciables de valores de concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ , por lo que valores elevados ( $>10 \text{ mg.L}^{-1}$ ) de esta especie se asocia a la actividad antrópica, excremento de animales y uso de fertilizantes, entre otros. [17] Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas varía ampliamente, aunque no suele sobrepasar los  $10 \text{ mg.L}^{-1}$ . [18]

Así mismo, es importante acotar que desde el punto de vista de su comportamiento geoquímico, las especies químicas estudiadas en el presente trabajo de investigación, son descritas de la siguiente manera:

El  $\text{Ca}^{2+}$  proviene mayoritariamente de la meteorización de carbonatos, sulfatos y silicatos, ya que es un componente común de los minerales presentes en éstas rocas. [16]

El  $\text{Mg}^{2+}$  está principalmente en los silicatos ferromagnesianos presentes en las rocas ígneas ultramáficas. Los silicatos de  $\text{Mg}^{2+}$  son alterados por el agua en presencia de  $\text{CO}_2(\text{g})$  movilizándolo al magnesio en solución. [13]

El  $\text{Na}^+$  puede provenir del ciclaje de sales de sodio presente en los sedimentos evaporíticos, así como también por la influencia de la intrusión marina en los acuíferos. [13]

El  $\text{K}^+$  es derivado de la meteorización de los silicatos, principalmente los feldespatos potásicos. [13]

El  $\text{Cl}^-$  es un anión minoritario o traza en muchas rocas ígneas, por lo que su contribución a la carga disuelta de los ríos va a ser relativamente baja cuando es comparada con las que pueden ser aportadas por las rocas evaporíticas. Es importante recordar que la principal fuente de  $\text{Cl}^-$  a las aguas, es el ciclaje atmosférico de las partículas de cloruro de sodio presentes en los aerosoles marinos, y también como producto de la intrusión marina en los acuíferos. <sup>[16]</sup>

El  $\text{NO}_3^-$  es la especie aniónica menos abundante en las aguas. Su principal aporte proviene de actividades antrópicas, las cuales se han mencionado anteriormente para esta especie.

Con respecto al  $\text{SO}_4^{2-}$  se tiene que los sulfuros son la principal fuente de  $\text{SO}_4^{2-}$  a las aguas, particularmente en aquellos ríos que drenan sobre rocas ígneas. Estos minerales son oxidados durante el proceso de meteorización, produciendo sulfatos solubles que son transportados por las aguas. Otros minerales que aportan  $\text{SO}_4^{2-}$  a las aguas son el yeso y la anhidrita, <sup>[16]</sup> así como otros factores que se han mencionado anteriormente para esta especie.

El  $\text{HCO}_3^-$  es una de las especies más abundantes en los cuerpos de agua, siendo el principal agente regulador del pH de las aguas naturales. Su presencia es debida principalmente al aporte atmosférico del  $\text{CO}_2$  (g). Otras fuentes de esta especie son las rocas carbonáticas, por medio de la meteorización de minerales carbonáticos como la dolomita y la calcita. <sup>[16]</sup>

El Si se encuentra prácticamente en todas las rocas formando minerales tipo silicatos y feldespatos, siendo los de más alta solubilidad aquellos de Na y K disueltos durante el proceso de meteorización de las rocas. El Si en agua corresponde a dos estados: sílice coloidal o sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ). <sup>[13]</sup>

## **II.5 Intrusión marina y su impacto sobre la calidad de las aguas subterráneas**

Los acuíferos costeros al estar en contacto con el océano, están expuestos a los continuos transvases de agua salada procedente del mar y a su vez a la descarga de parte de sus aguas en éste. <sup>[19]</sup>

Una consecuencia inmediata del desarrollo demográfico y económico que se ha producido en las últimas décadas en las zonas costeras, es la necesidad de disponer de recursos hídricos en cuantía y calidad acordes con las exigencias requeridas para cada uso. Por ello los acuíferos costeros han adquirido una importancia estratégica como fuente inmediata y a veces única de estos recursos. Su explotación induce a la aparición del fenómeno de intrusión marina que en ocasiones ponen en peligro su sostenibilidad. Para evitar su aparición es necesaria una adecuada planificación y gestión, acciones que no siempre se han realizado de la manera más correcta. La intrusión marina es un proceso dinámico, donde el frente de agua salada avanza tierra adentro en los periodos de menor recarga del acuífero y retrocede hacia el mar cuando la recarga es mayor. Este equilibrio natural puede verse alterado por la acción humana al modificar la descarga de agua dulce al mar, fundamentalmente debido a extracciones por bombeos, provocando un descenso de la superficie piezométrica y en consecuencia la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro, lo que origina un deterioro de la calidad del agua y limita su utilización para cierto usos; su recuperación suele ser lenta y con un coste económico elevado. <sup>[19]</sup>

La intrusión salina ocurre porque el agua dulce es menos densa que el agua salada, de manera que flota sobre ella, formando un cuerpo lenticular grande que en ocasiones se extiende a profundidades considerables por debajo del nivel del mar. En dicha situación, si el nivel freático está a un metro por encima del nivel del mar, la base del volumen del agua dulce puede llegar a una profundidad de hasta 40 metros por debajo del nivel del mar. En otras palabras, la profundidad del agua dulce por debajo del nivel del mar es unas 40 veces mayor que el nivel freático por encima del

nivel del mar. Por tanto, cuando el bombeo excesivo hace descender el nivel freático en una determinada cantidad, el fondo de la zona de agua dulce puede elevarse 40 veces esa cantidad. [20] Este fenómeno de intrusión marina eleva el contenido de sales en los cuerpos de agua y por ende aumenta la concentración de los SDT en las mismas, afectando directamente a su calidad.

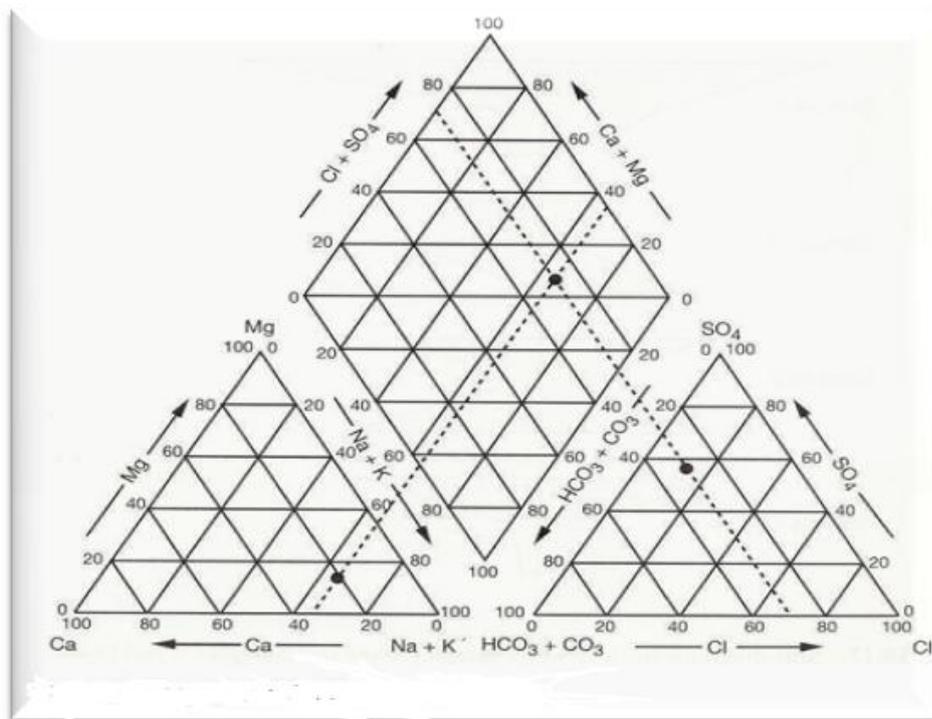
## II.6 Clasificación y uso de las aguas subterráneas

Una clasificación sencilla para el tipo de aguas subterráneas basada en la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) es la siguiente: aguas frescas o dulces, con concentración inferior a  $1000 \text{ mg.L}^{-1}$  de SDT; aguas salobres, que oscilan entre  $1000$  y  $10000 \text{ mg.L}^{-1}$ ; aguas salinas, cuya concentración de SDT está entre  $10000$  y  $100000 \text{ mg.L}^{-1}$  de SDT; y salmueras, con concentraciones superiores a  $100000 \text{ mg.L}^{-1}$  [16]

Una de las herramientas comúnmente usadas en estudios geoquímicos es aquella que propone un sistema de clasificación de aguas a través de la elaboración de un diagrama que permite establecer tipos de agua, mezclas entre ellas e inclusive evolución geoquímica. También puede ser usado en estudios de contaminación de aguas, determinación de procesos de disolución y precipitación, intercambio iónico e interacción agua-roca, entre otras aplicaciones. [18]

El diagrama consta de dos triángulos y un romboedro central (Figura 3). En el triángulo izquierdo son representadas las concentraciones de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  en miliequivalentes.litro<sup>-1</sup>, en una escala que está entre 0-100%; mientras que, en el triángulo derecho se proyectan las concentraciones de los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  igualmente en miliequivalentes.L<sup>-1</sup> en una escala que está entre 0-100%.

Por su parte, en el romboedro central son colocados los puntos obtenidos tanto para cationes como para aniones, lo que permite la clasificación del tipo o tipos de agua presentes en el área de estudio. [18]



**Figura 3:** Representación esquemática del diagrama de Piper [18]

También, existen relaciones como aquella que propone un sistema de clasificación de aguas de acuerdo a su ambiente de origen y al ión predominante presente en solución. Ésta considera dos grupos de aguas, tomando en cuenta las concentraciones de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ ; a saber: meteórica y connata, que a su vez se subdividen en  $\text{Na}^+-\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}-\text{Cl}^-$  y  $\text{Mg}^{2+}-\text{Cl}^-$  [21] Esta clasificación se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Clasificación de las aguas subterráneas de acuerdo a su ambiente de origen y al ión predominante <sup>[21]</sup>

Relación Iónica Principal	Tipo de Agua	Relación Iónica Secundaria	Facies Hidrogeoquímicas
$\text{Na}^+/\text{Cl}^- > 1$	Meteórica	$\frac{(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)}{\text{SO}_4^{2-}} > 1$	Bicarbonato de sodio. ( $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ )
		$\frac{(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)}{\text{SO}_4^{2-}} < 1$	Sulfato de sodio. ( $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-}$ )
$\text{Na}^+/\text{Cl}^- < 1$	Connata	$\frac{(\text{Cl}^- - \text{Na}^+)}{\text{Mg}^{2+}} > 1$	Cloruro de Calcio. ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$ )
		$\frac{(\text{Cl}^- - \text{Na}^+)}{\text{Mg}^{2+}} < 1$	Cloruro de Magnesio. ( $\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$ )

Las aguas meteóricas están caracterizadas por tener en solución más equivalentes de ión  $\text{Na}^+$  que de  $\text{Cl}^-$  ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^- > 1$ ), originando la formación de sales de sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) y de bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) producto del exceso de  $\text{Na}^+$  en las aguas. Mientras que las aguas connatas, se caracterizan por presentar una relación ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^- < 1$ ), promoviendo la formación de sales de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) y de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ). <sup>[21]</sup>

En el contexto nacional, atendiendo a una serie de parámetros medidos en las aguas, así como a la concentración de especies químicas mayoritarias, minoritarias y trazas, fue publicado en Gaceta Oficial N° 5021 (1995) el Decreto 883, el cual clasifica las aguas según la calidad que presentan como excelente o clase 1, muy buena o clase 2, buena o clase 3 y aceptable o clase 4. <sup>[2]</sup>

Los usos de las aguas asociados con la clasificación de las mismas establecidos en el artículo 5 del decreto 883, se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Usos asociados en función de la clasificación según los tipos de agua de acuerdo al Decreto 883. <sup>[2]</sup>

<b>TIPO DE AGUA</b>	<b>USOS ASOCIADOS</b>
<b>EXCELENTE O CLASE 1</b>	Uso doméstico, protección de las comunidades hidrobiológicas, recreación de contacto total; uso industrial
<b>MUY BUENA O CLASE 2</b>	Uso doméstico, protección de las comunidades hidrobiológicas, recreación de contacto total, uso agrícola y pecuario; comercio y navegación; uso industrial
<b>BUENA O CLASE 3</b>	Recreación de segundo contacto, uso agrícola y pecuario; armonía paisajística, comercio y navegación; uso industrial
<b>ACEPTABLE O CLASE 4</b>	Armonía paisajística; comercio y navegación industrial

En la Tabla 5 se presentan los criterios para los parámetros físicos y químicos que determinan la calidad de las aguas y sus usos.

**Tabla 5.** Límite de algunos parámetros que determinan la calidad de las aguas de acuerdo al decreto 883. [2]

Parámetro	Límite máximo de acuerdo al tipo de agua			
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Bicarbonatos	----	370 mgL <sup>-1</sup>	370 mgL <sup>-1</sup>	---
Calcio	200 mgL <sup>-1</sup>	200 mgL <sup>-1</sup>	200 mgL <sup>-1</sup>	---
Carbonatos	---	5 mgL <sup>-1</sup>	5 mgL <sup>-1</sup>	---
Cloruros	300 mgL <sup>-1</sup>	250 mgL <sup>-1</sup>	250 mgL <sup>-1</sup>	---
Fluoruros	<1,5 mgL <sup>-1</sup>	<1,5 mgL <sup>-1</sup>	<1,5 mgL <sup>-1</sup>	<1,5 mgL <sup>-1</sup>
Hierro	1 mgL <sup>-1</sup>	1 mgL <sup>-1</sup>	5,0 mgL <sup>-1</sup>	5,0 mgL <sup>-1</sup>
Magnesio	0,2 mgL <sup>-1</sup>	0,2 mgL <sup>-1</sup>	70 mgL <sup>-1</sup>	---
Manganeso	0,2 mgL <sup>-1</sup>	0,2 mgL <sup>-1</sup>	0,2 mgL <sup>-1</sup>	---
Nitratos+Nitritos	10 mgL <sup>-1</sup>	10 mgL <sup>-1</sup>	---	---
pH	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	3,8-10,5
Potasio	---	---	20 mgL <sup>-1</sup>	---
Sodio	140 mgL <sup>-1</sup>	140 mgL <sup>-1</sup>	---	---
SDT	1300 mgL <sup>-1</sup>	1300 mgL <sup>-1</sup>	1300 mgL <sup>-1</sup>	---
Sulfatos	340 mgL <sup>-1</sup>	340 mgL <sup>-1</sup>	340 mgL <sup>-1</sup>	---

Debe destacarse que dentro de esta normativa contenida en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), son indicados los límites permisibles para parámetros como la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), así como de especies químicas mayoritarias y minoritarias en las aguas en función de cada tipo o clase. En el caso particular de los SDT, este parámetro es común para las tres primeras clases

estableciendo un límite máximo de  $1300 \text{ mg.L}^{-1}$  [2], no estando reportado dentro de dicha normativa para la clase 4.

## II.7 Antecedentes de la investigación

Existen estudios tanto a nivel internacional como nacional, referentes a lo que son las aguas subterráneas y la importancia que tienen para toda la sociedad. Estos estudios engloban factores y parámetros que determinan la calidad de las aguas y que pueden ser utilizados como sustento para el presente trabajo de investigación; en ese sentido, a continuación se mencionan algunos de los más destacados:

### *Antecedentes Internacionales*

**Causapé (2003)** [22] estudió la calidad química de los ríos Riquel y Arba en España. Los objetivos de este estudio estuvieron enmarcados en el análisis de la variabilidad espacial de la calidad de éstos ríos en función de la concentración de  $\text{NO}_3^-$ , asociado a la variabilidad geológica y la influencia del sistema agrario, de las aguas del sistema Riquel-Arba. Este autor determinó la concentración de  $\text{NO}_3^-$  mediante la técnica de cromatografía iónica. Los resultados obtenidos, muestran la existencia de un aumento progresivo en la concentración de esta especie en dicho sistema, debido a la colección acumulada de los flujos de retorno de riego.

Causapé (2003) apunta que la calidad de las aguas en estos ríos se ve seriamente afectada por su salinización y por la presencia de una alta concentración de  $\text{NO}_3^-$  que limita su uso agrícola, industrial, urbano y ecológico. Indica además que el regadío juega un papel esencial en la calidad del sistema formado por los ríos Riquel-Arba, ya que sus flujos de retorno con altos valores de  $\text{NO}_3^-$  aportan importantes volúmenes de agua.

**Jalali (2005)** [23] se enfocó en el estudio de la presencia de los iones mayoritarios de las aguas subterráneas en el área de Bahar, Homadan, al oeste de Irán; ésto con el

objetivo de evaluar su composición química. En esta zona, dichas aguas han sido explotadas durante el último siglo, principalmente para ser usada en el riego y abastecimiento. Para este trabajo, este autor captó un total de 135 muestras representativas de las aguas subterráneas de diferentes pozos existentes en la zona de interés. Así mismo, para la determinación de las especies catiónicas  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  utilizó la técnica de espectrometría de absorción y emisión atómica con llama; mientras que para la determinación de las especies aniónicas  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , utilizó la técnica de cromatografía iónica. Los resultados obtenidos por Jalali (2005), le permitió demostrar que la concentración de los cationes es del orden de:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ , mientras que para los aniones, es  $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ . Igualmente determinó que los tipos hidroquímicos  $\text{Ca}^{+2}\text{-HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$  dominan la mayor parte del área estudiada. Finalmente dicho investigador concluyó que los procesos de intercambio de cationes y la hidrólisis de los aluminosilicatos, contribuyen con la composición química del agua.

**Sherif et al (2006)** <sup>[24]</sup> realizaron estudios hidrogeoquímicos y geoelectrónicos para delimitar una intrusión marina en el acuífero Cuaternario de Wadi Ham en los Emiratos Árabes. Para ello utilizaron el método de la resistividad terrestre junto con la valoración hidrogeoquímica, con el propósito de poder obtener una relación empírica entre la resistividad y los sólidos disueltos totales (SDT), facilitando así la identificación de la zona de transición o dispersión entre el cuerpo de agua dulce y la intrusión marina, esto debido a que la relación salinidad/resistividad varía gradualmente en el acuífero. Con estas herramientas, adicionalmente lograron identificar y clasificar tres tipos de agua subterránea dentro del acuífero, a saber: dulce, salobre y salada.

**Anshumali y Ramahathan (2007)** <sup>[25]</sup> desarrollaron un proyecto de investigación que les permitió realizar un estudio amplio y sistemático del patrón estacional de los iones mayoritarios y minoritarios  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  aplicando los métodos analíticos de espectrometría de absorción y emisión atómica con llama y cromatografía iónica, en aguas subterráneas captadas en la región de

Pandoh Lake, Himachal, Pradesh en la India. El objetivo principal fue el de entender los procesos geoquímicos que controlan la calidad de dichas aguas.

A través de los resultados obtenidos, Anshumali y Ramahathan (2007) demostraron que existe una marcada variación estacional en la concentración de los iones, sosteniendo además que en las estaciones de invierno y verano, los eventos de precipitaciones atmosféricas son un factor importante en el control de iones mayoritarios  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . En ese sentido, en la temporada de lluvias, detectaron concentraciones relativamente bajas para todos los iones, como consecuencia de los efectos de dilución, particularmente en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  que, en general, representan alrededor del 70% de los iones totales durante todo el año.

Finalmente, Anshumali y Ramahathan (2007) concluyeron que la variación de la calidad del agua en espacio y tiempo, así como su comparación con la de otros lagos del Himalaya, indican que este lago no está contaminado; sin embargo, detectaron indicios de un posible enriquecimiento de nutrientes debido a un paulatino proceso de eutrofización en el Himalaya. Debido a ello, señalan que el lago Pandoh merece una atención adicional para la gestión de los recursos hídricos con el propósito de preservar su estado eco-hidrológico.

**Chen et al (2007)** <sup>[26]</sup> estudiaron la calidad del agua captada en pozos ubicados en una zona rural sujeta al riego con agua de la mina ácida de Guangdong Dabaoshan al Sur de China, en función de parámetros químicos así como también de su toxicidad. Los resultados obtenidos por estos autores, reflejaron la existencia de la tendencia al aumento de los valores del pH del agua hacia el sur, evidenciando que el impacto de la acidez del agua de riego sobre las aguas subterráneas, disminuye con la distancia a la entrada del agua de riego.

El estudio de la calidad del agua de los pozos que fueron seleccionados Chen et al (2007) muestra que el Cu y Cd, determinados por espectrometría de emisión

atómica con plasma inductivamente acoplado, en el agua superan los límites establecidos por las normas chinas para el agua potable. Estos autores señalan que el índice de mortalidad extremadamente alto de la población local divulgada para el área de estudio, está relacionado en parte con los elevados niveles de concentración de metales pesados, particularmente Cd en el agua de consumo. Igualmente, apuntan que el sistema de aguas subterráneas ha sido severamente contaminado por el agua de riego proveniente de la mina Dabaoshan.

**Muñoz et al (2011)** <sup>[27]</sup> estudiaron químicamente 6 muestras de agua provenientes de 6 pozos representativos de la zona de Mequinenza, España, con el objetivo de conocer su calidad química. La determinación de la concentración de las especies catiónicas  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , la realizó mediante la técnica de espectrometría de absorción y emisión atómica con llama mientras que la concentración de las especies aniónicas  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , las determinó por la técnica de cromatografía iónica. Los resultados obtenidos por estos investigadores indican que salvo el parámetro conductividad, los pozos estudiados en Mequinenza, cumplen con el Real Decreto que establece el país para el agua de consumo humano de tipo A2. Por su parte, para el resto de los puntos, además de la conductividad, la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  supera los valores para aguas clasificadas como ciprinílicas; no obstante, establecen que no existen desviaciones importantes del Decreto que establece el país. Particularmente afirman que el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  son los iones más representados en todos los puntos considerados.

#### *Antecedentes Nacionales*

**Vargas (1997)** <sup>[28]</sup> se enfocó en el análisis e interpretación de datos geológicos, geoquímicos, climáticos e hidrogeológicos disponibles, de la isla de Margarita, con el objetivo de efectuar una evaluación hidrogeológica de esta región insular. Las especies catiónicas  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  fueron determinadas por espectrometría de absorción y emisión atómica con llama, mientras que las especies aniónicas  $\text{Cl}^-$ ,

$\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , por cromatografía iónica; mientras que la concentración de  $\text{HCO}_3^-$ ; se realizó mediante una titulación potenciométrica.

Vargas (1997) demostró a través de los resultados obtenidos que los sistemas hidrogeológicos de Margarita, se caracterizan por no representar una alternativa para el suministro de agua de la isla, pero sí para suplir las necesidades de pequeñas poblaciones, dadas las condiciones de explotación de este recurso y las características químicas de los acuíferos.

Así mismo, Vargas (1997) apunta que los datos químicos obtenidos, sugieren que la calidad del agua mejora a medida que los sistemas de captación se ubican hacia zonas de mayor altura topográfica, lo que evidencia que los cambios hidrogeoquímicos en la isla de Margarita, se encuentran relacionados con las características fisiogeográficas. Igualmente, este autor concluyó que la distribución de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Mg}^{2+}$  hacia la zona de la Fuente Paraguachí, son consecuencia de la poca influencia de los frentes salinos en la concentración de los sólidos disueltos totales en pozos ubicados a 1 km de la zona; así como también señaló que las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en la isla, permiten proponer acuíferos contaminados hacia las poblaciones de San Juan y El Cardón.

**Rodríguez (2000)** <sup>[29]</sup> se enfocó en realizar interpretaciones geoquímicas, considerando los elementos que existen en solución y que son aportados por el medio poroso, la presencia de la intrusión salina y las reacciones dominantes en el sistema de acuíferos de las cuencas del nor-orienté de la isla de Margarita, basándose en los datos obtenidos mediante los análisis de las muestras de agua subterránea captadas en los pozos de la zona. Para ello, determinó los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por espectrometría de absorción y emisión atómica con llama,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , por cromatografía iónica,  $\text{HCO}_3^-$  mediante una titulación potenciométrica y los elementos traza Al, Ba, B, Zn, Cu, Sr, Fe, Mn Pb, Rb mediante espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado.

Rodríguez (2000) demostró a través de sus resultados, que las aguas subterráneas de la isla son principalmente del tipo  $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$  y esto lo asocia con las rocas máficas predominantes de la zona. Apuntó que la presencia de aguas del tipo  $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$  y  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$  son probablemente originadas durante el proceso evolutivo de las aguas subterráneas, esto aunado al problema del avance de cuñas marinas.

Rodríguez (2000) finalmente concluyó que la distribución de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , evidencia un aumento en la mineralización de las aguas subterráneas con la proximidad a las costas, lo cual es debido a un desplazamiento lateral de agua de mar en los acuíferos costeros que puede ser consecuencia del excesivo bombeo de los pozos allí ubicados. Así mismo, concluyó que como producto de la detección de problemas de contaminación en pozos lejanos a la zona de recarga o próximos a la línea costera, deberían realizarse labores a corto, mediano y largo plazo, que permitan complementar el proceso de recarga de las aguas subterráneas con grandes construcciones, o que sirvan para acelerar el proceso de flujo natural, minimizando así, el tiempo de contacto con la litología que esté aportando concentraciones de sales a niveles superiores de los límites permitidos para su consumo.

**Corsi (2006)** <sup>[30]</sup> a través de un estudio hidrogeoquímico en la cuenca Pedro González, ubicada en la isla de Margarita, caracterizó 16 muestras de aguas subterráneas captadas en pozos de bombeo, con el objetivo de identificar los procesos responsables de la composición química de esta agua. La concentración de los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  fueron determinados por espectrometría de absorción y emisión atómica con llama, los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  por cromatografía iónica, mientras que la sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) la determinó por espectrofotometría de absorción molecular, de igual manera determinó la alcalinidad de las aguas mediante una titulación potenciométrica.

Los resultados obtenidos por Corsi (2006) le permitieron identificar la presencia de facies químicas en las que destacaron aguas del tipo  $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$  y  $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$

concluyendo además que esta última facies fue la dominante del área con un 56,25% del total de las muestras. Así mismo, señala que las aguas subterráneas captadas en la cuenca Pedro González, adquiere su composición química como consecuencia de procesos de interacción agua-roca, a través de disolución de sales; además determinó que los factores dominantes son la intrusión marina, la evaporación y las actividades antrópicas.

**D'Elia (2006)** <sup>[31]</sup> estudió hidrogeoquímicamente 15 muestras de aguas subterráneas y una de manantial, captadas en la cuenca Santa Ana, isla de Margarita, Edo. Nueva Esparta, Venezuela; con el objetivo principal de caracterizarlas geoquímicamente e indagar acerca de los procesos que controlan la composición química de las mismas.

Para alcanzar el objetivo propuesto D'Elia (2006) determinó las especies  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ), por las técnicas de espectrometría de absorción y emisión atómica con llama y por cromatografía iónica; mientras que la sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ), la determinó por espectrofotometría de absorción molecular. Por su parte, la alcalinidad fue conocida mediante una titulación potenciométrica; mientras que los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad eléctrica fueron medidos en el campo durante el proceso de captación de las aguas subterráneas.

Los resultados obtenidos por D'Elia (2006) le permitieron señalar que las aguas subterráneas de la cuenca de Santa Ana son del tipo  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ , así como también que los procesos hidrogeoquímicos predominantes son tres, a saber: primero, las aguas del sur de la cuenca presentaron un alto carácter salino, producto de la disolución de sales muy solubles o por la incorporación de fluidos cargados de iones antes encontrados en la estructura de los sustratos geológicos; segundo, hacia la zona más céntrica de la cuenca, fue verificado un proceso evolutivo que permite incrementar el carácter meteórico de las aguas; y tercero, hacia el norte de la cuenca, ocurre la disolución de minerales magnésicos.

A partir del estudio realizado D'Elia (2006) concluyó que el proceso de salinización en la cuenca de Santa Ana de la isla de Margarita está altamente asociado al proceso de interacción agua-roca; adicionalmente señaló que hacia la zona central, los acuíferos están bastante contaminados, relacionando este hecho a las actividades antrópicas.

**Michel (2006)** <sup>[32]</sup> caracterizó geoquímicamente muestras de aguas subterráneas captadas en 21 pozos y 2 manantiales localizados en las áreas altas, intermedias y bajas de la cuenca La Fuente Paraguachí ubicada en el sector nororiental de la Isla de Margarita, con el objetivo de estudiar la evolución geoquímica que experimentan las aguas subterráneas en dicha cuenca. Para ello, determinó las especies químicas mayoritarias  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ), mediante las técnicas de espectrometría de absorción y emisión atómica con llama, cromatografía iónica y espectrofotometría de absorción molecular. También determinó la concentración del  $\text{HCO}_3^-$  mediante una titulación potenciométrica.

Dentro de las herramientas de interpretación recomendadas en la literatura, Michel (2006), utilizó el diagrama de Piper, el cual le permitió establecer la existencia de tres tipos de aguas en la cuenca, a saber:  $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{HCO}_3^-$  en las áreas de recarga,  $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ - $\text{Cl}^-$  en las áreas de descarga.

Michel (2006) concluyó que la existencia de estos tipos de aguas pone en evidencia un proceso de evolución hidrogeoquímica caracterizado por un patrón de enriquecimiento de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  a medida que los sistemas cambian espacialmente hacia zonas más alejadas de las áreas de recarga. Señala igualmente que tal proceso evolutivo obedece a la disolución de sales, la probable mezcla con aguas antiguas y al intercambio iónico.

**Gamboa (2007)** <sup>[33]</sup> realizó un estudio hidrogeoquímico y geofísico en el sector La Cabrera, Ocumare-Charallave, Edo. Miranda, con el objetivo de caracterizar el sistema subterráneo y las aguas contenidas en los acuíferos presentes en el mismo.

Para ello, este autor recolectó 8 muestras de aguas subterráneas directamente de pozos de bombeo y determinó las especies químicas  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por la técnica de espectrofotometría de absorción y emisión atómica con llama;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  por cromatografía iónica y la especie  $\text{HCO}_3^-$  por titulación potenciométrica; mientras que la concentración de los elementos traza Ba, Mn y Sr fue determinada por la técnica de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado. Con los resultados obtenidos identificó dos tipos de aguas: sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas. También concluyó que los valores de SDT determinados, permiten señalar que el 75% de las aguas subterráneas captadas pudieron clasificarse como salobres, mientras que el 25% restante como dulces o frescas. Así mismo, indicó que los principales procesos que controlan la composición química de estas aguas subterráneas, son la disolución y precipitación de minerales carbonatados.

**Faublack (2008)** <sup>[34]</sup> estudió geoquímicamente las aguas subterráneas de la región de Barbacoa, estado Aragua y Cachamas, estado Guárico, con el objetivo de identificar los procesos geoquímicos que controlan la composición química de dichas aguas. Para ello determinó las especies  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2$ , Fe, Rb, Li, Sr, Cu, Ni, Zn y Ba, usando las técnicas de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado y cromatografía iónica.

Faublack (2008) identificó dos grupos de agua en la zona:  $\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ . Concluyó que ambos grupos de aguas están controlados por procesos hidrogeoquímicos distintos; las aguas de tipo  $\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$  están determinadas por interacción agua-roca, mientras que el agua de tipo  $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$  está determinada por contacto con la atmósfera e intercambio iónico.

**Jiménez (2009)** <sup>[35]</sup> estudió los factores y procesos que determinan la calidad química de las aguas subterráneas del sector sur-central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco. En su trabajo de investigación captó un total de 31 muestras y determinó la concentración de las especies mayoritarias  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  por la

técnica de espectrofotometría de absorción y emisión atómica con llama;  $\text{Ca}^{2+}$  por espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  por cromatografía iónica y la especie  $\text{HCO}_3^-$  por titulación potenciométrica. Los datos obtenidos los analizó a través del uso de diferentes herramientas como diagrama de Piper y cajas gráficas, entre otras.

Los resultados obtenidos por Jiménez (2009) indican que el 78% de las muestras corresponden a aguas del tipo  $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ , mientras que un 11% son  $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-HCO}_3^-$  y el resto corresponde al tipo  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$  y  $\text{K}^+\text{-SO}_4^{2-}$ . Concluyó además que la composición de las aguas está controlada por diversos factores, entre los que se encuentran la interacción agua-roca, a través del intercambio iónico; precipitación atmosférica y actividades antrópicas. De igual manera concluyó que dicha actividad antrópica posiblemente esté afectando sectores particulares del área de estudio. Sostiene que, según el Decreto 883 (Gaceta oficial 5021, 1995) el 93,5% de las muestras estudiadas entran en la clasificación de excelente, que pueden ser usadas para cualquier actividad y el 6,5% están por debajo de la clasificación buena.

**Blanco (2011)** <sup>[36]</sup> realizó un estudio hidrogeoquímico en la cuenca del río Caucagua, Estado Miranda, con el propósito de tener una visión acerca de los procesos que controlan la composición química de los cuerpos de aguas superficiales. Para ello, determinó las concentraciones de las especies mayoritarias  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , Si y P; así como también realizó la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad eléctrica y temperatura, con el objetivo de estimar el grado de contaminación de dicha cuenca.

Blanco (2011) determinó las especies químicas Si y P por fotocolorimetría; mientras que la concentración de cationes por ICP-OES; los valores de concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  los determinó por cromatografía iónica, y la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  mediante una titulación potenciométrica. En sus resultados obtenidos indicó que las concentraciones más elevadas están ubicadas en los efluentes no contaminados del noroeste de la cuenca, tal es el caso de los ríos Araira, Cupo y Chuspita; mientras

que las menores concentraciones son ubicadas al noroeste de la misma, en los ríos Izcaragua, Curupao, Ingenio y Churca. Este autor concluyó que las variaciones de las tasas de disolución encontradas en este estudio hacia el noroeste de la cuenta, son debidas principalmente a la distribución de precipitación-escorrentía; mientras que en los efluentes del noroeste son productos de la combinación precipitación-escorrentía y litología.

## **II.8 Zona de Estudio**

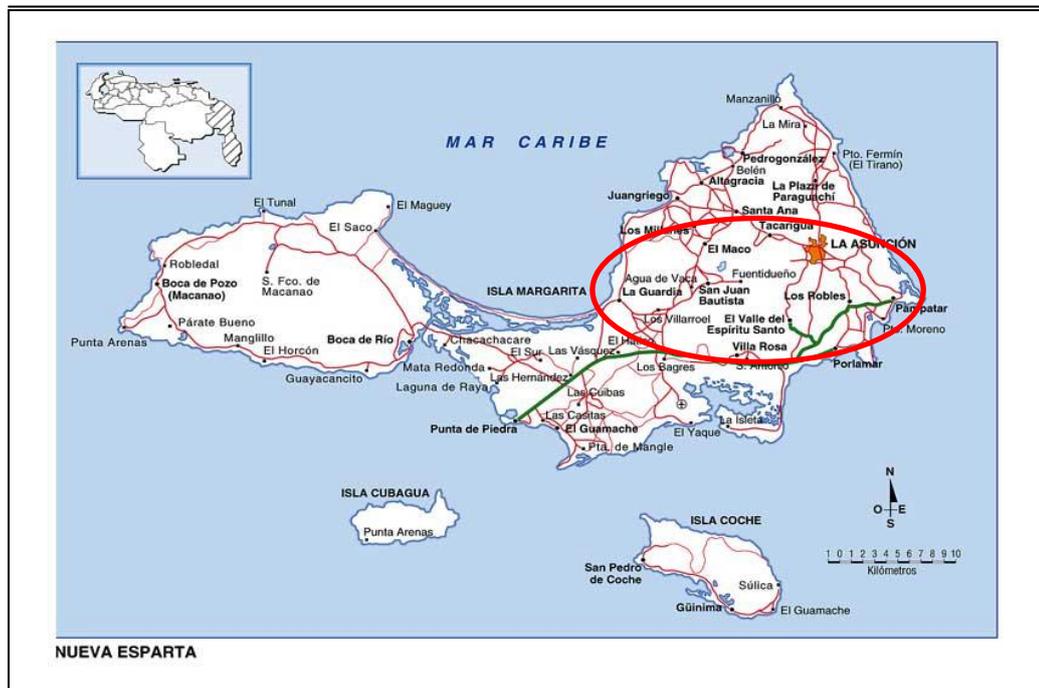
En esta sección se destacan algunas características importantes de la zona de estudio como su ubicación geográfica, clima, vegetación, suelos e hidrología.

### **II.8.1 Ubicación geográfica**

En el presente trabajo de investigación se estudiaron las aguas subterráneas provenientes de pozos ubicados en la zona Sur Oriental de Margarita.

La isla de Margarita se encuentra en el estado Nueva Esparta, geográficamente ubicado en la zona Norte de Venezuela, en el Mar Caribe, a 38 Km de la costa Nor-oriental, y representa el 0,13% de 987.740 km<sup>2</sup> que es el área total del territorio nacional. Ésta es la mayor de las islas del Caribe Venezolano, situada entre las latitudes 10° 52' y 11° 11' N y las longitudes 63° 47' y 64° 24' 0. Tiene una longitud de este a oeste de 69,2 Km.; y de Norte a Sur de 34,6 Km. <sup>[37]</sup>

En la Figura 4 se presenta un mapa político de la Isla de Margarita donde se destaca en rojo, la región suroriental.



**Figura 4:** Mapa político de la isla de Margarita. En rojo la zona sur oriental de la isla [38]

## II.8.2 Clima

Se caracteriza principalmente por un clima tropical seco semi-árido. La temperatura media es de 27 °C con mínimas que oscilan entre 22 y 23 °C y máximas que pueden superar fácilmente los 34 °C. Por ser Margarita una zona ubicada en el mar Caribe, cerca del ecuador terrestre, los rayos solares inciden perpendicularmente sobre toda la isla. Al considerar la parte suroriental donde existen sitios litorales y playeros, como Portamar, hay un promedio de sólo 66 días de lluvia al año. [37]

### **II.8.3 Vegetación**

En general, el estado Nueva Esparta presenta una vegetación constituida por bosques áridos y espesos extendidos a lo largo de las llanuras onduladas y las faldas de las zonas montañosas. <sup>[37]</sup>

Los efectos climáticos y/o edáficos han producido una mezcla de zonas de vida, con variados ecosistemas que comprenden desde la maleza desértica tropical, en las zonas bajas y secas, que es la zona de interés para el presente trabajo, hasta el monte espinoso y el bosque seco tropical en zonas de mayor altura. Las especies más representativas son olivos, dividive y pardillo, alrededor de los cerros Copey, Matasiete y Guaraguao. El bosque muy seco se encuentra en áreas de vegetación muy intervenida. Las principales especies son: cují, guatacare, guamache, cardón, dividive y olivo. Los espinares y las malezas desérticas, formaciones dominantes del estado, ocupan las llanuras costeras. Sus principales especies son abrojo, cují, yaque, orégano, tuna, cardón, dividive, guamache y otras. Las concentraciones de manglares se localizan en La Restinga, Las Marites y otras zonas de agua costaneras. Las especies más importantes son el mangle colorado, botoncillo y el mangle negro. <sup>[37]</sup>

### **II.8.4 Suelos**

Los suelos que se han formado en los diferentes paisajes responden a procesos de adición, pérdida o trasposición de materiales en zonas áridas y de escasa vegetación. Son suelos delgados y poco desarrollados, sujetos a intensos procesos erosivos acelerado por el sobrepastoreo, las oscilaciones a nivel del mar y las deforestaciones para hacer conucos y terrazas agrícolas. En el valle los suelos son más desarrollados, tienen capa orgánica, están cubiertos de vegetación y no están sujetos a la erosión. <sup>[37]</sup>

### **II.8.5 Hidrología**

La Hidrología de la isla de Margarita está representada por los ríos Chaguaramal, El Muco, El Valle, La Asunción, La Vieja, Negro, San Francisco, San Juan y Tacarigua; así como por las lagunas La Restinga, Las Marites y Los Mártires. <sup>[37]</sup>

Los ríos de la entidad tienen un régimen de escurrimiento bastante irregular, presentándose secos la mayor parte del año y torrenciales por cortos períodos, típicos de zonas de baja pero intensa y concentrada precipitación anual. Las pocas lluvias hacen que los recursos hídricos superficiales y subterráneos sean escasos, porque a pesar de existir condiciones geológicas propicias para su almacenamiento, la recarga no es significativa; esto hace que el abastecimiento de agua con fines urbanos dependa casi totalmente de tierra firme. Muchos de los ríos de esta zona, carecen de curso suficiente y volumen de agua que puedan verter al mar. <sup>[37]</sup>

### **II.8.6 Actividades antrópicas**

Las actividades antrópicas más prominentes de la isla son: (1) la agricultura: caracterizada por la siembra de berenjena, maíz, melón pimentón y tomate; (2) la cría avícola, caprina y porcina; (3) la pesca de sardina, anchoa, atún, pargo, camarón, langosta y calamares, entre otros y (4) la explotación de caliza, dolomita y magnesita <sup>[37]</sup>.

### **III. METODOLOGÍA**

La metodología experimental del presente trabajo de investigación se llevó a cabo en cuatro etapas, las cuales comprendieron: una correspondiente al trabajo preliminar o pre-campo, que consistió en plantear un diseño de muestreo, localización de las estaciones y lavado del material; la etapa de campo, que abarcó la recolección de muestras y las medidas in situ de algunos parámetros fisicoquímicos; posteriormente la etapa de laboratorio, la cual comprendió la determinación de los elementos y especies químicas de interés en las muestras recolectadas; y finalmente el tratamiento de datos, donde se realizó el análisis final de los resultados obtenidos y redacción del manuscrito.

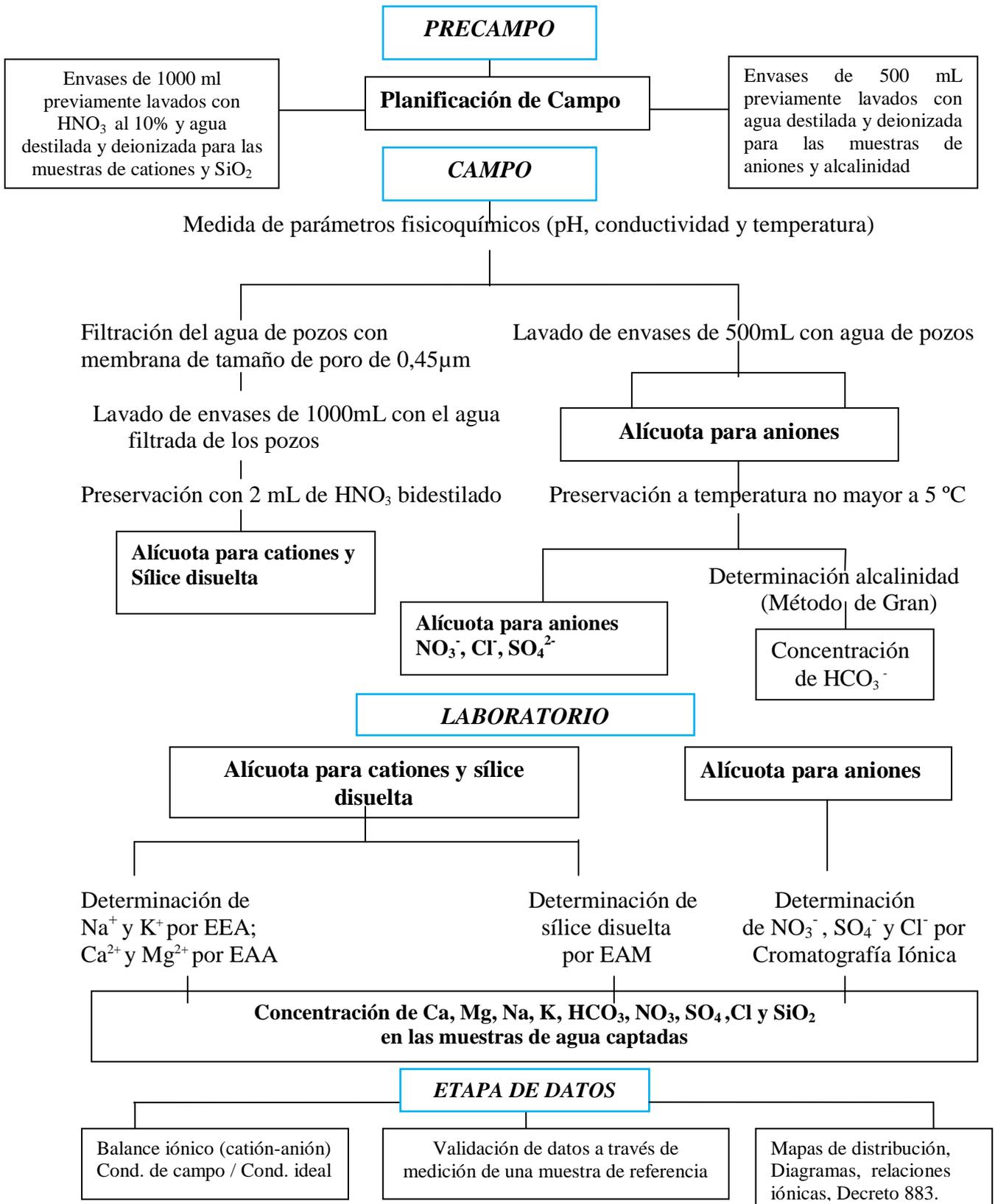
#### **III.1 Etapa de pre-campo**

Durante esta etapa se realizó una revisión bibliográfica que incluyó los antecedentes existentes relacionados a este trabajo de investigación, así como la elaboración del marco conceptual, que dio soporte a las interpretaciones que se realizaron luego de la obtención de los resultados finales. Adicionalmente, se elaboró un plan de muestreo que involucró la ubicación de los pozos existentes en la zona de estudio, de modo que fuesen representativos para la captación de muestras, donde finalmente se seleccionaron 25 de ellos, esto a través de la consulta a entidades públicas como el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MINAMB) y del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), así como en trabajos previos realizados en la zona; no obstante, fue también importante proceder a solicitar información a través de la comunicación directa con empresas, embotelladoras, dueños de pozos de pequeñas fincas, encargados de los pozos rurales y otras entidades de los conjuntos residenciales de la localidad.

Por otro lado, esta etapa también comprendió la preparación previa del material que se llevó a campo, incluyendo el lavado de los envases de polietileno que se usaron para la recolección de muestras de agua para la determinación de las especies

alcalinas, alcalinotérreas, sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ), aniones y alcalinidad. En ese sentido, un grupo de botellas de 1000 mL que se usaron para recolectar las muestras de agua para determinar los cationes y sílice disuelta, se lavaron con  $\text{HNO}_3$  marca Sigma-Aldrich al 10% por un lapso de 24 horas, posteriormente, se enjuagaron con abundante agua destilada y deionizada, esto con el propósito de eliminar posibles impurezas presentes en las paredes de los envases; mientras que el restante grupo de envases de polietileno, correspondiente a botellas de 500 mL, que se usaron para la recolección de muestras de agua para la determinación de aniones y alcalinidad, se lavaron únicamente con agua destilada y deionizada. Igualmente se realizó la calibración de los equipos necesarios para realizar las medidas in situ de los parámetros pH, temperatura y conductividad.

La Figura 5 esquematiza la metodología seguida en este estudio.



**Figura 5:** Esquema que resume el aspecto metodológico realizado

### III.2 Etapa de campo

Durante esta etapa se realizó el proceso de captación de muestras de aguas subterráneas en los envases de polietileno previamente lavados en el laboratorio. Se midieron en principio los parámetros fisicoquímicos temperatura, pH y conductividad. Para ello, se utilizó una sonda multiparamétrica marca Thermo Electron Corporation Orion 4 star. En la literatura se recomienda realizar estas medidas de dichos parámetros en campo, pues pequeños cambios en las condiciones ambientales pueden producir importantes variaciones de sus valores. <sup>[18]</sup>

La campaña de muestreo comprendió en principio, un inventario de pozos activos de la zona para de esta manera decidir la totalidad final de pozos a seleccionar para la recolección de muestras, donde se reflejaron datos como ubicación geográfica, dueño, estado actual (activo/inactivo), uso del agua, profundidad, entre otros. Atendiendo a esta información del inventario, fueron finalmente muestreados 25 pozos activos en la zona sur oriental de la isla de Margarita, de los cuales 22 comprendieron a aguas subterráneas y 3 a aguas superficiales, tomando en cuenta principalmente factores como accesibilidad y estado actual de estos (Tabla 1A, apéndice A). En el apéndice J se presenta un mapa con los puntos muestreados, los cuales se corresponden con cada uno de los pozos donde se recolectaron las muestras de agua de interés para el presente trabajo de investigación.

La escogencia de los pozos estuvo fundamentada en cubrir toda el área de estudio, cuya distribución espacial de dicha selección viene dada en función de la problemática presentada en la isla. En este sentido, se escogieron pozos cercanos a las áreas de recarga, áreas intermedias de la zona y áreas de descarga cercanas a la costa, cuidando que dicha distribución espacial fuese lo más homogénea posible.

Para la determinación de los cationes mayoritarios, se tomaron muestras de agua en los envases de 1000 mL lavados con HNO<sub>3</sub> al 10% marca Sigma-Aldrich, por cada pozo. Estas muestras se filtraron a través de membranas con tamaño de poro de

0,45 µm, para eliminar los sólidos suspendidos. Luego, los envases de polietileno se lavaron con el agua filtrada de los pozos, seguido de la preservación de las muestras con 2 mL de HNO<sub>3</sub> bidestilado marca Sigma-Aldrich, a fin de garantizar una acidez menor a 2 unidades de pH; esto permite prevenir la precipitación de las especies de interés en las paredes de los recipientes.

Para la determinación de aniones y alcalinidad, las muestras se captaron en los envases de 500 mL que sólo se lavaron con agua destilada y deionizada, por cada pozo; posteriormente, se preservaron a una temperatura no mayor a 5 °C para así evitar la formación de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> biológico y la pérdida de CO<sub>2</sub>. [39]

### III.3 Etapa de Laboratorio

Esta etapa comprendió la determinación de las especies químicas de interés, atendiendo a las metodologías y técnicas que seguidamente serán descritas, en las muestras de aguas subterráneas captadas en los pozos seleccionados pertenecientes a la zona sur oriental de la isla de Margarita.

#### *Determinación de la alcalinidad*

La alcalinidad se determinó mediante una titulación potenciométrica, aplicando el método de Gran. Para ello, se tomó una alícuota de 25 mL de la muestra y se valoró con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02 M marca Riedel-de Haen, previamente valorado con una solución de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> con un 99,9% de pureza marca AnalaR. La titulación se realizó con una bureta automática marca Jencons Digitate (Figura 6). El cálculo de la alcalinidad se realizó mediante la siguiente fórmula. [40]

$$C_{\text{HCO}_3^-} = \frac{\text{Volumen de H}_2\text{SO}_4 \text{ (ml)} * \text{Concentración de H}_2\text{SO}_4 \text{ (mol/L)} * 1000 * \text{PA HCO}_3^-}{\text{Volumen total (ml)}}$$



**Figura 6:** Bureta automática Jencons Digitate

#### *Determinación de cationes*

La determinación de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó mediante las técnicas de espectrometría de emisión atómica ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) y espectrometría de absorción atómica ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) con llama, a través de un espectrofotómetro marca AAnalyst 200 (Figura 7). Las concentraciones de los elementos se determinaron mediante la obtención de curvas de calibración utilizando patrones multielementales de concentración conocida, haciendo posteriores diluciones de las muestras que estuvieran dentro del intervalo de concentración de dichos patrones. Las curvas de calibración se pueden observar en el apéndice H.

Las soluciones patrón utilizadas para la construcción de curvas de calibración fueron preparadas a partir de soluciones madres de  $1000 \text{ mgL}^{-1}$  de cada catión; los reactivos con que se prepararon dichas soluciones madre se pueden observar en la Tabla 4C, apéndice C. Las especificaciones del equipo se pueden observar en la Tabla 1C, apéndice C.



**Figura 7:** Equipo de emisión y absorción atómica AAAnalyst 200

#### *Determinación de aniones*

La determinación de los aniones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  se realizó mediante la técnica de cromatografía iónica, usando un cromatógrafo iónico marca Dionex DX-100 (Figura 8), en el cual se utilizó como fase móvil una solución de Carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 1,8mmol/ Bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) 1,7mmol. De la misma manera la concentración de los elementos se calculó mediante curvas de calibración, utilizando patrones multielementales de concentración conocida, haciendo posteriores diluciones de las muestras que estuvieran dentro del intervalo de concentración de dichos patrones; las curvas de calibración se pueden observar en el apéndice H.

Las soluciones patrón utilizadas para la construcción de curvas de calibración fueron preparadas a partir de soluciones madres de  $1000 \text{ mgL}^{-1}$  de cada anión; los reactivos con que se prepararon dichas soluciones madre se pueden observar en la Tabla 4C, apéndice C. Las especificaciones del equipo se pueden observar en la Tabla 2C, apéndice C.



**Figura 8:** Equipo de Cromatografía Iónica Dionex DX-100

*Determinación de sílice disuelta, (SiO<sub>2</sub>)*

La determinación de la sílice disuelta (SiO<sub>2</sub>) se realizó utilizando un espectrofotómetro de absorción molecular, Spectronic 20, marca Bausch & Lomb (Figura 9), a través de la técnica fotocolorimétrica, aplicando el método de Azul de Molibdato. [39] Para ello se preparó una solución madre de 1000 mgL<sup>-1</sup> en Si, a partir de la cual se obtuvieron patrones de Si en un intervalo de concentración determinado para la construcción de la curva de calibración. Este método, consistió, en tomar una determinada alícuota de la muestra y a través de la formación del complejo azul silicomolibdeno, se realizó la medida de la absorbancia en las muestras para la cuantificación de la concentración de SiO<sub>2</sub> luego de realizar la correspondiente conversión. Las especificaciones del método así como los reactivos empleados con sus respectivas marcas y pureza, se pueden observar en el

apéndice D, así mismo las especificaciones del equipo se pueden observar en la Tabla 3C, apéndice C.



**Figura 9:** Equipo para la técnica de fotocolorimetría. Spectronic 20 Bausch & Lomb

### III.4 Tratamiento de datos

La validación de los resultados obtenidos se garantizó a través del cálculo del balance iónico, donde las relaciones de cationes frente a los aniones y la conductividad teórica en función de la conductividad de campo, aseguran que los resultados obtenidos en las determinaciones de la concentración de las especies químicas en el agua son confiables e indican que las metodologías que se aplicaron son precisas. En este sentido, las muestras cuyo balance iónico esté por debajo del 10% presentan entonces resultados confiables desde el punto de vista geoquímico [16], así como también haciendo uso de una muestra certificada que aseguró que los resultados obtenidos de las concentraciones de las especies químicas de interés fueron los correctos.

Posterior a la organización de los datos y de haber garantizado la calidad de los mismos, se realizó la caracterización hidroquímica de las aguas estudiadas, haciendo uso del análisis estadístico no paramétrico para caracterizar la población de datos. Para ello se utilizaron las cajas gráficas elaboradas con el programa STATISTICA 6.0, que permitió resaltar los valores anómalos de cada una de las especies químicas en las muestras de interés. De igual manera, se construyeron mapas de distribución espacial para cada una de las variables determinadas para así tener una mejor comprensión del comportamiento del sistema, esto con el programa MapSource.

En este sentido, para la interpretación de los resultados se utilizaron diagramas de Piper y Stiff , los cuales permitieron conocer los diferentes tipos de aguas presentes en la zona de estudio, esto con la ayuda del programa RocksWork 99. De igual manera, se construyeron algunas relaciones interiónicas, las cuales son indicadoras de la acción de los fenómenos modificadores de la composición química de las aguas; así como también, se realizó la determinación de la calidad química de las mismas en función a clasificaciones establecidas en el Decreto 883 (Gaceta Oficial Extraordinaria 5021, 1995) donde se establecen las normas para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Con esta información se logró entonces determinar la calidad química de las aguas subterráneas de la zona sur oriental de la isla de Margarita.

#### IV. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección son presentados y discutidos los resultados obtenidos en los análisis de las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ), en 25 muestras de aguas captadas en la zona sur Oriental de la isla de Margarita.

Dicha sección está estructurada de la siguiente manera: inicialmente en un primer apartado, se evaluó la calidad de los resultados generados en el análisis; y en un segundo apartado se realiza la caracterización geoquímica, en el cual se aplica un análisis estadístico no paramétrico resumido en la caja gráfica respectiva, así como los mapas de distribución espacial de cada una de las variables en estudio, incluyendo breves nociones explicativas con especial énfasis en las anomalías encontradas y comparaciones con resultados de algunos trabajos previos llevados a cabo en la zona de estudio.

Los resultados generales de pH, conductividad y temperatura, así como otros datos de localidad, coordenadas geográficas y profundidad de los pozos recopilados en este estudio, están expuestos en las Tablas 1A y 2A del Apéndice A. Las concentraciones de las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ), sólidos disueltos totales (SDT) se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Concentración de las especies determinadas durante la etapa de laboratorio.

Muestra	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub>	SDT
MASEE-1	336	1,36	41,4	255	871	814,6	250	3,05	26,45	2600
MASPSJ-2	67	3,50	25,4	64	366	126,1	31	1,01	20,66	706
MASPC-3	130	2,50	56,3	139	871	240,0	55	2,37	19,26	1515
MASSJ-4	123	2,82	41,8	198	760	381,9	91	22,55	24,97	1645
MASSJ-5	42	1,41	14,7	66	331	58,7	49	35,75	34,95	634
MASSJ-6	103	3,23	106,6	184	737	382,6	78	6,67	36,58	1637
MASSJ-7	230	3,48	56,2	77	661	284,6	134	15,75	19,95	1483
MASSJ-8	213	2,91	48,9	82	670	256,2	122	5,42	22,08	1423
MASLM-9	783	53,40	194,9	209	706	1588,6	375	27,01	18,56	3955
MASG-10	60	1,89	1,4	117	573	146,3	29	16,37	22,08	967
MASG-11	78	2,14	1,8	139	581	211,6	41	25,94	30,22	1110
MASG-12	92	2,46	3,4	154	693	244,0	47	25,94	22,08	1284
MASG-13	165	3,56	4,1	300	501	915,9	102	23,88	24,23	2039
MASG-14	98	2,57	1,4	156	563	329,2	44	29,34	24,23	1248
MASG-15	94	10,20	14,8	181	769	240,0	56	23,39	22,80	1411
MASG-16	102	3,63	2,4	169	680	308,9	45	21,42	79,50	1411
MASMA-17	361	2,23	98,6	266	644	1138,9	250	22,87	56,36	2840
MASCC-18	472	4,08	134,1	161	559	1057,9	289	21,73	34,16	2733
MASSS-19	161	3,61	28,2	156	826	260,2	78	27,08	43,36	1583
MASPP-20	7538	276,00	152	1267	357	18283,5	2656	32,41	29,46	31962
MASMM-21	619	3,75	140,4	328	717	1629,1	562	15,16	48,74	4065
MASLI-22	1882	105,40	477,6	288	460	4393,7	812	3,05	18,56	8440
MASEV-23	144	1,33	58,6	135	692	248,0	200	ND	64,52	1543
MASPEV-24	46	1,02	25,5	46	251	92,7	69	ND	42,48	574
MASPEV-25	21	0,93	2,5	23	112	42,2	9	ND	25,70	236

ND: No detectado

Todas las concentraciones están expresadas en mgL<sup>-1</sup>

## IV.1 Validación de resultados

El proceso para la validación de los resultados se realizó mediante la aplicación de tres metodologías: 1) análisis de una muestra certificada TM 26.3 y su comparación con los valores reportados, 2) balance iónico, donde fueron elaboradas las respectivas relaciones de cationes contra aniones y 3) comparación de la conductividad teórica determinada con la conductividad medida en campo durante el proceso de captación de las muestras de agua, esto con el fin de determinar la validez de las concentraciones determinadas y estimar la precisión y exactitud de los análisis químicos para las aguas en la zona de estudio.

### IV.1.1 Análisis de la muestra certificada TM 26.3

En el análisis de la muestra certificada TM 26.3, se determinaron las concentraciones de las especies mayoritarias  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  con la metodología experimental explicada en el punto III.3; dichas concentraciones son mostradas en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Concentraciones obtenidas y reportadas de las especies químicas mayoritarias en la muestra TM 26.3

Muestra Certificada	Concentración	Na	K	Ca	Mg
TM 26.3	Obtenida ( $\bar{x} \pm \text{sdv}$ ) ( $\text{mgL}^{-1}$ )	5,0 $\pm$ 0,1	0,72 $\pm$ 0,02	14,0 $\pm$ 0,3	3,1 $\pm$ 0,2
	CV <sub>obtenido</sub> (%)	1,0	1,4	0,9	3,2
	Valor de fondo reportado ( $\text{mgL}^{-1}$ )	5,0	0,7	14,0	3,4
	LD <sub>obtenido</sub> ( $\text{mgL}^{-1}$ )	0,05	0,05	0,14	0,12

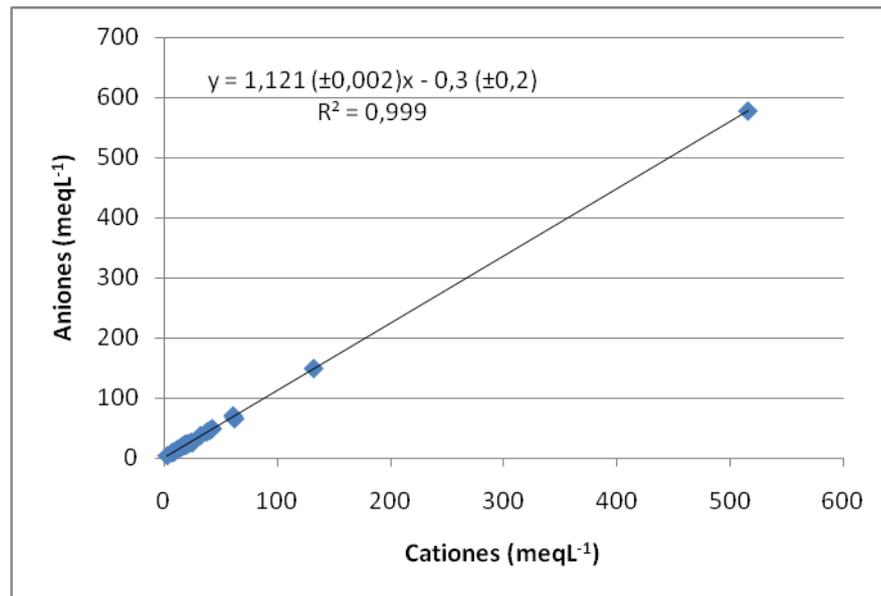
LC= Límite de confianza, CV= Coeficiente de varianza, LD= Límite de detección.

El límite de confianza (LC) está expresado a un 95% de confianza, con un  $t_{exp}$  de 4,3.

El valor de fondo reportado para la muestra de referencia se encuentra dentro del intervalo obtenido, por lo que puede señalarse que las metodologías de análisis proporcionan resultados exactos dentro del 95% de confianza.

#### **IV.1.2 Balance iónico**

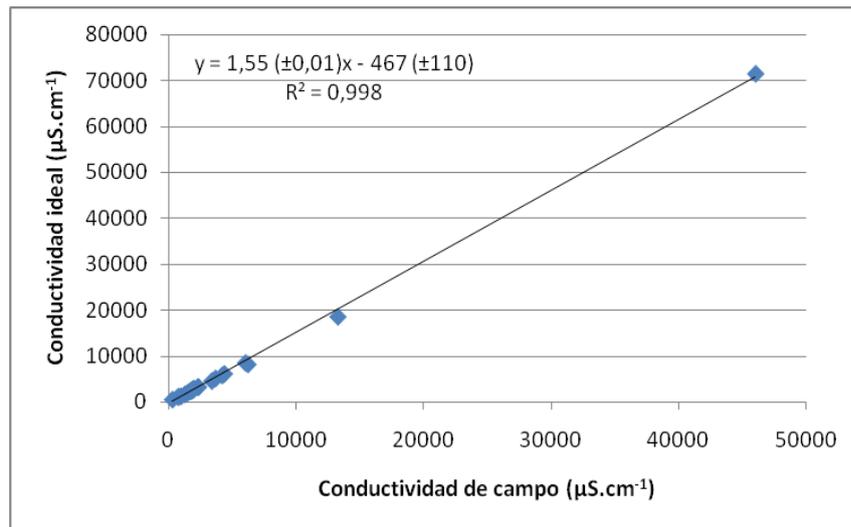
Luego de realizar el balance de cargas se encontró que de las 25 muestras, 8 de ellas presentaron errores relativos menores al 5%, mientras que 17 muestras presentaron errores relativos entre 5-8%, es decir, la totalidad de las muestras presentaron valores inferiores al 10% de error, tal como se muestra en la Tabla 1F del apéndice F. Por su parte, la relación de concentración total (en  $\text{meqL}^{-1}$ ) de cationes contra la concentración total de aniones representada en la Figura 10, con una ecuación de la recta de  $1,121(\pm 0,002)x - 0,3(\pm 0,2)$ , refleja una excelente correlación lineal con un  $R^2=0,999$ . En base a lo antes mencionado, se tiene que todos los resultados obtenidos en las 25 muestras de agua que comprenden la totalidad para este estudio son válidos, ya que un error por debajo del 10% refleja que los resultados obtenidos son confiables desde el punto de vista geoquímico. <sup>[16]</sup> La ecuación que permite el cálculo del balance iónico es presentada en el apartado F.2 del Apéndice F.



**Figura 10:** Relación del balance de carga catión-anión para las 25 muestras estudiadas

#### IV.1.3 Conductividad teórica ideal frente conductividad de campo

Asimismo fue utilizada la relación de conductividad teórica frente a la conductividad de campo, para sustentar el criterio de calidad de los análisis. Es de esperarse que la conductividad medida en campo sea similar a la conductividad ideal calculada a 25°C, basada en los datos de concentración de las especies químicas mayoritarias [41]. En la Figura 11, se presenta una gráfica con la relación de dichas conductividades observándose una buena correlación lineal  $R^2=0,998$ , y una ecuación de la recta igual a  $1,55 (\pm 0,01)x - 467 (\pm 110)$  donde se observa una desviación, en la cual no se cumple que la conductividad ideal sea igual a la conductividad de campo, puesto que la pendiente difiere de la unidad (pendiente: 1,55 unidades).



**Figura 11:** Relación de la conductividad ideal a 25°C contra la conductividad determinada en campo

En este sentido, pudiesen estar influyendo factores como cambios de temperatura, velocidad de respuesta de la sonda, entre otros. <sup>[29]</sup>

En el mismo orden de ideas, se puede inferir que las muestras que presentan valores de conductividad de campo mayores son aquellas que difieren más con los valores de conductividad ideal calculada, y esto influye en la desviación de la pendiente con respecto a la unidad, en la Figura 11. Esto es debido a que al presentar una conductividad tan alta, existe una alta concentración de iones disueltos en esas aguas por ende tiende a ocurrir la saturación de los electrodos y no dar la lectura exacta de conductividad de campo sino que ésta arroja un valor menor, por esto las muestras que presentan conductividades de campo bajas si tienen mayor similitud a los valores de la conductividad ideal calculada. Sin embargo, el valor de regresión lineal obtenido (0,998) indica que existe una buena correlación independientemente de que la pendiente no sea cercana a la unidad (1,55).

Los valores obtenidos de la conductividad ideal calculada y conductividad de campo en cada una de las muestras, así como la ecuación de la misma, se presentan en la Tabla 1F y el apartado F.1 del apéndice F, respectivamente.

Por otra parte, con el propósito de analizar la reproducibilidad y representatividad de los datos, en el Apéndice B se presentan los parámetros de calidad de precisión que miden el error aleatorio o indeterminado en tres réplicas de la muestra MASEE-1, para las especies químicas determinadas en el presente trabajo de investigación.

En general, los diferentes análisis de validación de resultados presentados, demuestran que los valores obtenidos son confiables y que los métodos de análisis seguidos en el estudio fueron bastante precisos.

## **IV.2 Caracterización hidrogeoquímica**

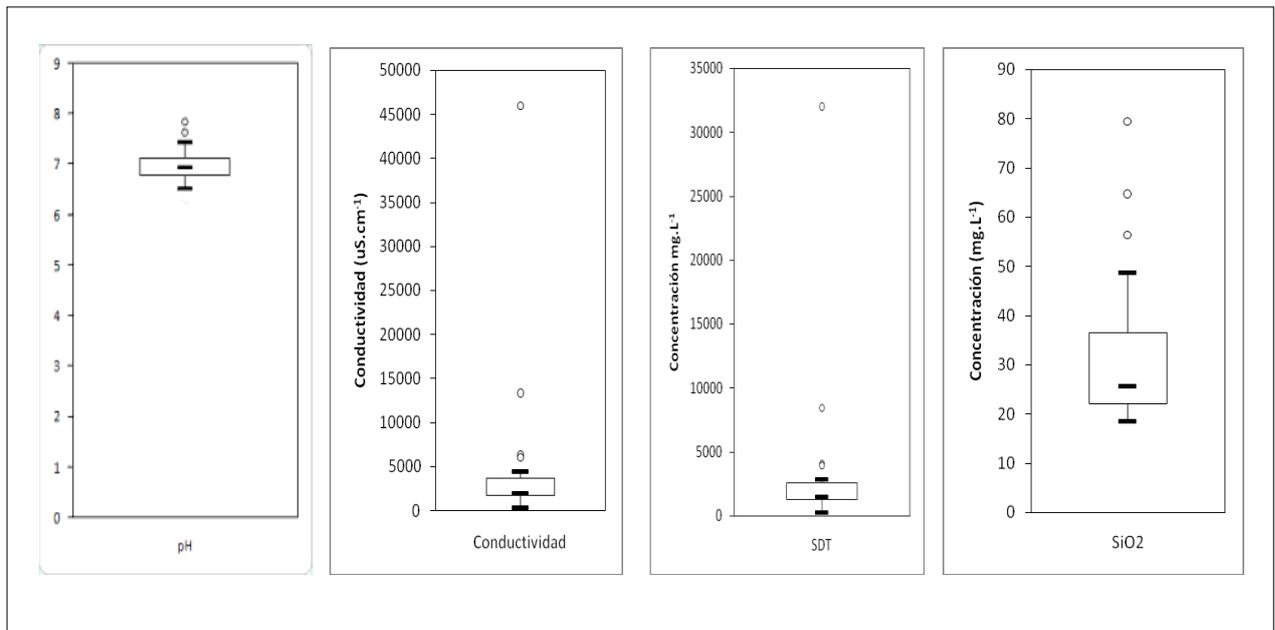
En esta sección se presenta la caracterización hidrogeoquímica de las aguas en estudio, a través de la realización de un análisis estadístico, esto con el fin de caracterizar la población de datos; es decir, visualizar la tendencia central y realizar una descripción general del sistema en cuanto a la variabilidad de las especies químicas y de los parámetros fisicoquímicos estudiados.

En función de lo antes expuesto, fueron utilizadas en principio las cajas gráficas donde el valor en el interior de la misma, es la mediana, la cual describe la simetría de los datos. Por su parte, los bigotes de la caja representan el 50% restante de la población como umbrales mínimo y máximo, considerando como anómalos todos aquellos valores por encima de estos límites <sup>[42]</sup>.

De igual manera, se construyeron mapas de distribución espacial de cada una de las variables en estudio, los cuales fueron elaborados en base a una escala de proporción que permitiera la comparación de valores entre pozos de una manera gráfica.

#### IV.2.1 pH, conductividad, sólidos disueltos totales (SDT) y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ )

Seguidamente son discutidos los parámetros pH, conductividad, SDT y concentraciones de  $\text{SiO}_2$  atendiendo a su variabilidad y distribución espacial. Se muestran a continuación en la Figura 12 las cajas gráficas obtenidas para dichos parámetros.



**Figura 12:** Cajas gráficas para los valores de pH, conductividad, sólidos disueltos totales y sílice disuelta

#### IV.2.1.1 pH y conductividad

Las aguas subterráneas presentan una serie de propiedades o características fisicoquímicas tales como pH y conductividad, que pueden variar en el espacio y tiempo como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas <sup>[18]</sup>.

En el análisis estadístico de las 25 muestras de aguas, tomando en cuenta el parámetro de pH, se tiene que las mismas presentan una mediana de 6,9 unidades y un intervalo de valores mínimo y máximo entre 6,5 a 7,4 unidades, respectivamente. Nótese además la presencia de los valores anómalos de 7,6 unidades de pH en la muestra MASPEV-25 y 7,8 unidades de pH en la muestra MASPSJ-2 (Figura 12). Estos valores anómalos pueden explicarse debido a que, estas muestras corresponden a aguas superficiales, las cuales presentan valores de pH superiores a los que presentan las aguas subterráneas. En las aguas superficiales los valores de pH pueden llegar hasta 8 unidades mientras que en las subterráneas es de 7,4 unidades (Tabla 1) <sup>[10]</sup>.

En este sentido, los intervalos de pH que presentan las aguas resulta conveniente clasificarlos de acuerdo a la siguiente escala: ligeramente ácidas (6,3-7,1), ligeramente alcalinas (7,1-7,6), alcalinas (7,6-8,2) y muy alcalinas (8,2-10,9) <sup>[43]</sup>.

De acuerdo con el mapa de distribución espacial de pH para las 25 muestras de agua de interés para este estudio (Figura 13), el 72% de las muestras son ligeramente ácidas las cuales corresponden en su totalidad a aguas subterráneas; mientras que el 20% se clasifican como ligeramente alcalinas y el 8% restante como alcalinas. En dicho mapa puede observarse de manera gráfica como existe una pequeña variabilidad en el pH de toda la población de muestras de aguas.

Lo antes expuesto, señala que el pH de estas aguas está controlado por procesos, tales como: meteorización de rocas félsicas en la cual son formados minerales

aluminosilicatados, lo cual define el intervalo de pH entre 6,3 y 7,1; mientras que los valores de pH comprendidos entre 7,1 y 8,2, reflejan un control por el sistema regulador  $\text{CO}_3^{2-}\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  [44].

Atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para el parámetro de pH está en un intervalo que oscila entre 6,5-8,5 unidades para las clases 1, 2 y 3; mientras que para la clase 4, está entre 3,8-10,5 unidades. En función de esto, de las 25 muestras de interés en el presente estudio, el 100% de ellas cumple con dicho decreto para las clases 1, 2 y 3, por lo cual se le pueden asociar los usos de las mismas descritos en la Tabla 4 como uso doméstico, protección de las comunidades hidrobiológicas, recreación de contacto total y segundo contacto, uso agrícola, armonía paisajística.

Tomando como referencia a algunos de los trabajos realizados en la zona noroienta de la isla de Margarita, en función del parámetro pH, Rodríguez (2000) indica que la totalidad de las muestras analizadas en su estudio presentaron una mediana de 7,2 unidades y valores entre 6,6 y 7,3 unidades de pH. Por su parte, Michel (2006) sostiene que sus muestras presentaron una mediana de 7,3 unidades y un valor mínimo y máximo de 6,4 a 8,2 unidades de pH, respectivamente, los cuales, puede notarse que son cercanos a los obtenidos en el presente estudio.

En lo que se refiere al parámetro de conductividad eléctrica, se observa una mediana de  $1961 \mu\text{Scm}^{-1}$  y un intervalo de valores mínimo y máximo comprendido entre 329 y  $4390 \mu\text{Scm}^{-1}$ , respectivamente; así como también, valores anómalos de  $6050 \mu\text{Scm}^{-1}$  en la muestra MASMM-21,  $6240 \mu\text{Scm}^{-1}$  en la muestra MASLM-9,  $13280 \mu\text{Scm}^{-1}$  en la muestra MASLI-22 y  $46000 \mu\text{Scm}^{-1}$  en la muestra MASSP-20 (Figura 12).

La presencia de estos valores anómalos puede explicarse en función de la distribución espacial de la conductividad (Figura 14), donde se puede observar que las muestras de agua que presentan valores de conductividad más elevados, son

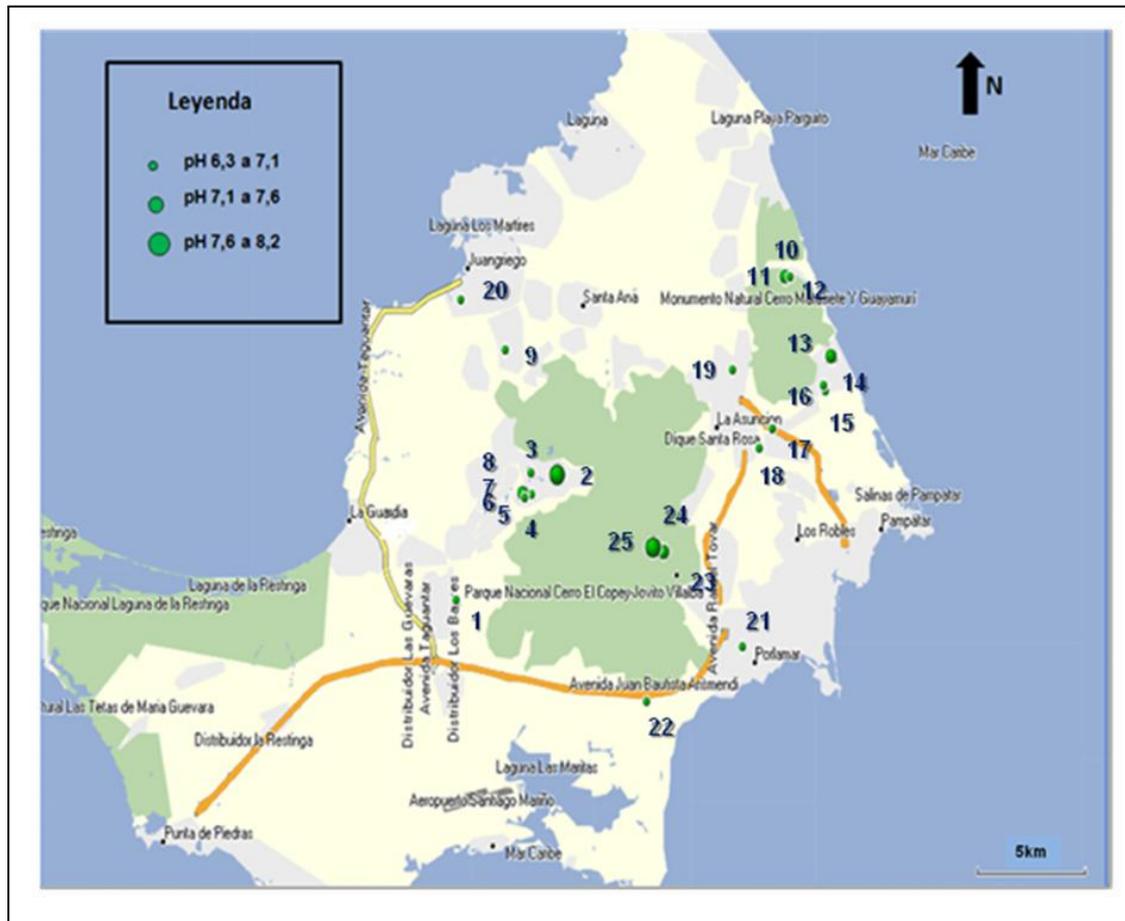
aquellas que se encuentran cercanas a la costa o en zonas de descarga. De igual manera, nótese en dicha distribución espacial, que se tiene una alta dispersión, lo que permite señalar que existe una gran variabilidad de conductividades, esto conlleva a sugerir que existe más de un sistema de aguas con características químicas diferentes.

Los valores de conductividad son consecuencia de la concentración de sales que existe en solución, por lo que se puede entonces relacionar la conductividad con la concentración de SDT; en este sentido, obsérvese que específicamente las muestras que presentan valores anómalos son aquellas que tienen mayores concentraciones de SDT (Tabla 2A, apéndice A). Esto puede deberse, como fue señalado, a la cercanía de dichas muestras a la costa, así como también a la influencia de las actividades antrópicas como ganadería, agricultura, actividad industrial, sobre el terreno, entre otros factores.

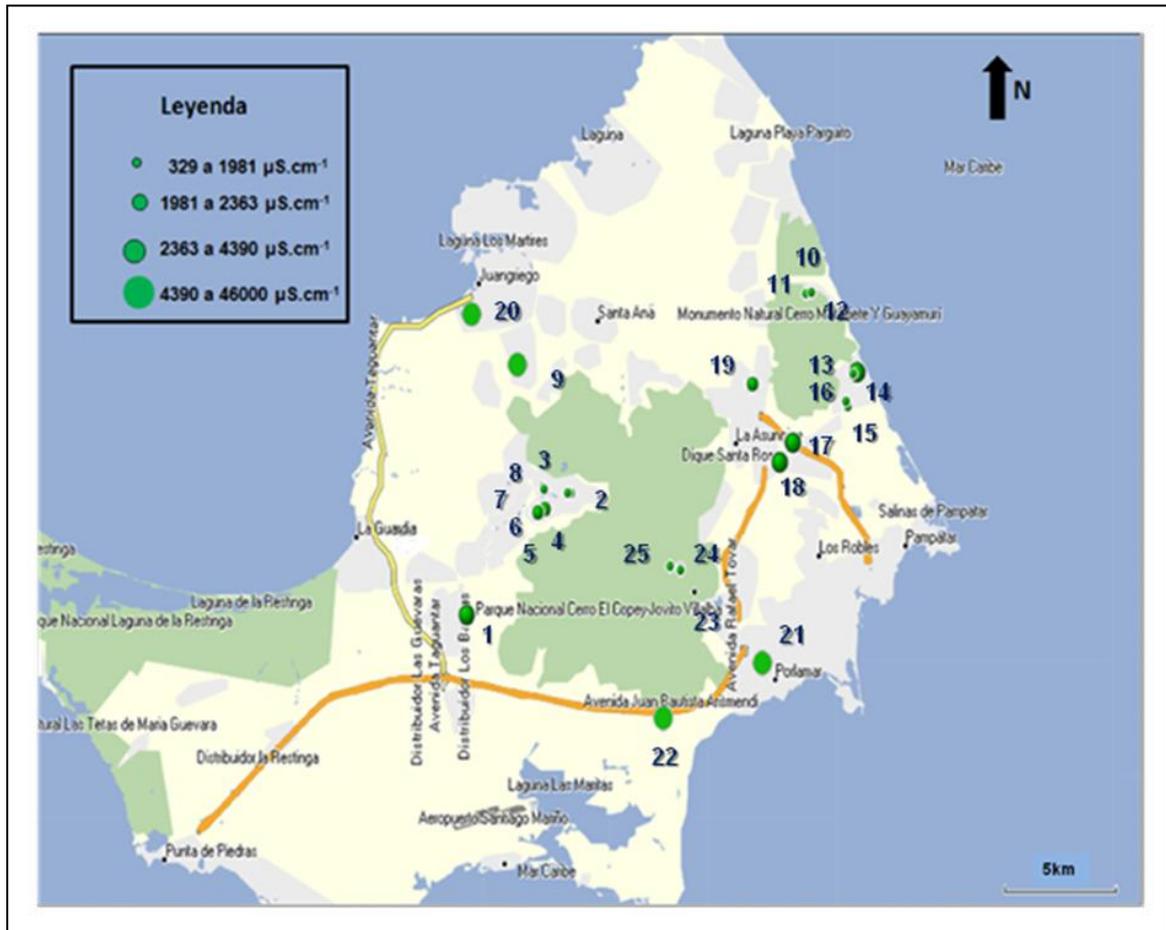
Según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para el parámetro de conductividad está establecido solo para el tipo de agua clase 2, el cual es de  $2000 \mu\text{Scm}^{-1}$ . En función de esto, de las 25 muestras de interés en el presente estudio, el 56% cumple con dicho decreto, las cuales se le puede asociar el uso correspondiente a este tipo de agua clase 2, indicado en la Tabla 4 como uso doméstico, protección de las comunidades hidrobiológicas, recreación de contacto total, uso agrícola y pecuario.

En el mismo orden de ideas, atendiendo a algunos de los trabajos realizados en la zona oriental de la isla de Margarita, en este caso al parámetro conductividad, Rodríguez (2000) sostiene que las muestras analizadas presentaron una mediana de  $2040 \mu\text{Scm}^{-1}$  y un intervalo que está entre 654 y  $4320 \mu\text{Scm}^{-1}$ ; por su parte, Michel (2006) sostiene que sus muestras presentaron una mediana de  $2329 \mu\text{Scm}^{-1}$  y un intervalo cuyo valor mínimo y máximo son 835 y  $3948 \mu\text{Scm}^{-1}$ , respectivamente. Dicho intervalo es similar al obtenido en el presente trabajo de investigación para este parámetro. Rodríguez (2000), atribuye al valor anómalo obtenido en una de las

muestras analizadas, por encima del límite superior de conductividad, principalmente a una posible intrusión marina, dada la proximidad de esta localidad a la costa.



**Figura 13:** Mapa de distribución espacial del pH en la zona de estudio



**Figura 14:** Mapa de distribución espacial de la conductividad en la zona de estudio

#### IV.2.1.2 Sólidos disueltos totales (SDT)

Los valores de SDT calculados para las muestras de aguas correspondientes a la zona en estudio estuvieron entre 236 y 2840  $\text{mgL}^{-1}$ , presentando una mediana de 1515  $\text{mgL}^{-1}$ . De igual manera, se tuvo la presencia de valores anómalos en las muestras MASMM-21, MASLM-9, MASLI-22 y MASSP-20 con una concentración de SDT de 3955, 4065, 8440 y 31961  $\text{mgL}^{-1}$ , respectivamente (Figura 12). Nótese que dichos valores anómalos concuerdan con los presentados en la caja gráfica con el parámetro de conductividad, esto como consecuencia de la dependencia entre ambas variables. En este sentido, mientras mayor es la concentración de SDT, mayor es la conductividad en el agua.

En función de la sencilla clasificación de las aguas según la concentración de SDT (Apartado II.6) y atendiendo a los resultados obtenidos para las concentraciones de dicho parámetro (Tabla 2A, Apéndice A), se puede señalar que el 76% de las aguas son salobres, el 20% son frescas o dulces y el 4% salinas. Esta última corresponde a la muestra MASSP-20, la cual presenta el valor de conductividad más elevada de la totalidad de las muestras y por ende mayor concentración de SDT (31962  $\text{mgL}^{-1}$ ). Con respecto a las aguas frescas o dulces, 3 de las 5 que se corresponden al 20% de este grupo, representadas por las muestras rotuladas como MASPSJ-2, MASPEV-24 y MASPEV-25 fueron captadas en aguas superficiales; nótese igualmente en la Tabla 1, que sus valores de concentración de SDT son menores que aquellas asociadas a las aguas subterráneas.

Desde el punto de vista de la distribución espacial de los SDT (Figura 15), existe una marcada tendencia creciente de concentración de dicho parámetro, desde la zona de recarga hasta la zona de descarga o muestras cercanas a la costa, donde geográficamente se concentran las muestras de aguas mas salobres y salinas.

Según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para la concentración de SDT es de 1300  $\text{mgL}^{-1}$  para los tipos de aguas

correspondientes a las clases 1, 2, 3; mientras que para la clase 4 no está reportado. En función de esto, de las 25 muestras de interés en el presente estudio, el 68% sobrepasa dicho límite, no cumpliendo así con el Decreto para las tres primeras clases por lo que a este grupo de muestras no se le puede asociar el uso correspondiente a cada una de ellas, indicado en la Tabla 4.

Atendiendo al parámetro de SDT y tomando como referencia algunos de los trabajos realizados en la isla de Margarita, se señala que Vargas (1997) reportó que el 47,5% de las aguas de la región nororiental de la isla presentaban concentraciones de SDT por encima de los 1500 mgL<sup>-1</sup>. Por su parte, Rodríguez (2000) determinó una mediana de 1537 mgL<sup>-1</sup> en las aguas subterráneas de todo el sector nororiental de la isla, y un intervalo de concentraciones que está entre 511 a 3233 mgL<sup>-1</sup>; mientras que en esta misma zona, Michel (2006), señaló un valor de fondo de SDT de 1553 mgL<sup>-1</sup> y concentraciones mínima y máxima entre 675 y 2808 mgL<sup>-1</sup>. Nótese que el valor de la mediana obtenido en el presente trabajo de investigación de 1515 mgL<sup>-1</sup>, es similar a los trabajos antes mencionados.

#### **IV.2.1.3 Sílice disuelta SiO<sub>2</sub>**

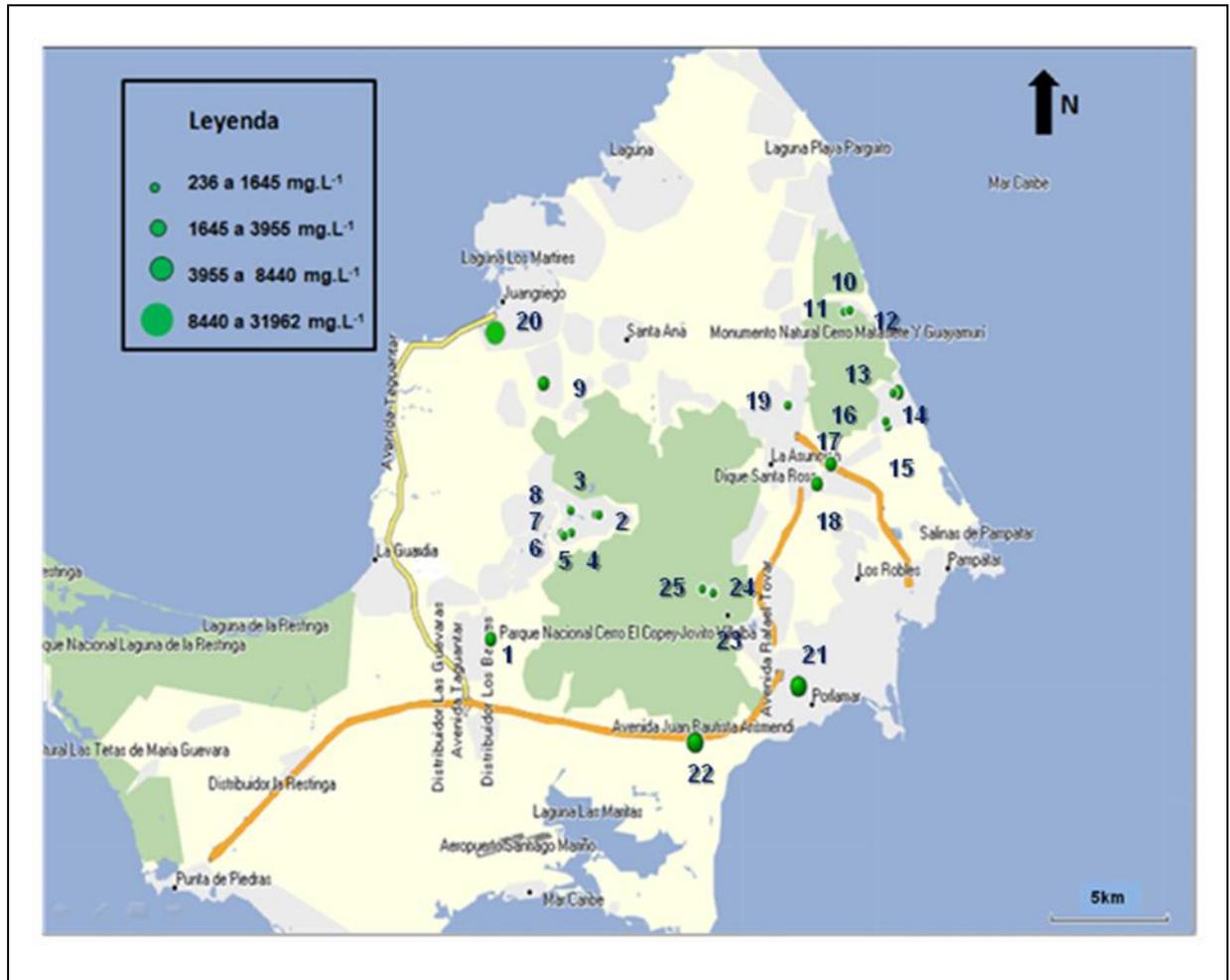
De acuerdo a la Figura 12, se tiene que las muestras de aguas correspondientes a la zona sur oriental de la isla de Margarita, en función de las concentraciones de SiO<sub>2</sub>, presentan una mediana de 25,70 mgL<sup>-1</sup> y un intervalo de concentración de la misma de 18,56 y 48,74 mgL<sup>-1</sup>; además de presentar valores anómalos en las muestras MASMA-17, MASEV-23 y MASSG-16, cuyos valores de concentraciones de SiO<sub>2</sub> son 56,36 mgL<sup>-1</sup>, 64,52 mgL<sup>-1</sup> y 79, 50 mgL<sup>-1</sup>, respectivamente.

Como se puede observar, el valor correspondiente a la mediana (25,70 mgL<sup>-1</sup>) es superior al valor normal de SiO<sub>2</sub> reportado en la literatura para las aguas subterráneas (16 mgL<sup>-1</sup>)<sup>[10]</sup>; así como también los 3 valores anómalos que están por encima del límite superior representados en la correspondiente caja gráfica.

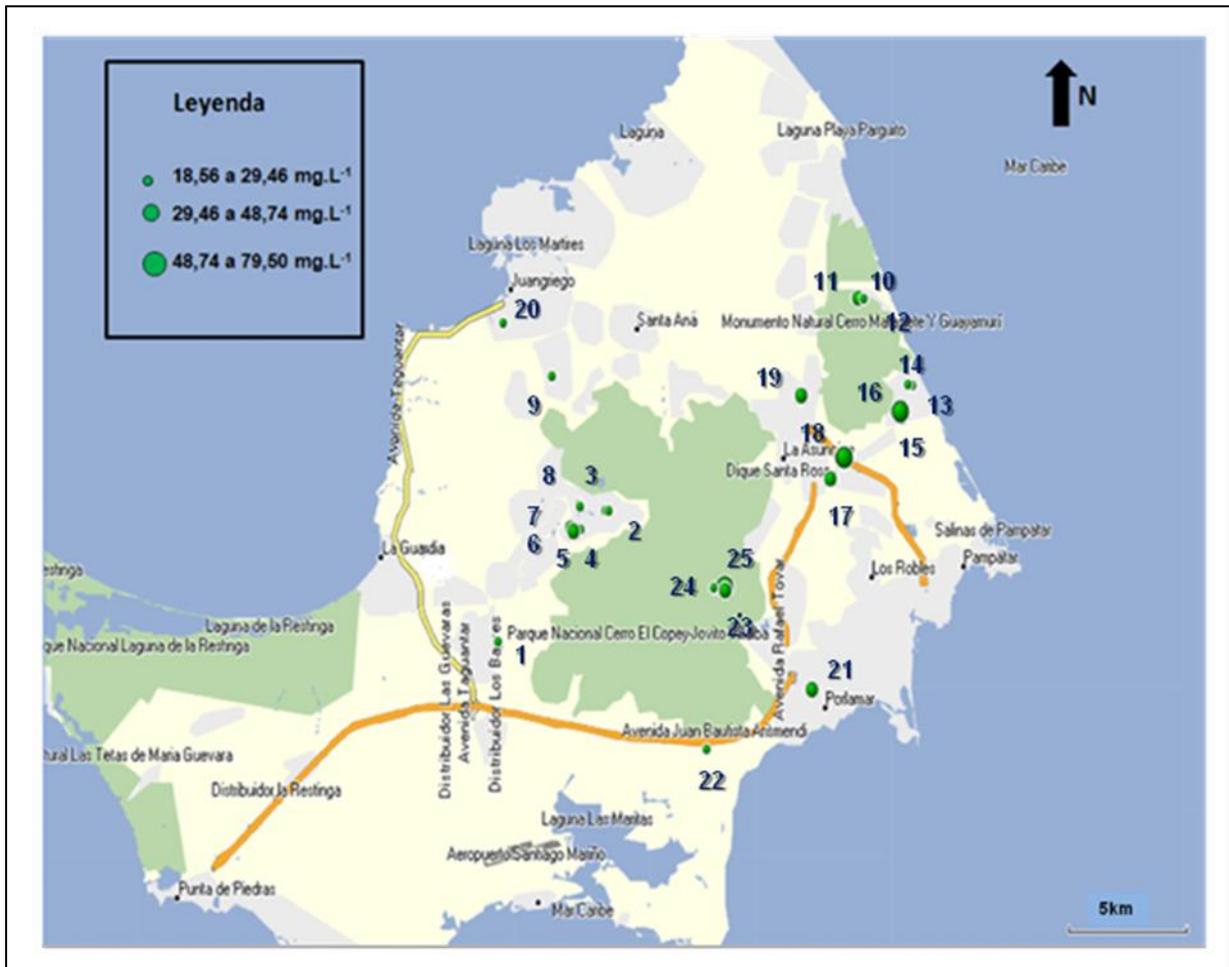
En general, las concentraciones de  $\text{SiO}_2$  provienen de la alteración de los silicatos y aluminosilicatos. Parte de las aguas subterráneas de la zona oriental de la isla de Margarita están en contacto con rocas ultramáficas, las cuales están sujetas a una fácil alterabilidad de sus minerales constituyentes. Esto sumado al favorecimiento de los agentes de meteorización bajo las condiciones climáticas de la isla, conllevan a la obtención de un alto residuo de alteración de silicatos <sup>[32]</sup>. Lo antes expuesto puede explicar estas concentraciones superiores a los valores normales de sílice en las aguas subterráneas.

En la Figura 16 se puede observar la distribución espacial de las muestras en función de la concentración de  $\text{SiO}_2$ , nótese que existe una mayor concentración de la misma en la parte este de la zona oriental, donde quizá exista mayor presencia de dichas rocas ultramáficas.

En este sentido, Rodríguez (2000) determinó una mediana de  $\text{SiO}_2$  para las aguas subterráneas de la región nororiental de la isla de 54,8  $\text{mgL}^{-1}$ , con un intervalo de concentración que está entre 36,5 y 77,1  $\text{mgL}^{-1}$ ; mientras que Michel (2006) determinó una mediana de  $\text{SiO}_2$  en la misma zona del autor antes citado de 48,44  $\text{mgL}^{-1}$  y un intervalo de concentraciones entre 39,01 y 73,16  $\text{mgL}^{-1}$ , superiores a los obtenidos en el presente trabajo de investigación. Esto permite inferir que en la zona sur oriental de la isla de Margarita existe una menor alteración de los silicatos que en la parte norte de la misma y por ende menor concentración de  $\text{SiO}_2$  en sus aguas subterráneas, probablemente debido a una menor presencia de rocas menos resistentes a los procesos de meteorización.



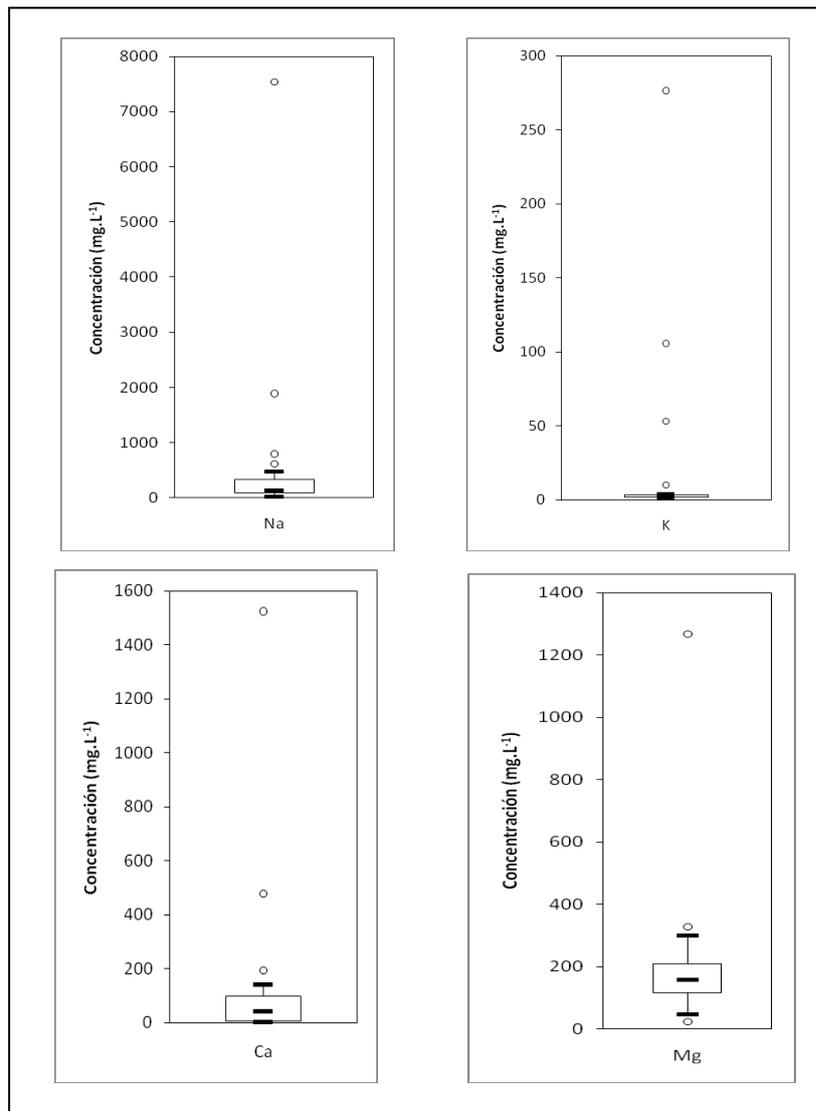
**Figura 15:** Mapa de distribución espacial de los sólidos disueltos totales en la zona de estudio



**Figura 16:** Mapa de distribución espacial de la sílice disuelta en la zona de estudio

#### IV.2.2 Cationes: $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{Mg}^{2+}$

Seguidamente se discute el comportamiento estadístico y espacial de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . En este sentido, en la Figura 17, se puede observar las cajas gráficas para las concentraciones de los cationes antes mencionados.



**Figura 17:** Cajas gráficas para los valores de concentración de sodio, potasio, calcio y magnesio

#### IV.2.2.1 Sodio

El  $\text{Na}^+$  presentó una mediana de  $130 \text{ mgL}^{-1}$  y un intervalo de concentraciones que está entre  $21$  y  $472 \text{ mgL}^{-1}$ , así como también valores anómalos correspondientes a las muestras MASMM-21, MASLM-9, MASLI-22 y MASSP-20, con concentraciones de  $619 \text{ mgL}^{-1}$ ,  $783 \text{ mgL}^{-1}$ ,  $1882 \text{ mgL}^{-1}$  y  $7538 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente (Figura 17).

Desde el punto de vista espacial (Figura 18), nótese que las muestras con concentraciones anómalas en  $\text{Na}^+$  fueron detectadas en Porlamar y en Juan Griego, en áreas muy cercanas a la costa. Esto parece apuntar hacia el proceso de mezcla de agua de mar con el agua contenida en los acuíferos costeros; quizá como consecuencia de la sobreexplotación de pozos, o podría también ser el producto de la interacción del agua dulce con formaciones geológicas depositadas en ambiente marino que posteriormente por eventos tectónicos, emergió hacia niveles superficiales. Es importante resaltar que, de las 4 muestras que presentaron los valores anómalos, la correspondiente a MASLM-9 es la que está un poco más alejada de la costa, por lo que puede señalarse que en esta puede estar siendo influenciada por aerosoles marinos o algún efecto antrópico (Figura 18); no obstante, el proceso más importante podría estar asociado a la presencia en el acuífero de arcillas depositadas en ambiente marino.

Igualmente se observa en este mapa (Figura 18) que existe un patrón de distribución de manera creciente de  $\text{Na}^+$  en sus valores de concentración desde las zonas de recarga hasta la zona de descarga o cercanas a la costa. Esta distribución está asociada con aguas recientemente incorporada a los acuíferos a través de los procesos de precipitación atmosférica y por ende, el corto tiempo de interacción con el sustrato rocoso dada la rápida circulación en las zonas altas. Paralelo a la alta movilidad del  $\text{Na}^+$ , el cual es posteriormente concentrado en las zonas bajas debido a una disminución en la circulación. Igualmente, existen otros probables procesos como el lavado de sedimentos de origen marino y el intercambio con arcillas del mismo origen; así como fue expuesto anteriormente, al proceso de mezcla con el

agua de mar, la disolución local de sales como por ejemplo la halita (NaCl) y a la precipitación atmosférica que contiene núcleos salinos de condensación de la espuma de mar y que pueden desplazarse hasta 75 Km costa adentro [28].

Según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), el límite máximo permisible para la concentración de Na<sup>+</sup> es de 140 mg.L<sup>-1</sup> para las clases 1 y 2, mientras que para las clases 3 y 4, no está reportado. En función de lo cual se puede indicar que de las 25 muestras de interés en el presente estudio, el 56% cumple con dicho decreto, mientras que el 44% restante no es apto para los usos establecidos en la tabla 4 para las clases 1 y 2.

Con respecto a los estudios realizados en la isla de Margarita, en función de la concentración de Na<sup>+</sup>, Rodríguez (2000) reporta una mediana de 159 mgL<sup>-1</sup> para las aguas subterráneas de todo el sector nororiental, y un intervalo de concentraciones que está entre 21 y 561 mgL<sup>-1</sup>. Por su parte, Michel (2006) determinó una mediana de 171 mgL<sup>-1</sup> y un intervalo de concentraciones entre 8 y 529 mgL<sup>-1</sup>. Nótese que los valores de fondo (mediana) obtenidos para ambos estudios y arrojados en el presente trabajo de investigación para las concentraciones de Na<sup>+</sup> de 130 mgL<sup>-1</sup>, son muy cercanos.

#### **IV.2.2.2 Potasio**

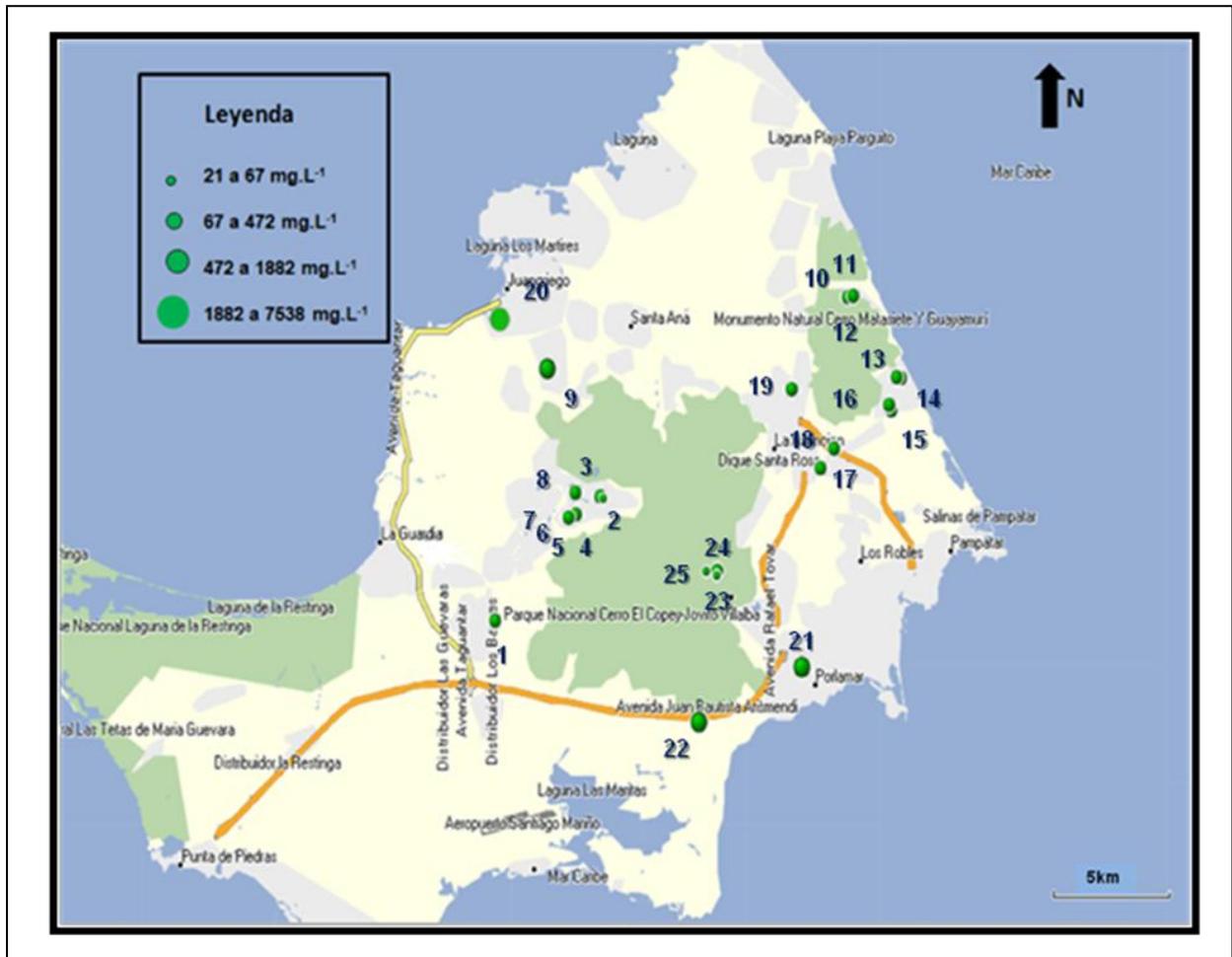
La caja gráfica construida para el K<sup>+</sup> para la totalidad de las aguas captadas a la zona de estudio es mostrada en la Figura 17. De esta gráfica se extrae que la mediana es de 2,91 mgL<sup>-1</sup> y un intervalo de concentración que está entre 0,93 y 4,08 mgL<sup>-1</sup>. Dicho intervalo es pequeño, lo que desde el punto de vista espacial, no permite visualizar una variabilidad marcada de esta especie en la zona sur oriental de la isla de Margarita (Figura 19); exceptuando los valores anómalos en las muestras MASSG-15, MASLM-9, MASLI-22 y MASSP-20, con concentraciones de 10,20, 53,40, 105,40 y 276,00 mgL<sup>-1</sup> respectivamente (Figura 17).

En general, puede señalarse que la concentración de fondo obtenida, resulta bastante cercana a la concentración esperada para las aguas subterráneas de  $3 \text{ mgL}^{-1}$  [10].

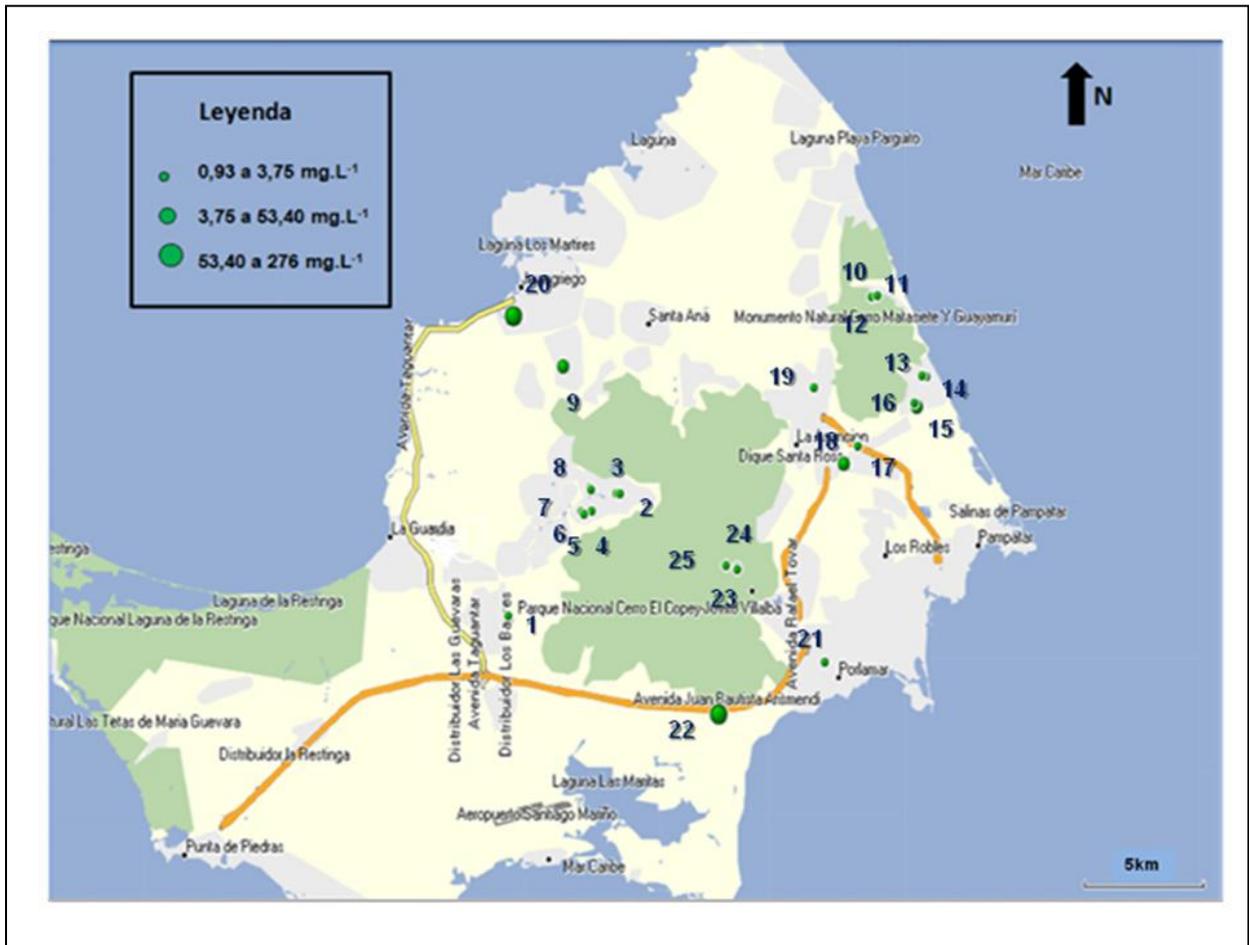
Espacialmente se puede observar en la Figura 19 que las muestras que presentan valores anómalos de concentraciones de  $\text{K}^+$  fueron captadas en áreas cercanas a la línea costera. Posiblemente el contenido de potasio esté gobernado por avances de la cuña salina dentro del acuífero; así como también puede atribuirse a la intervención antrópica mediante el uso de algún tipo de abono, como por ejemplo el  $\text{KNO}_3$ , ya que en algunos sectores de la zona son comunes las prácticas agrícolas. No obstante, como fue señalado, es importante considerar la presencia de arcillas depositados en ambiente marino, cuyo efecto neto es el de transferir a través del intercambio iónico, el  $\text{K}^+$  presente en la superficie de la arcilla hacia el agua circundante [7].

Según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para la concentración de  $\text{K}^+$  es  $20 \text{ mgL}^{-1}$  para la clases 3, mientras que para las clases 1, 2 y 4 no está reportado. En ese sentido, se puede señalar que de las 25 muestras captadas en el presente estudio, el 88% cumple con dicho decreto; mientras que el 12% restante, no es apto para los usos indicados en la Tabla 4 para el tipo de agua clase 3.

Atendiendo a los diversos estudios realizados en la zona, entre los que destacan al realizado por Vargas (1997) quien estableció que las concentraciones de  $\text{K}^+$  no superaban los  $5 \text{ mgL}^{-1}$ ; por su parte Rodríguez (2000) reportó un valor de fondo de  $\text{K}^+$  de  $2,69 \text{ mgL}^{-1}$  y concentraciones mínima y máxima de  $0,99$  y  $5,12 \text{ mgL}^{-1}$ ; de igual manera, Michel (2006) determinó un valor de fondo de  $2,2 \text{ mgL}^{-1}$  y un intervalo de concentraciones entre  $1,0$  y  $5,1 \text{ mgL}^{-1}$ . Nótese que los valores de fondo obtenidos en los diferentes trabajos anteriores, son muy similares a los determinados en el presente trabajo de investigación, estando como se mencionó, dentro del valor de concentración normal de  $\text{K}^+$  reportado para las aguas subterráneas de  $3 \text{ mgL}^{-1}$  [10].



**Figura 18:** Mapa de distribución espacial del sodio en la zona de estudio



**Figura 19:** Mapa de distribución espacial del potasio en la zona de estudio

### IV.2.2.3 Calcio

Estadísticamente a través de las cajas gráficas, se determinó que en la región sur oriental de la isla de Margarita, el  $\text{Ca}^{2+}$  presenta una mediana de  $41,4 \text{ mgL}^{-1}$  y concentraciones mínima y máxima de  $1,4$  y  $140,4 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente (Figura 17). Así mismo, esta gráfica permitió detectar valores anómalos correspondientes a las muestras MASLM-9 ( $195,0 \text{ mgL}^{-1}$ ), MASLI-22 ( $478,0 \text{ mgL}^{-1}$ ) y MASSP-20 ( $1522,0 \text{ mgL}^{-1}$ ).

Por su parte, la Figura 20 permite visualizar la distribución espacial para el  $\text{Ca}^{2+}$  en la zona de estudio, para las 25 muestras de aguas captadas en la zona de interés. Obsérvese que las muestras cuyos valores son anómalos de  $\text{Ca}^{2+}$ , están ubicadas en áreas cercanas a la línea costera. Este comportamiento podría ser atribuido al efecto de la probable influencia de cuñas marinas, ya que el agua de mar contiene normalmente  $410 \text{ mgL}^{-1}$  de  $\text{Ca}^{2+}$  (Tabla 1I, apéndice I). Además de esto también se puede atribuir a otros factores entre los que pueden incluirse a la hidrólisis de silicatos cálcicos presentes en las rocas máficas; así como a la presencia de sedimentos depositados en ambientes marinos <sup>[18]</sup>.

Considerando el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  es  $200 \text{ mg.L}^{-1}$  para las clases 1, 2 y 3; mientras que para la clase 4 su límite no está reportado. Debido a ello, se puede señalar que de las 25 muestras captadas en el presente estudio, el 92% cumple con dicho decreto; mientras que el 8% restante no es apto para los usos establecidos en la tabla 4 para las clases 1, 2 y 3.

Así mismo, tomando como referencia los trabajos realizados en la isla, se tiene que Rodríguez (2000) determinó un valor de fondo de  $25,67 \text{ mg.L}^{-1}$  y un intervalo de concentraciones mínimo y máximo de  $3,21$  y  $122,33 \text{ mgL}^{-1}$ . Por su parte Michel (2006) determinó un valor de fondo para esta especie de  $6,80 \text{ mgL}^{-1}$  y concentraciones mínima y máxima de  $0,15$  y  $24,74 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. Los

resultados con respecto a la estadística de esta especie química, en el presente trabajo de investigación difieren con los anteriores. Esto es debido a que el estudio de Rodríguez (2000) es del tipo regional al igual que el realizado en el presente trabajo, lo que permitió tener un mayor control sobre las diversas litologías que allí están presentes; mientras que el estudio de Michel (2006) es del tipo local.

#### IV.2.2.4 Magnesio

En la Figura 17 se representa la caja gráfica para el  $Mg^{2+}$ , de esta figura se extrae que la mediana es de  $156 \text{ mgL}^{-1}$  y el intervalo de concentraciones mínima y máxima de 46 y  $300 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. De igual manera, nótese en esta figura los valores anómalos de esta especie química, los cuales están asociados a las muestras MASPEV-25 ( $23 \text{ mgL}^{-1}$ ), MASMM-21 ( $328 \text{ mgL}^{-1}$ ) y MASSP-20 ( $1267 \text{ mgL}^{-1}$ ). Es importante señalar que la muestra MASPEV-25 fue captada en un pozo de agua superficial; lo que explica el valor anómalo detectado, esto debido a que en general, las concentraciones de  $Mg^{2+}$  en aguas superficiales son inferiores que los valores promedios presentes en las aguas subterráneas (Tabla 1); no obstante, debe resaltarse la presencia de rocas máficas cuya hidrólisis genera aguas con altos valores de  $Mg^{2+}$ , evidenciado esto por el valor de fondo obtenido en este estudio de  $156 \text{ mgL}^{-1}$ . Debe resaltarse que los valores de  $Mg^{2+}$  reportados para las aguas subterráneas es de  $7 \text{ mg.L}^{-1}$  (Tabla 1); mientras que para las otras dos muestras, cuyos valores son superiores al límite máximo de concentración, se tiene que espacialmente ambas se captaron en áreas cercanas a la línea costera (Figura 21). Esto permite inferir la existencia de un proceso de mezcla del agua de mar con las aguas subterráneas del acuífero. El agua de mar tiene una alta concentración de  $Mg^{2+}$  en comparación a la establecida para el agua subterránea (tabla 1I, apéndice I).

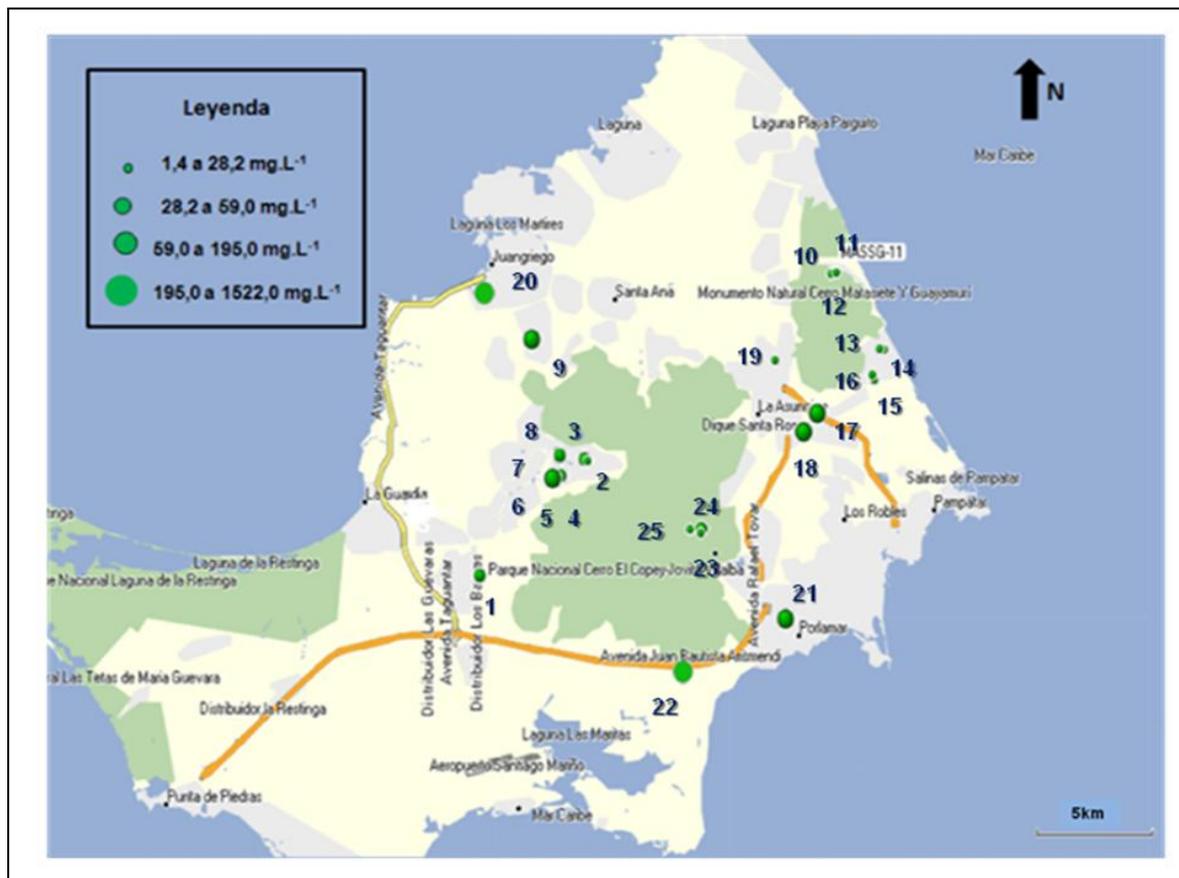
Al visualizar el valor de fondo obtenido para esta especie química ( $156 \text{ mgL}^{-1}$ ), y observar el mapa de distribución espacial en la Figura 21, se puede inferir que en general las aguas de esta zona son ricas en  $Mg^{2+}$ ; haciendo énfasis en que es

considerablemente superior el valor de fondo obtenido con el valor de concentración normal de esta especie en aguas subterráneas de  $7 \text{ mgL}^{-1}$  (tabla 1). Esto puede ser consecuencia de que en toda la zona oriental de Margarita, aunque de manera dispersa, afloran rocas ricas en minerales de magnesio, y muchas otras rocas ultramáficas [29].

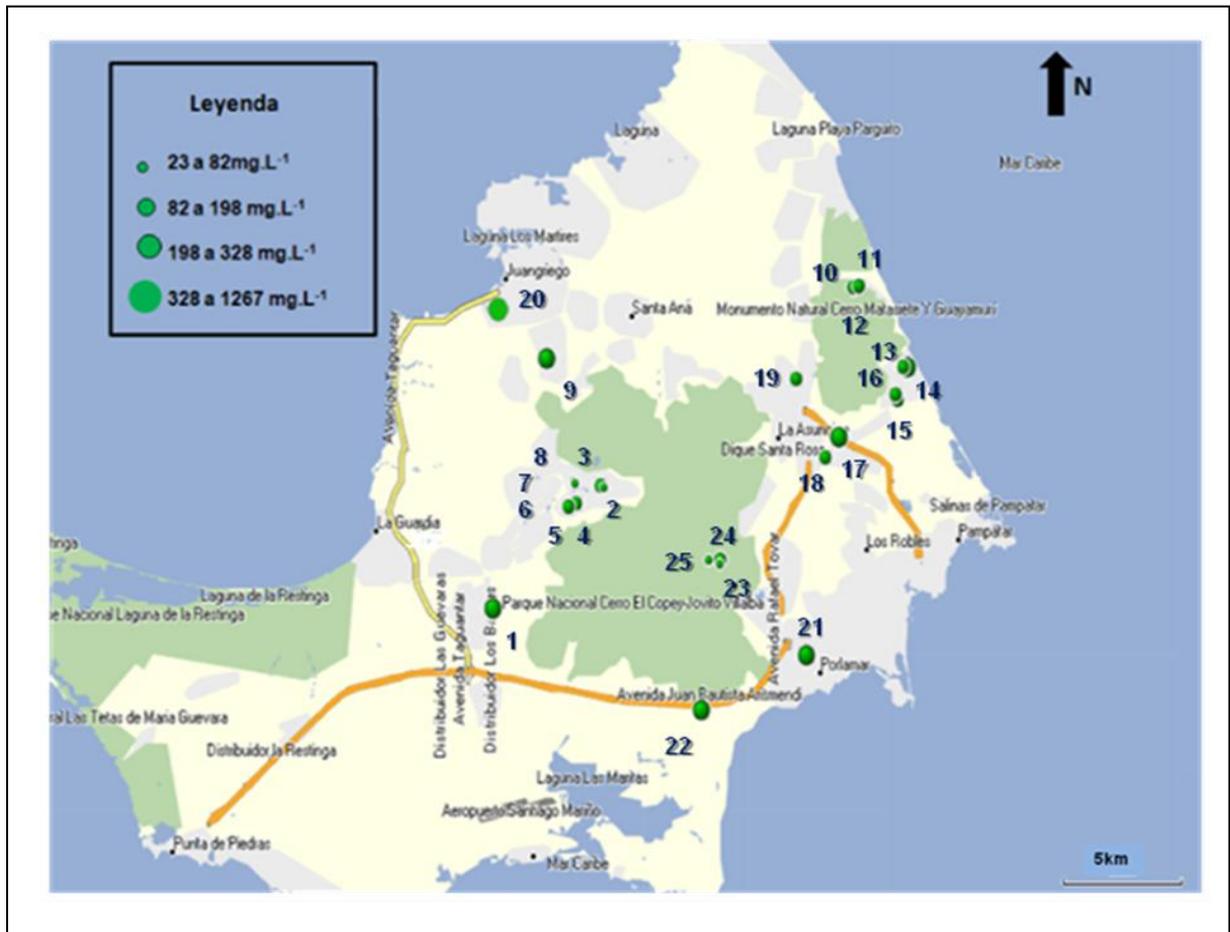
Así mismo, es también importante acotar que la variabilidad en las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  de un pozo a otro, puede ser consecuencia de los procesos de ablandamiento natural, debido a fenómenos de intercambio iónico lo que podría explicar los bajos valores detectados en algunas muestras.

Desde el punto de vista de la calidad química del agua, atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para la concentración de  $\text{Mg}^{2+}$  es  $0,2 \text{ mgL}^{-1}$  para las clases 1 y 2; mientras que para la clase 3 es de  $70 \text{ mgL}^{-1}$  y para la 4 no está reportado. En ese sentido, de las 25 muestras de aguas captadas en el presente estudio, el 16% cumple con dicho decreto para la clase 3, ninguna muestra cumple con el decreto para las clases 1 y 2 y el 84% no es apto para los usos establecidos en la tabla 4 para las clases 1, 2 y 3, ya que superan dichos límites.

Es importante acotar que existe una similitud en el valor de fondo ( $156 \text{ mgL}^{-1}$ ) obtenido en el presente trabajo de investigación para las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  en toda la zona de estudio y los obtenidos para la zona nororiental de la isla de Margarita por Rodríguez (2000) quien reportó un valor de fondo de  $156,7 \text{ mgL}^{-1}$ , mientras que el obtenido por Michel (2006) fue de  $159 \text{ mgL}^{-1}$ .



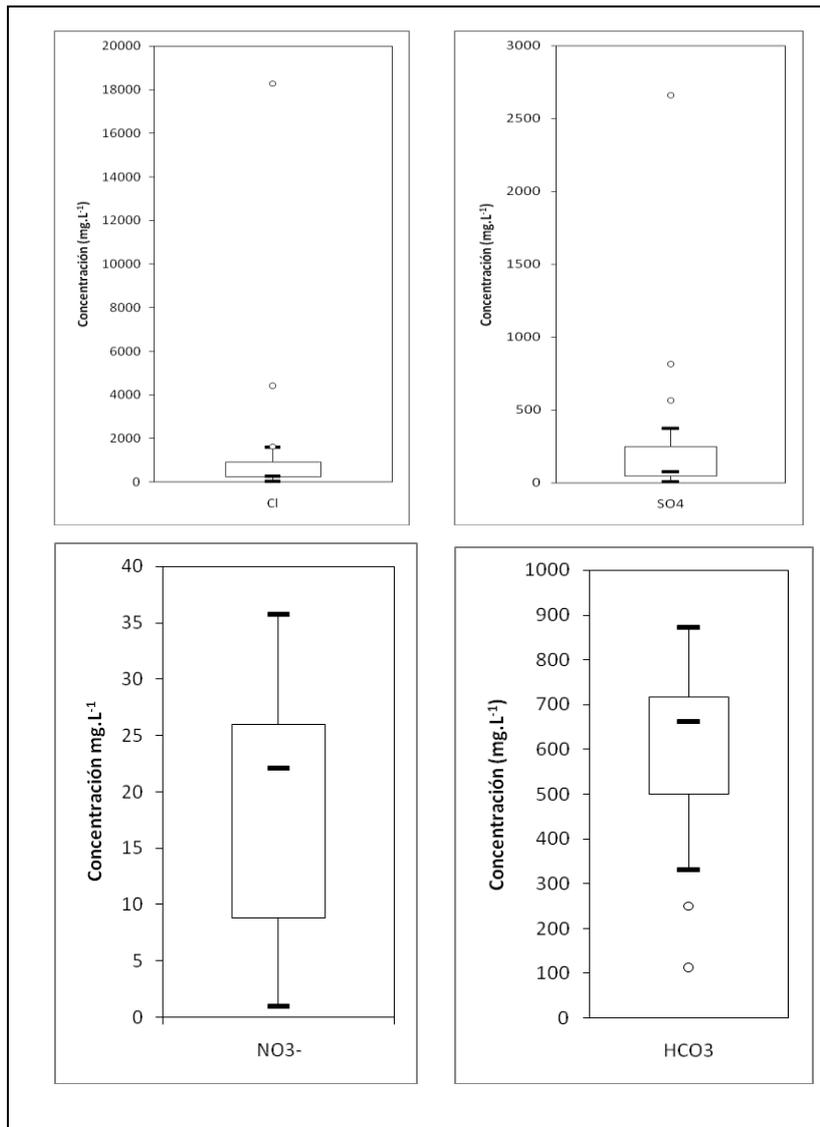
**Figura 20:** Mapa de distribución espacial del calcio en la zona de estudio



**Figura 21:** Mapa de distribución espacial del magnesio en la zona de estudio

### IV.2.3 Aniones: $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{HCO}_3^-$

Seguidamente son discutidos desde el punto de vista estadístico y espacial, las especies químicas  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ . En ese sentido, en la Figura 22, se puede observar las cajas gráficas para las concentraciones de los aniones antes indicados.



**Figura 22:** Cajas gráficas para los valores de concentración de cloruro, sulfato, nitrato y bicarbonato

### IV.2.3.1 Cloruro

De acuerdo a la Figura 22, la región sur oriental de la isla de Margarita se caracteriza por tener una mediana de  $285,0 \text{ mgL}^{-1}$  en lo que se refiere a las concentraciones de  $\text{Cl}^-$ , así como también por valores mínimo y máximo de 42,2 y  $1589,0 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. Además, esta caja gráfica permitió detectar valores anómalos que se corresponden con las muestras MASMM-21 ( $1629,1 \text{ mgL}^{-1}$ ), MASLI-22 ( $4394,0 \text{ mgL}^{-1}$ ) y MASSP-20 ( $18284,0 \text{ mgL}^{-1}$ ). Es de resaltar que dichas concentraciones anómalas están muy alejadas del valor de la mediana obtenido y su comportamiento estadístico es similar que el obtenido para el sodio, apuntando esto hacia un origen común para ambas especies. Por otra parte, existen otras muestras como por ejemplo la MASLM-9 que representa el límite superior de la caja gráfica para el cloruro, que también presentan valores medianamente altos, lo que podrían considerarse también como valores anómalos con respecto al valor de fondo.

La distribución espacial de las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  presentada en la Figura 23, muestra que existen los mayores valores de concentración y en niveles topográficos bajos. En ese sentido, puede señalarse que los valores anómalos podrían estar asociados a probables efectos de mezcla con agua de mar por el proceso de intrusión marina hacia los acuíferos costeros. Así mismo, los altos valores presentes hacia costas más altas, podrían deberse al aporte atmosférico a través de los aerosoles marinos, sin descartar que el material litológico que constituye al o los acuíferos fueron depositados en un ambiente marino.

Nótese que la muestra MASSP-20, presenta un muy elevado valor de concentración de  $\text{Cl}^-$ , muy superior al resto, comportamiento similar que es también observado en el análisis estadístico de esta muestra con respecto al sodio; lo que puede inferirse que este pozo de agua subterránea está sufriendo una intrusión marina. La concentración obtenida de  $\text{Cl}^-$  para la muestra MASSP-20 es cercana a la reportada para el agua de mar (ver tabla 1I, apéndice I). Sin embargo, también podrían tratarse

de aguas marinas acumuladas durante la deposición de los sedimentos presentes en este sector, específicamente en Juan Griego.

Vale destacar la existencia de otros procesos que podrían estar influyendo de manera local en el aporte de  $\text{Cl}^-$  en todas las muestras analizadas, ya que el valor de fondo obtenido de  $285,0 \text{ mgL}^{-1}$  es superior al valor reportado en la literatura para aguas subterráneas de  $20 \text{ mgL}^{-1}$  (tabla 1). Dentro de ellos destacan los vertidos urbanos, el agua de riego u otra actividad humana que pueda aportar cantidades importantes de sales, aunque también se podría sospechar la influencia de aerosoles marinos. No obstante, es pertinente resaltar que para la zona estudiada, debido a la magnitud de los valores determinados, estos efectos locales podrían contribuir muy poco a la composición química final del agua.

De acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para la concentración de  $\text{Cl}^-$  es  $300 \text{ mgL}^{-1}$  para la clase 1; mientras que para las clases 2 y 3 es de  $250 \text{ mgL}^{-1}$  y para la clase 4 no está reportado. Atendiendo a este decreto, de las 25 muestras estudiadas el 52% se pueden clasificar como clase 1, el 40% son clases 2 y 3; mientras que el resto de las muestras sobrepasan los límites establecidos para los 3 primeros tipos de aguas, lo cual no las hace aptas para los usos establecidos en la Tabla 4.

En función de los resultados obtenidos en lo que respecta a las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  en estudios realizados en la isla de Margarita, se puede señalar que Rodríguez (2000) reportó un valor de fondo de  $305 \text{ mgL}^{-1}$  y un intervalo de concentraciones entre 30 y  $1123 \text{ mgL}^{-1}$ ; por su parte Michel (2006) reportó un valor de fondo de  $290 \text{ mgL}^{-1}$  y un intervalo de concentraciones mínimo y máximo de 85 a  $708 \text{ mgL}^{-1}$ . Nótese que existe en ellos, valores cercanos a los obtenidos en el presente trabajo de investigación para esta especie química de  $285,0 \text{ mgL}^{-1}$ .

#### IV. 2.3.2 Sulfato

La caja gráfica construida para el ion  $\text{SO}_4^{2-}$  determinado en las aguas captadas en la zona de estudio permitió identificar una mediana de  $78 \text{ mgL}^{-1}$  y valores mínimo y máximo de 9 y  $375 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente (Figura 22). Además permitió detectar valores anómalos correspondientes a las muestras MASMM-21 ( $563 \text{ mgL}^{-1}$ ), MASLI-22 ( $813 \text{ mgL}^{-1}$ ) y MASSP-20 ( $2656 \text{ mgL}^{-1}$ ).

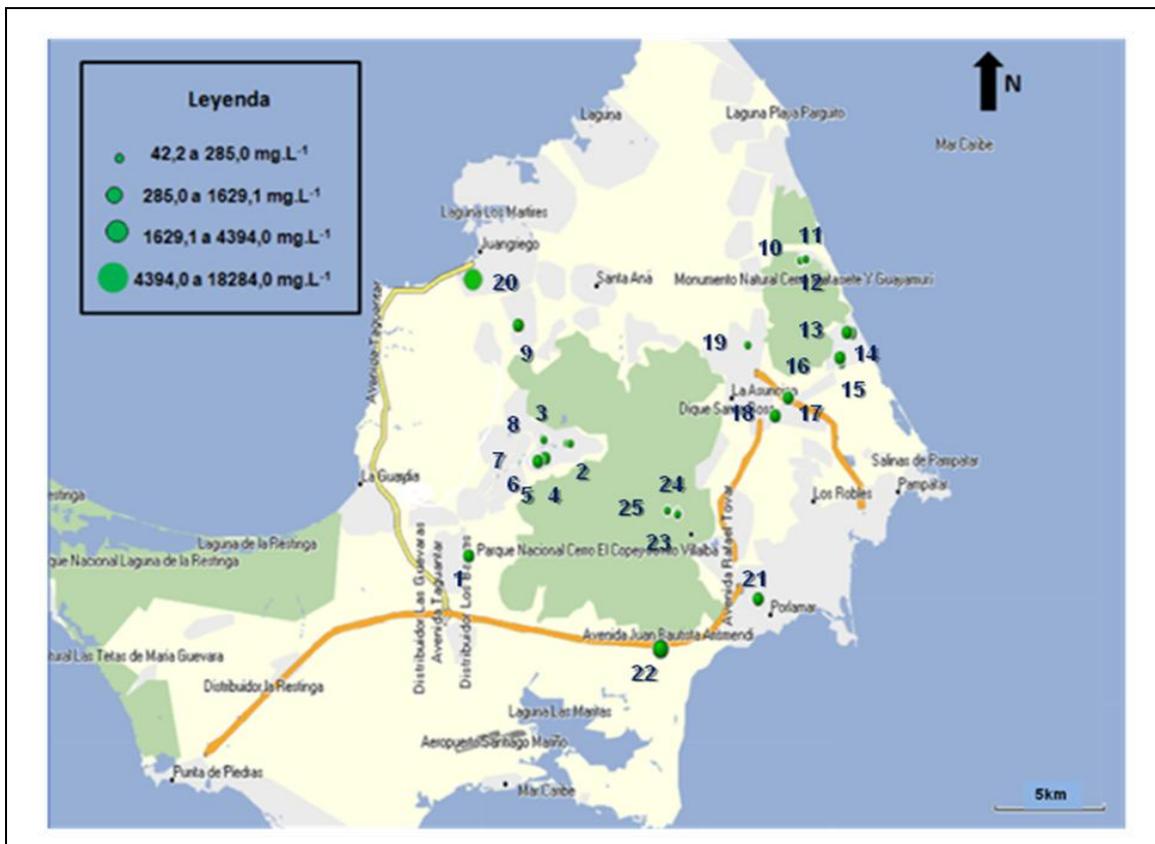
Nótese que los valores anómalos se corresponden con las muestras de aguas que fueron captadas en áreas cercanas a la línea costera (Figura 24). Esto permite apoyar el probable aporte de  $\text{Cl}^-$  hacia las aguas subterráneas por efecto de la intrusión salina. El agua de mar posee normalmente una concentración de  $2700 \text{ mgL}^{-1}$  de  $\text{SO}_4^{2-}$  (tabla 1I, apéndice I). En general, espacialmente se puede observar que las aguas de la zona tienden a incrementar su contenido de  $\text{SO}_4^{2-}$  desde las zonas de recarga, hacia las zonas más bajas.

El valor de fondo obtenido es superior al valor de fondo reportado para aguas subterráneas ( $30 \text{ mgL}^{-1}$ ) (tabla 1). En la literatura se señala que la procedencia del  $\text{SO}_4^{2-}$  en las aguas subterráneas, puede estar asociada al lavado de un terreno formado bajo condiciones de gran aridez o en ambiente marino; a la oxidación de sulfuros; a la disolución de minerales como el yeso; a la concentración del agua de lluvia en el suelo a causa de la fuerte evapotranspiración; y a cierta influencia antrópica como efluentes industriales [32]. Para este estudio, es probable que la formación o acumulación de sedimentos en ambiente marino, pudiera ser otra de las causas que controlen la presencia de  $\text{SO}_4^{2-}$  en las aguas de la región Oriental de la isla de Margarita.

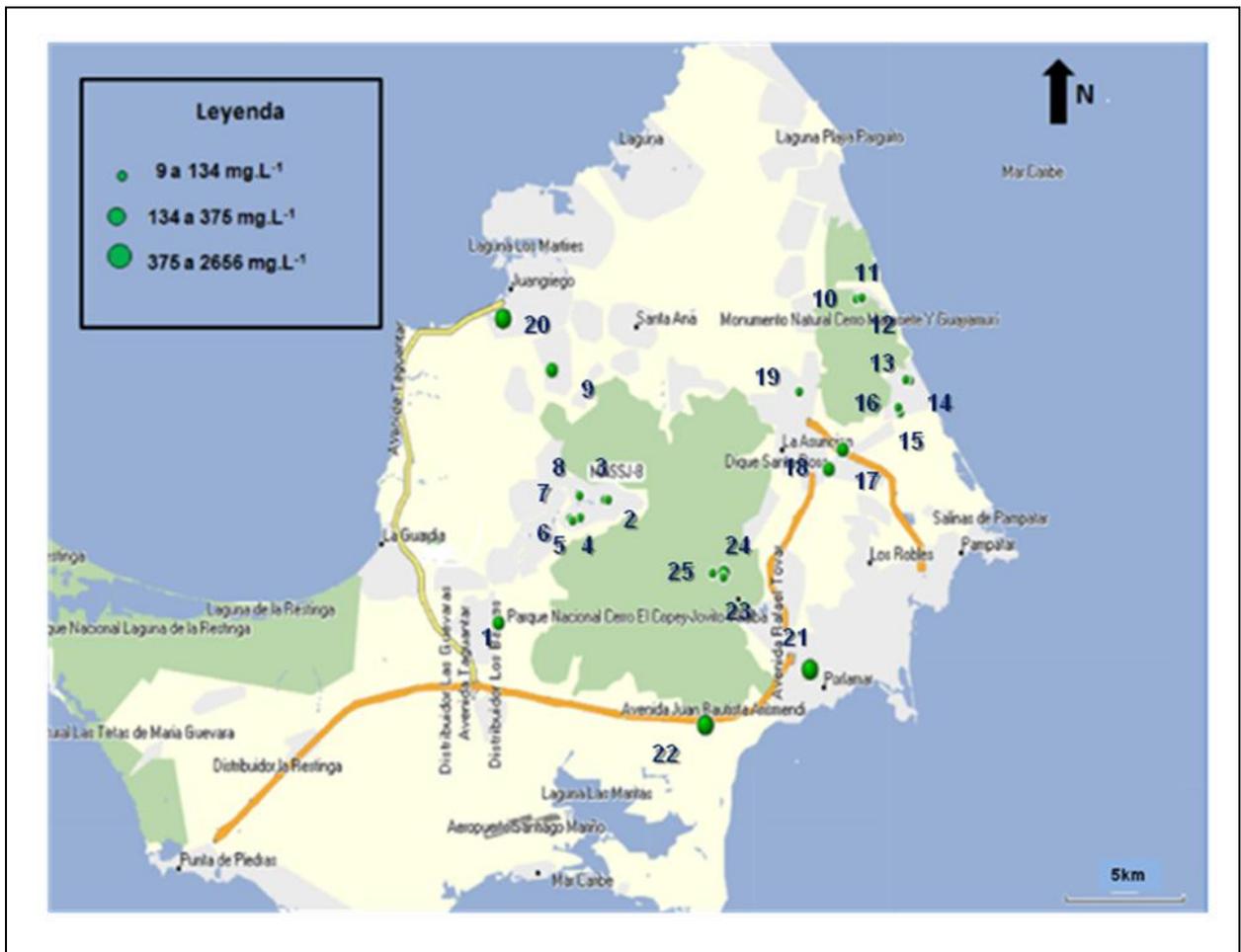
Atendiendo el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  es  $340 \text{ mgL}^{-1}$  para las clases de agua 1, 2 y 3; mientras que para la clase 4 no está reportado. En función de lo cual se puede señalar que de las 25 muestras de aguas captadas el 84% cumple con lo

establecido en dicho decreto para el  $\text{SO}_4^{2-}$  y el 16% restante supera los límites de concentraciones recomendados para estas tres primeras clases de agua. Esto indica que las muestras incluidas en este 16%, no son aptas para los usos correspondientes señalados en la tabla 4.

En el mismo orden de ideas, estudios realizados en la zona nororiental de la isla de Margarita por Rodríguez (2000) obtuvo un valor de fondo en la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  de  $69 \text{ mgL}^{-1}$ ; mientras que para Michel (2006) su valor de fondo fue de  $101 \text{ mgL}^{-1}$ . Es importante señalar que estos valores están alejados del obtenido en el presente trabajo de investigación para esta especie, de  $78 \text{ mgL}^{-1}$ .



**Figura 23:** Mapa de distribución espacial del cloruro en la zona de estudio



**Figura 24:** Mapa de distribución espacial del sulfato en la zona de estudio

### IV.2.3.3 Nitrato

Estadísticamente se obtuvo que las muestras de agua estudiadas en la zona, presentan un valor de concentración de fondo para  $\text{NO}_3^-$  de  $22,00 \text{ mgL}^{-1}$  y un intervalo de concentraciones mínimo y máximo de  $1,00$  y  $36,00 \text{ mgL}^{-1}$  (Figura 22)

La mayor parte del anión  $\text{NO}_3^-$  presente en las aguas naturales tiene un origen orgánico o procede de componentes químicos de origen agrícola o industrial [45]. La presencia de  $\text{NO}_3^-$  es probable que sea aportado a través de contaminación por abonos nitrogenados o zonas donde existen acumulaciones de estiércol y demás desechos orgánicos animales, como podría ser el caso de estas muestras, ya que en esta zona existen sectores en donde se practica la agricultura. También podría estar asociado a la lixiviación de aguas servidas que luego se infiltran hacia el subsuelo alcanzando los acuíferos.

En la Figura 25, se puede observar la distribución espacial de las muestras en función a la concentración de  $\text{NO}_3^-$ , nótese la alta variabilidad en los valores de concentración para toda el área. Es importante señalar que ninguna de las muestras presentó concentraciones por encima del límite máximo permisible recomendado por la Organización Mundial de la Salud, el cual está alrededor de los  $50 \text{ mgL}^{-1}$  [32].

No obstante, según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para la concentración de  $\text{NO}_3^-$  es  $10 \text{ mgL}^{-1}$  para las clases 1 y 2; mientras que para las clases 3 y 4 no está reportado. En función de esto, de las 22 muestras en las cuales se detectó esta especie, solo el 27% cumple con dicho decreto; mientras que el 73% restante no es apto para los usos establecidos en la tabla 4 para las clases 1 y 2. Apuntando hacia la presencia de un grupo de aguas contaminadas en  $\text{NO}_3^-$ , quizá como consecuencia de los desechos urbanos a través de las aguas servidas o por las actividades agropecuarias.

Atendiendo a algunos de los trabajos realizados en la isla de Margarita, Rodríguez (2000) detectó en la zona nororiental, una mediana correspondiente a las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  de  $14,7 \text{ mgL}^{-1}$  con un intervalo de concentraciones mínimo y máximo entre  $0,1$  y  $56,7 \text{ mgL}^{-1}$ . Por su parte Michel (2006) determinó una mediana para esta especie en la misma zona que estudió Rodríguez (2000) de  $21,8 \text{ mgL}^{-1}$  y concentraciones que van desde  $1,8$  hasta  $41,7 \text{ mgL}^{-1}$ . Existe una cercanía entre los valores de  $\text{NO}_3^-$  reportados por este último autor y el obtenido en el presente trabajo de investigación de  $22,00 \text{ mgL}^{-1}$ .

#### **IV.2.3.4 Bicarbonato**

Uno de los aniones más abundante en las aguas estudiadas de la zona sur oriental de la isla de Margarita, es el  $\text{HCO}_3^-$ , con un valor de fondo de  $661 \text{ mgL}^{-1}$  y un intervalo de concentraciones comprendido entre  $331$  y  $871 \text{ mgL}^{-1}$  (Figura 22). De igual manera, se presentan anomalías en las concentraciones de esta especie en las muestras MASPEV-24 y MASPEV-25 cuyos valores de concentraciones son  $251 \text{ mgL}^{-1}$  y  $112 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente (Figura 22). Nótese que ambas muestras se corresponden con las aguas superficiales, lo que explica los menores valores de concentración de esta especie según los valores reportados para aguas superficiales y subterráneas; en estas últimas existe normalmente una mayor concentración de  $\text{HCO}_3^-$  (Tabla 1).

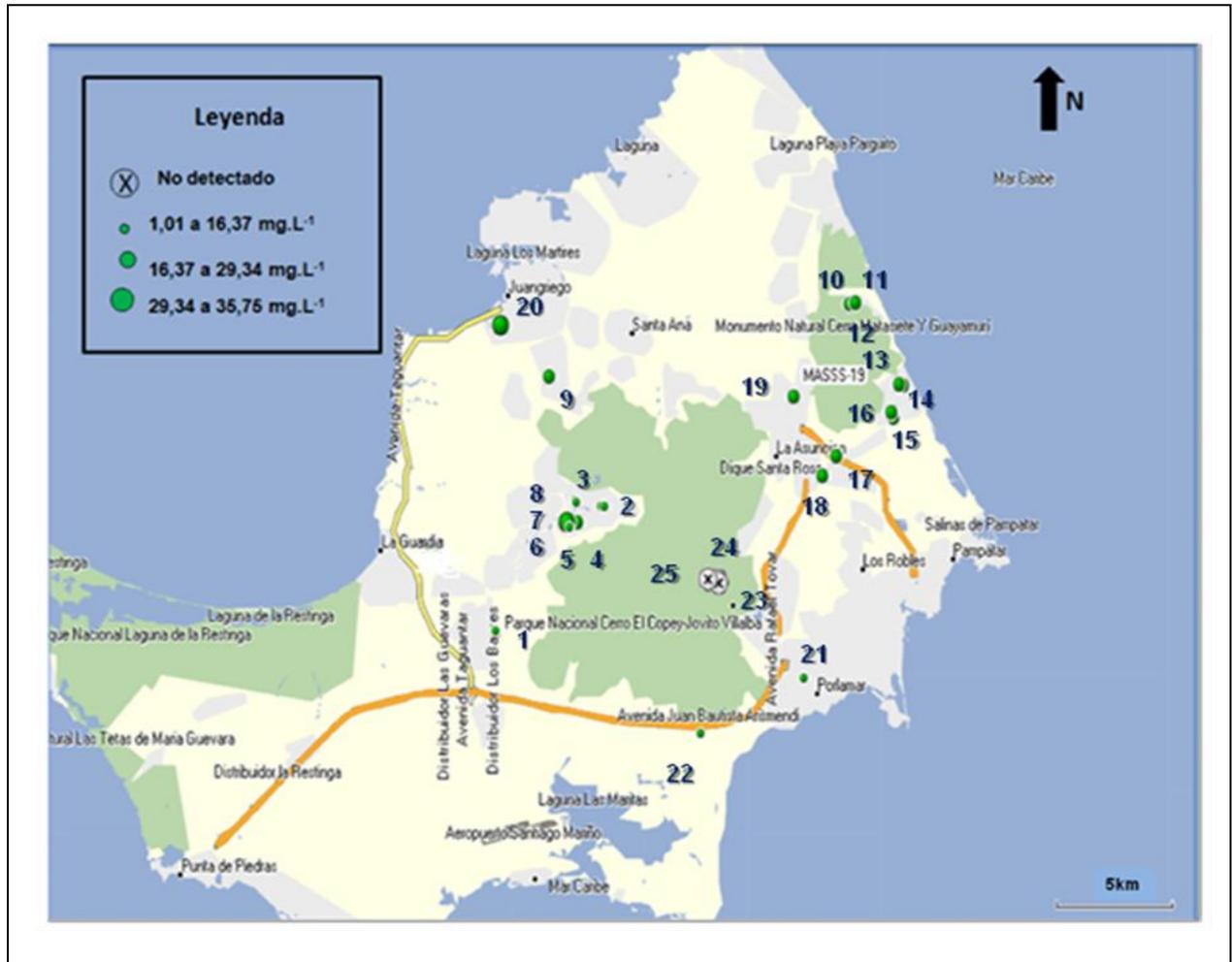
El pH de las aguas naturales, disminuye con el aumento de la cantidad de gas carbónico disuelto mezclado con el ácido carbónico. Por otro lado, una parte del gas carbónico disuelto influye en el equilibrio entre los carbonatos y bicarbonatos. Los bicarbonatos se encuentran, pues, en las aguas ácidas y los carbonatos en las aguas de pH elevado <sup>[46]</sup>. En el apartado IV.2.1.1 se indicó que el 72% de las muestras en la zona de estudio en el presente trabajo de investigación son ligeramente ácidas, lo que efectivamente confirma el favorecimiento de la presencia  $\text{HCO}_3^-$  en dichas aguas. Así mismo, al observar la distribución espacial de esta

especie química en la Figura 26, se tiene que existe una alta concentración de la misma en la mayoría de las muestras.

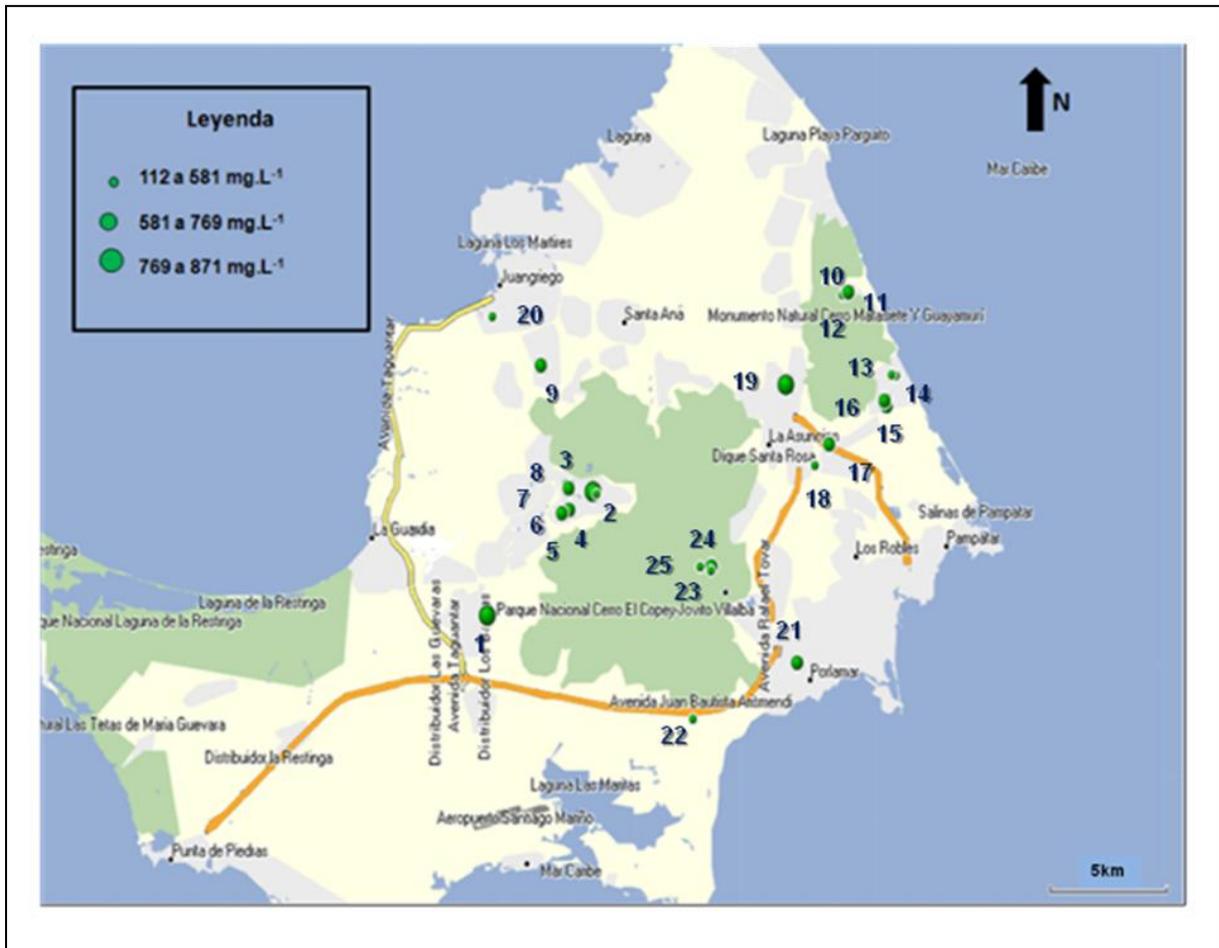
La existencia de grandes cantidades de  $\text{HCO}_3^-$  en las aguas subterráneas debe su presencia al dióxido de carbono procedente de la atmósfera, del suelo y a la disolución de rocas carbonáticas <sup>[45]</sup>.

De acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) el límite máximo permisible para la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  es  $370 \text{ mgL}^{-1}$  para las clases 2 y 3, mientras que para las clases 1 y 4 no está reportado. En función de esto, de las 25 muestras de aguas captadas en el presente estudio, solo el 20% cumple con dicho decreto, mientras que el 80% restante no es apto para los usos establecidos en la tabla 4 para las clases 2 y 3.

En este sentido, trabajos como los realizados por Rodríguez (2000), reporta un valor de fondo de  $\text{HCO}_3^-$  de  $606 \text{ mgL}^{-1}$ ; mientras que, Michel (2006) señala un valor de  $624 \text{ mgL}^{-1}$ . Obsérvese que en ambos casos, los valores son cercanos al obtenido en el presente trabajo de investigación de  $661 \text{ mgL}^{-1}$ .



**Figura 25:** Mapa de distribución espacial del nitrato en la zona de estudio



**Figura 26:** Mapa de distribución espacial del bicarbonato en la zona de estudio

## V. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se interpretan los resultados atendiendo a las facies hidrogeoquímicas identificadas y a la distribución espacial de las mismas, de acuerdo al proceso de evolución geoquímica que experimentan las aguas de la zona sur oriental de la isla de Margarita, Edo. Nueva Esparta, Venezuela; y a los procesos y factores que controlan su composición química.

Para ello, inicialmente fueron construidos el diagrama de Piper y las figuras de Stiff con ayuda del programa para el procesamiento de datos RocksWork 99, para el total de las 25 muestras recolectadas en la zona de estudio. Estos diagramas son útiles en la evaluación y clasificación de las distintas aguas, en función de los cationes y aniones mayoritarios presentes en la más alta proporción. Si se conoce la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) y la ubicación del pozo, se puede establecer o descartar algún proceso de cambio desde la zona de recarga hasta el final de la cuenca, o lo que es lo mismo, establecer una posible evolución geoquímica. <sup>[29]</sup> Esta información viene reforzada con las respectivas relaciones interiónicas, las cuales de una forma aproximada señalan principalmente los probables procesos involucrados en el fenómeno de interacción agua-roca, tales como disolución, precipitación y el intercambio iónico en función de la estequiometría de las reacciones que rigen dichos procesos. <sup>[32]</sup>

De igual manera se presenta en esta sección la clasificación de las aguas de acuerdo a su calidad química atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) así como también los usos asociados de la misma, en función de la calidad establecida.

### V.1 Facies hidrogeoquímicas y su distribución espacial

La representación de los análisis químicos en el diagrama de Piper es mostrado en la Figura 27. Nótese la existencia de una tendencia hacia el enriquecimiento de Cl<sup>-</sup> y

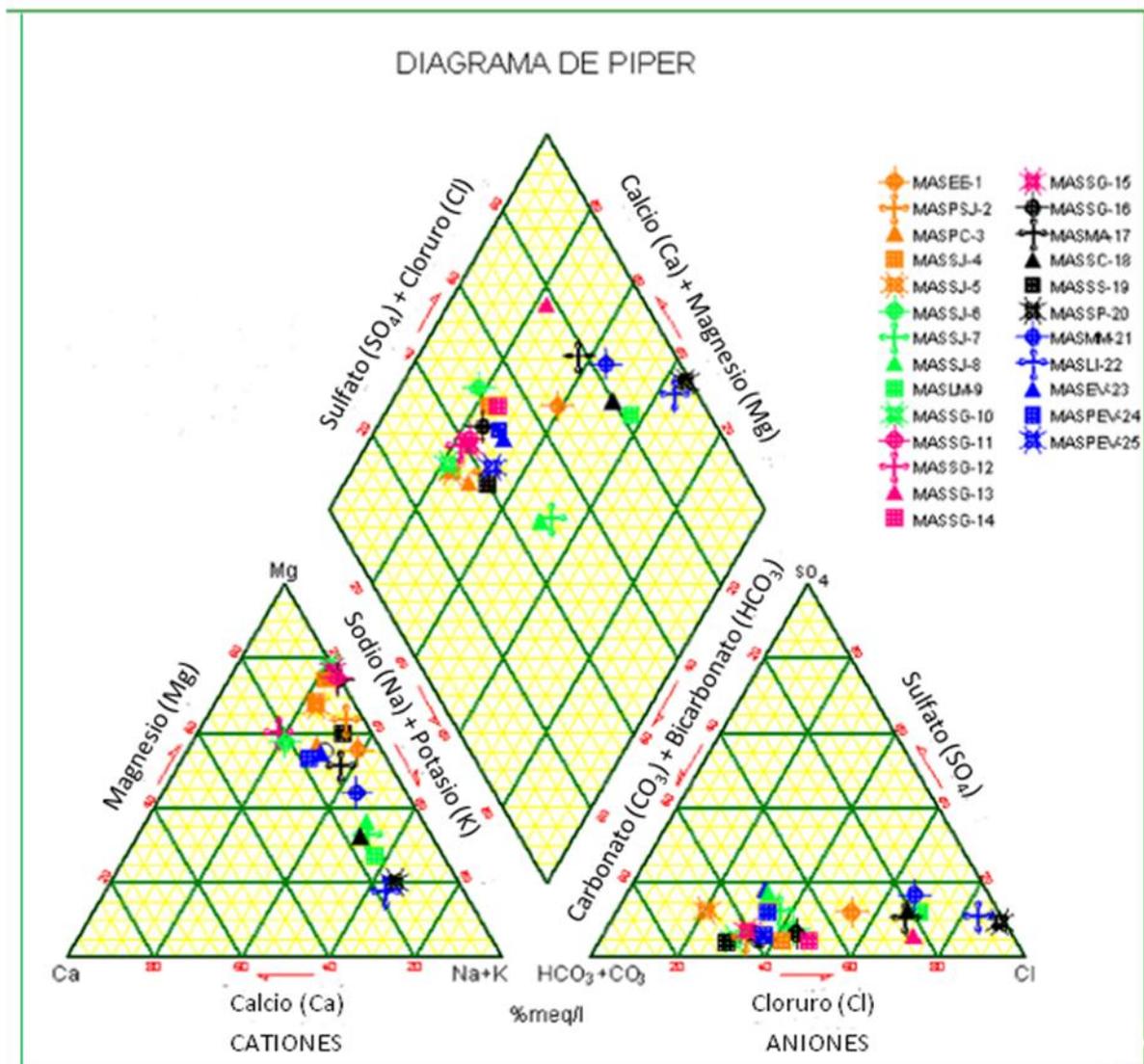
$\text{HCO}_3^-$  con respecto a la composición aniónica en el triángulo derecho; mientras que en el triángulo izquierdo se verifica el enriquecimiento en  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ .

En el mismo orden de ideas, del romboedro central se puede extraer que en la zona sur oriental de la isla de Margarita, predominan cuatro tipos de aguas a saber: bicarbonatadas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ), las cuales representan el 56% de la población total de las muestras correspondiendo a las rotuladas como MASPSJ-2, MASPC-3, MASSJ-4, MASSJ-5, MASSJ-6, MASSG-10, MASSG-11, MASSG-12, MASSG-15, MASSG-16, MASSS-19, MASEV-23, MASPEV-24, MASPEV-25, con una concentración promedio de SDT de  $1161 \text{ mgL}^{-1}$ ; cloruradas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ ), representadas por el 20% de las muestras donde están incluidas las denominadas MASEE-1, MASSG-13, MASSG-14, MASMA-17, MASMM-21, con una concentración promedio de SDT de  $2558 \text{ mgL}^{-1}$ ; cloruradas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ ), representadas por el 16% de las muestras que se corresponde a las indicadas como MASLM-9, MASSC-18, MASSP-20, MASLI-22, con una concentración promedio de SDT de  $11772 \text{ mgL}^{-1}$ ; y bicarbonatadas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ), representadas por el 8% de las muestras que incluyen a las denominadas como MASSJ-7, MASSJ-8, con una concentración promedio de SDT de  $1453 \text{ mgL}^{-1}$ .

En este sentido, estos cuatro grupos de aguas pueden clasificarse dependiendo de su régimen hidrogeoquímico, donde las bicarbonatadas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ) y bicarbonatadas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ) son clasificadas como aguas de recarga de coordinación dinámica, las cuales recién ingresan al ciclo hidrológico y están en proceso de movimiento, enriqueciéndose en  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  por la disolución de minerales ultramáficos y a su vez en  $\text{Na}^+$  como consecuencia del proceso de intercambio iónico con las arcillas de origen marino. <sup>[47]</sup>

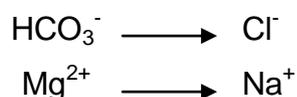
En toda la isla de Margarita, especialmente en la zona oriental, las rocas ultramáficas, en contraste con el sistema montañoso del Caribe en su parte occidental, no forman fajas definidas sino que afloran en una amplia zona distribuidas en la parte sur-central y norte de la isla. <sup>[48]</sup>

Por su parte, las aguas de los tipos cloruradas magnésicas ( $Mg^{2+}-Cl^-$ ) y cloruradas sódicas ( $Na^+-Cl^-$ ) son clasificadas como de régimen estático descoordinado, las cuales son características de aguas antiguas con altas concentraciones de  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $Cl^-$  generadas al final del desarrollo químico y las cuales están siendo activamente mezcladas. [47]



**Figura 27:** Diagrama de Piper para la totalidad de las muestras de agua captadas en la zona sur oriental de la isla de Margarita

En resumen, se tiene que la presencia de estos grupos de aguas permite proponer la existencia de un proceso de evolución hidrogeoquímica, que conlleva al dominio de los iones indicados, de la manera siguiente: <sup>[18]</sup>



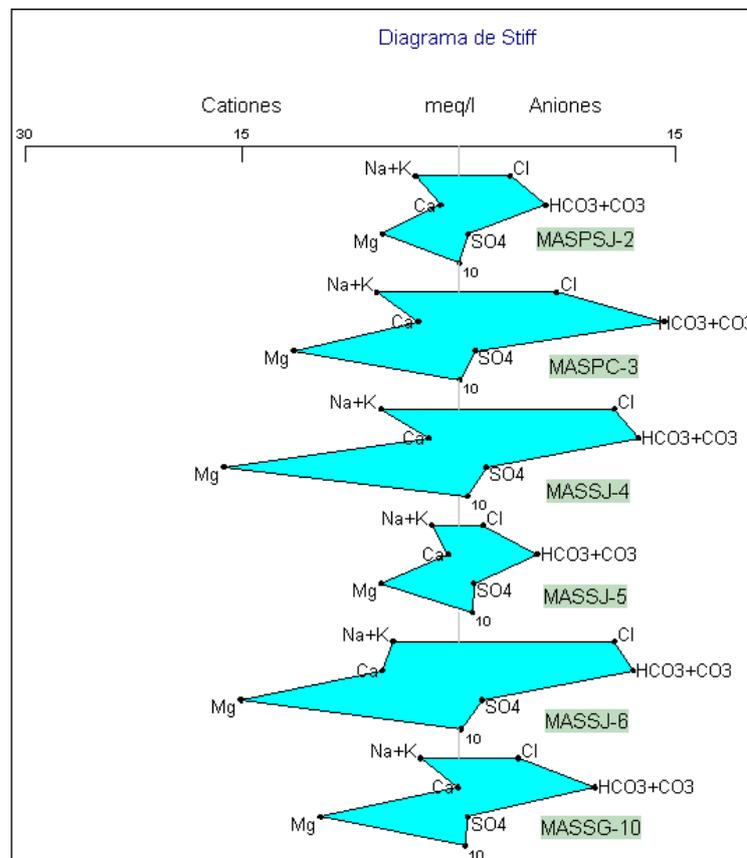
En el mismo orden de ideas, atendiendo a los estudios realizados en la zona Oriental de la isla de Margarita, en función de los tipos de aguas obtenidos a través de los diagramas de Piper correspondientes, Rodríguez (2000) sostiene que los tipos de agua predominantes de la zona son 3, a saber: 48% aguas bicarbonatadas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ), 41% aguas cloruradas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ ) y 11% aguas cloruradas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ ); por su parte, Michel (2006) sostiene que los tipos de agua predominantes en la zona son igualmente 3, a saber: 48% aguas bicarbonatadas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ), 39% cloruradas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ ) y 13% cloruradas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ ).

Nótese que en ambos estudios están presentes tres de los tipos de aguas, que también fueron identificados en el presente trabajo de investigación. Las características químicas de estas aguas, son producto de disolución de minerales, invasión de agua de mar, intercambio iónico con arcillas depositadas en ambiente marino y ciertas actividades antrópicas.

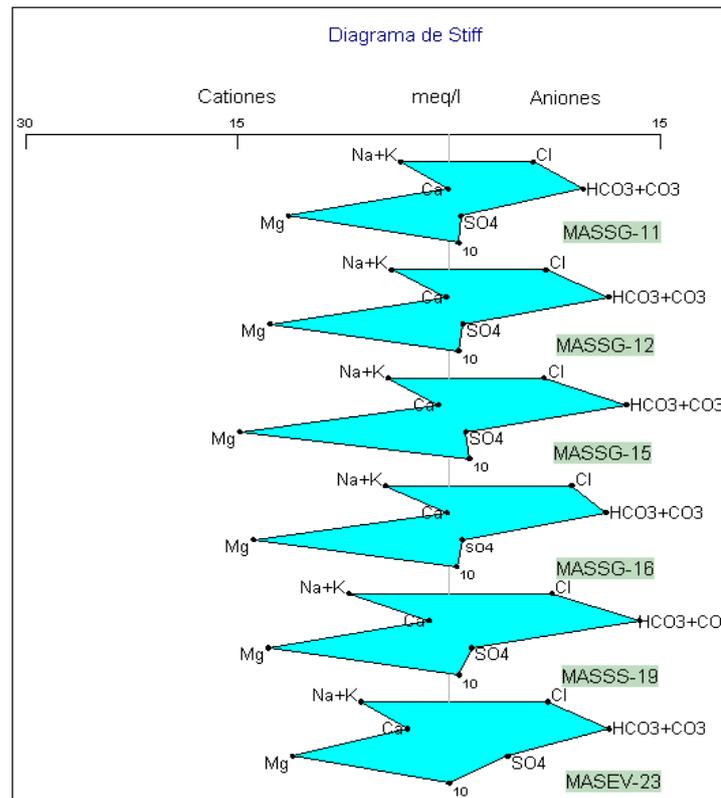
Como complemento a las interpretaciones realizadas, se presentan a continuación las figuras de Stiff para cada una de las muestras de aguas captadas; dichas figuras indican la relativa proporción de los iones mayoritarios en la composición de las aguas <sup>[49]</sup>. La proyección de estos iones en coordenadas, permite la obtención de un polígono el cual según su forma, puede arrojar ideas sobre el o los tipos de aguas presentes en la zona de estudio; así como también, clasificar las aguas de acuerdo a su ambiente de origen; es decir, si son meteóricas o de reciente ingreso al sistema

hidrológico; o marinas, cuya característica primordial es la presencia de un alto contenido de sales.

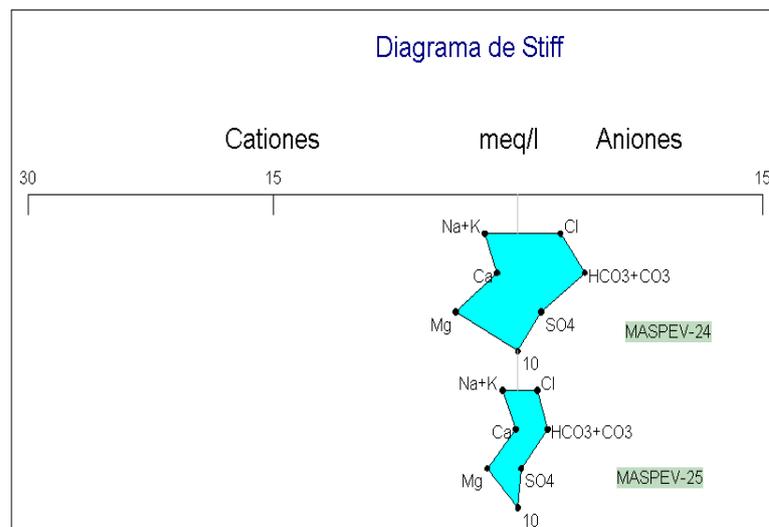
Las figuras de Stiff correspondientes a las muestras MASPSJ-2, MASPC-3, MASSJ-4, MASSJ-5, MASSJ-6, MASSJ-7, MASSJ-8, MASSG-10, MASSG-11, MASSG-12, MASSG-15, MASSG-16, MASSS-19, MASEV-23, MASPEV-24, MASPEV-25, se presentan en las Figuras 28, 29, 30 y 31; las cuales son características de aguas meteóricas y/o mezclas; por su parte, las correspondientes a las muestras MASEE-1, MASLM-9, MASSG-13, MASSG-14, MASMA-17, MASSC-18, MASSP-20, MASMM-21, MASLI-22, se presentan en las Figuras 32 y 33; generan diagramas de Stiff con patrones similares a las aguas marinas.



**Figura 28:** Figuras de Stiff generadas para las muestras MASPSJ-2, MASPC-3, MASSJ-4, MASSJ-5, MASSJ-6 y MASSG-10



**Figura 29:** Figuras de Stiff generadas para las muestras MASSG-11, MASSG-12, MASSG-15, MASSG-16, MASSS-19 y MASEV-23



**Figura 30:** Figuras de Stiff generadas para las muestras MASPEV-24 y MASPEV-25

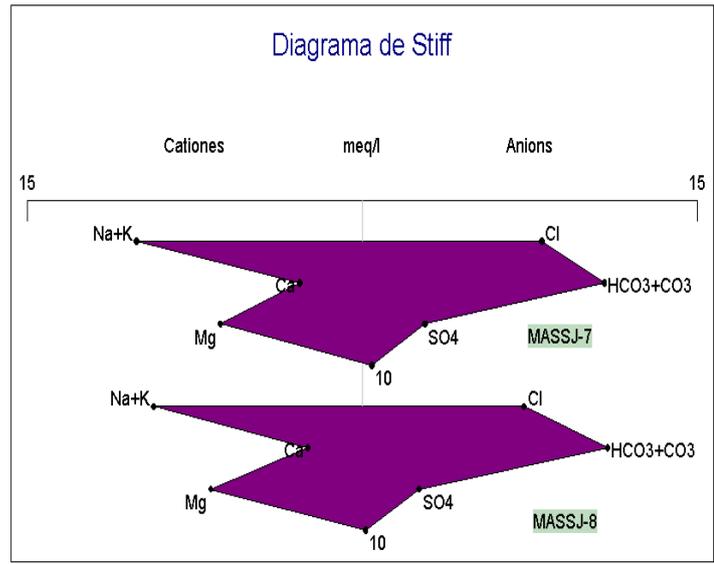


Figura 31: Figuras de Stiff generadas para las muestras MASS-7 y MASSJ-8

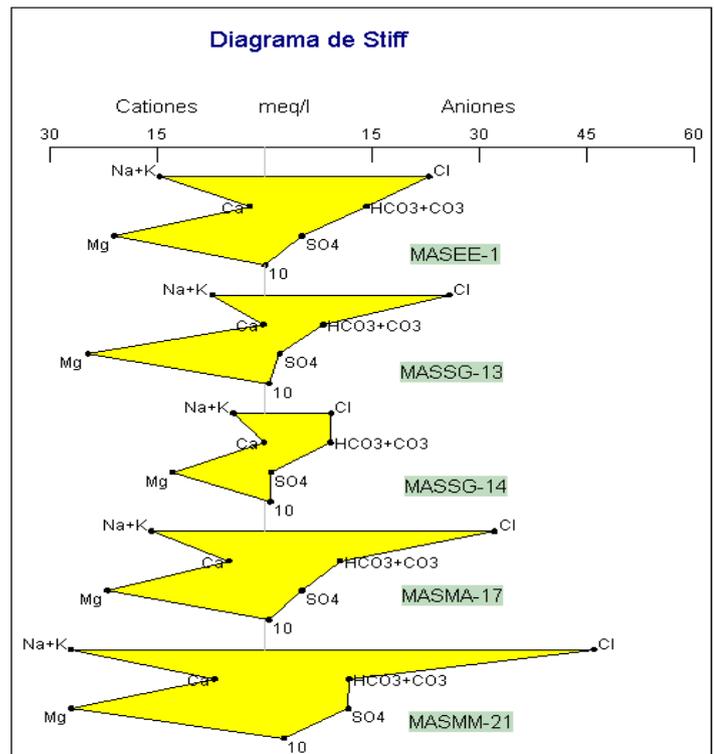
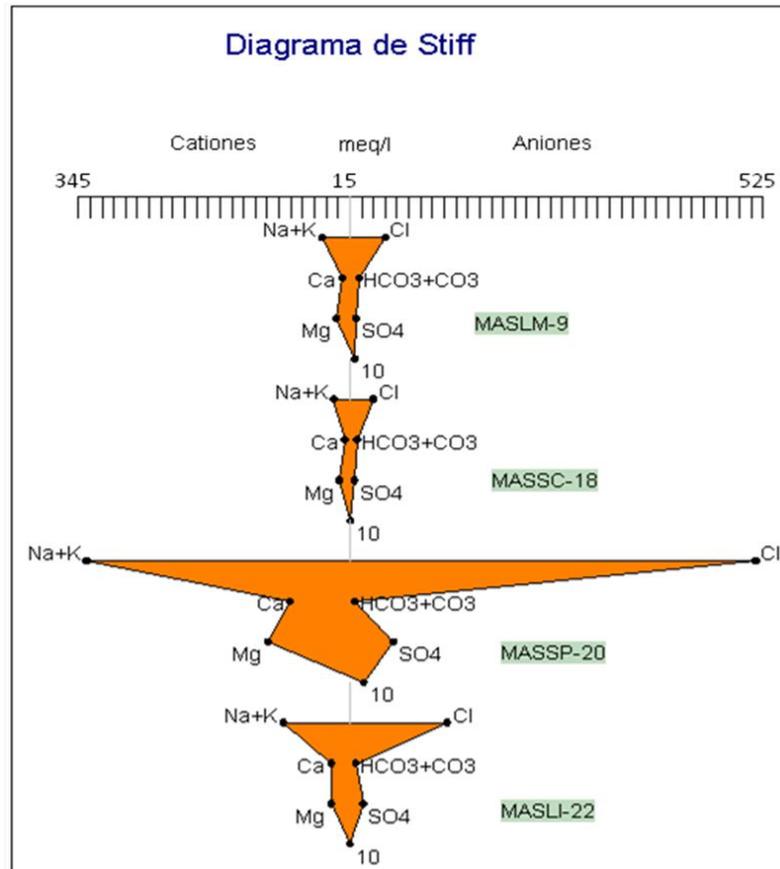


Figura 32: Figuras de Stiff generadas para las muestras MASEE-1, MASSG-13, MASSG-14, MASMA-17, MASMM-21



**Figura 33:** Figuras de Stiff generadas para las muestras MASLM-9, MASSC-18, MASSP-20, MASLI-22

Es importante señalar que las figuras de Stiff construidas, corroboran los tipos de aguas que fueron identificados a través del diagrama de Piper, verificando la presencia en la zona de estudio de 4 tipos de aguas, a saber:  $Mg^{2+}-HCO_3^-$ , las cuales están representadas en las figuras de Stiff de color azul (Figuras 28, 29 y 30);  $Na^+-HCO_3^-$  representadas en las figuras de Stiff de color morado (Figura 31);  $Mg^{2+}-Cl^-$ , identificadas en las figuras de Stiff de color amarillo (Figura 32); y  $Na^+-Cl^-$ , señaladas en las figuras de Stiff de color anaranjado (Figura 33).

En función de lo antes mencionado, es importante señalar que las facies hidrogeoquímicas están íntimamente relacionadas a la distribución espacial de los pozos muestreados. Nótese que al relacionar las figuras de Stiff generadas para

cada una de las muestras y el mapa de la isla de Margarita donde se encuentran ubicados cada uno de los pozos muestreados (apéndice J) en la mayoría de las muestras tomadas lejos de la costa o en las potenciales zonas de recarga, se obtiene un polígono que concuerda con las aguas meteóricas, es decir, aguas recién ingresadas al ciclo hidrológico, mientras que para aquellas que ya están cercanas a la costa, el polígono obtenido es del tipo esperado para aguas marinas, es decir, que tienen una alta concentración de sales.

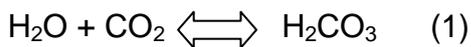
Las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente  $\text{HCO}_3^-$ , seguidamente durante su flujo en el subsuelo predomina el  $\text{SO}_4^{2-}$ , evolucionando posteriormente hacia aguas salinas:  $\text{Cl}^-$ . Atendiendo a lo antes señalado, las muestras están espacialmente ubicadas en función de su evolución en la composición de las aguas y la topografía; es decir, aquellos pozos en zonas altas y lejanas de la costa, tienen bajo contenido de sales y viceversa, al menos que esté gobernando algún efecto local [7].

## V.2 Evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas

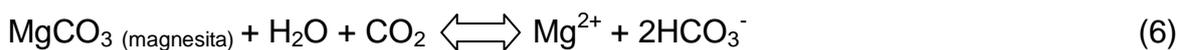
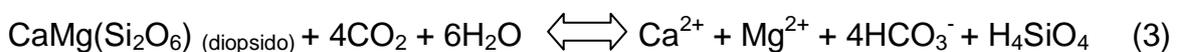
La secuencia evolutiva puede explicarse, desde el punto de vista geoquímico, en función de dos variables, tales como: disponibilidad y solubilidad mineral. Las solubilidades de los minerales que entran en contacto con el agua subterránea a medida que esta fluye, varían en varios órdenes de magnitud. Sin embargo, dependiendo de los minerales con los cuales esté interaccionando el agua durante su historia de flujo, la misma puede tener un contenido ligeramente mayor de SDT que el agua de lluvia o puede incluso llegar a ser más salada que el agua de mar [50]. La formación de las aguas tipo  $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$  es en principio, el resultado de la disolución de los silicatos de  $\text{Mg}^{2+}$  presentes en las rocas ultramáficas y volumétricamente abundantes en la parte oriental de la isla de Margarita. De igual manera, puede haber un importante aporte de  $\text{Mg}^{2+}$  en la hidrólisis de los minerales dolomita y magnesita presente en los mármoles del complejo metamórfico de la isla [32].

El agua meteórica está en contacto con la atmósfera, en ella está presente el  $\text{CO}_2$  en forma disuelta contribuyendo a la concentración de los carbonatos. Así mismo, la acidez del agua en el subsuelo es consecuencia de esta reacción, debido a que en los poros del subsuelo, la concentración del  $\text{CO}_2$  es elevada <sup>[51]</sup>.

El equilibrio del  $\text{CO}_2$  con el agua tanto en la atmósfera como en el subsuelo, es descrito mediante las siguientes reacciones: <sup>[51]</sup>



Estas reacciones son las responsables de controlar el pH de las aguas; de este modo, a pH 6,4 el 50% de la solución es  $\text{H}_2\text{CO}_3$  y el otro 50% esta como  $\text{HCO}_3^-$ ; y a pH 8,2 tan solo el 2,3% de la solución está como  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ; mientras que el 97% es  $\text{HCO}_3^-$ . <sup>[51]</sup> Estas especies aumentan la agresividad del agua favoreciendo la hidrólisis de los silicatos y carbonatos. En las reacciones de disolución de estos minerales intervienen los  $\text{H}^+$ , y la acidez disminuye. Las ecuaciones 3, 4, 5 y 6 describen la hidrólisis de los aluminosilicatos y de los carbonatos. <sup>[51]</sup>



Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que sale al exterior de un río o manantial, pueden transcurrir unos días o miles de años en cuyo caso el recorrido puede ser de unos metros o varios kilómetros. Por tanto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo. <sup>[7]</sup>

En este sentido, este proceso evolutivo continúa hasta alcanzar a las aguas del tipo  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ , sumando a ello, el proceso de mezcla con las aguas marinas que invaden el terreno en forma de cuñas, muchas veces a causa de la sobreexplotación de los pozos, o por su gran profundidad que puede alcanzar la zona de contacto o zona de mezcla agua dulce- agua salada. <sup>[29]</sup> Esta aseveración se realiza por las evidentes anomalías en las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  detectada en alguno de los pozos cercanos a la costa, como es el caso de las muestras MASLM-9, MASSP-20, MAEMM-21, MASLI-22. Por ello y ante cualquier efecto antrópico muy local, el agua puede tener una composición muy diferente a la roca por la que circula.

### **V.2.1 Relaciones iónicas y disolución de sales**

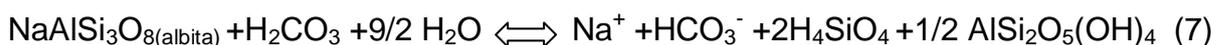
En esta sección se presentan algunas relaciones molares interiónicas a escala logarítmica, que pueden reflejar el o los procesos de disolución de fases minerales susceptibles a la alteración mediante la interacción agua- medio poroso, mezclas con aguas de mar y la suma de otros procesos.

En la Figura 34 se muestra la relación de  $\text{Ca}^{2+}$  contra  $\text{HCO}_3^-$ , nótese que los puntos no siguen la tendencia mostrada para el agua de mar; así mismo, el conjunto de puntos correspondientes a las muestras captadas no presentan una clara dependencia entre sí lo que permite afirmar que la disolución de minerales carbonatados no es la fuente de aporte de  $\text{Ca}^{2+}$  a las muestras estudiadas. No obstante, se puede señalar que el aporte de  $\text{Ca}^{2+}$  podría estar asociado a la hidrólisis de los minerales máficos presentes en las rocas que predominan en la zona de estudio, así como a las aguas marinas que hayan invadido los acuíferos costeros y a probable presencia de aguas fósiles en algunos sectores.

En el mismo orden de ideas, en la Figura 35 se presenta la relación molar de  $\text{Mg}^{2+}$  contra  $\text{HCO}_3^-$ . Nótese que al igual que para la relación anterior, esta relación no sigue el comportamiento para el agua de mar. Sin embargo, se evidencia la

presencia de dos grupos de aguas. El primer grupo probablemente asociado a la disolución de rocas tipo dolomitas, con una dependencia entre ambos elementos; mientras que, el segundo grupo se muestra muy disperso, sugiriendo fuentes diversas de  $Mg^{2+}$  y  $HCO_3^-$  a las aguas estudiadas.

Así mismo, la correlación construida para  $Na^+$  y  $HCO_3^-$  mostrada en la Figura 36, presenta un comportamiento similar que el obtenido para  $Mg^{2+}$ - $HCO_3^-$ . Nótese igualmente la presencia de dos grupos; a saber: un primer grupo, donde existe una dependencia entre ambas especies, lo cual sugiere que parte del  $Na^+$  podría estar asociado al  $HCO_3^-$ ; esto como producto de la disolución de aluminosilicatos como la albita, mineral abundante en los granitos sódicos de la zona oriental de Margarita [32]. La meteorización de aluminosilicatos constituye una fuente importante de  $HCO_3^-$  y  $Na^+$  para las aguas subterráneas; esta puede ser descrita a través de la ecuación 7 [51]; y un segundo grupo que se muestra muy disperso, sugiriendo fuentes diversas de  $Na^+$  y  $HCO_3^-$  a las aguas estudiadas.



En función a la tendencia de la línea correspondiente al agua de mar, mostrada en la Figura 36, no se observa la existencia de asociación alguna, esto apunta a señalar que el aporte de estos elementos a las aguas captadas en el área de estudio, no proviene del agua de mar.

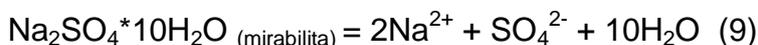
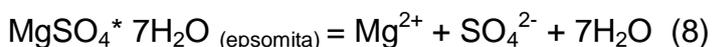
Con respecto a la relación molar entre los iones  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  mostrada en la Figura 37, nótese que la misma presenta una alta dispersión; no obstante, existe un grupo de muestras que se ubican en los alrededores de la línea que se corresponde con la relación del agua de mar, lo que puede estar indicando un posible aporte de  $Mg^{2+}$  por aguas de mar. La dispersión que presenta el grupo de muestras es característica de relaciones con fuentes diversas de aportes de estos iones a las aguas.

En el mismo orden de ideas, en la Figura 38 se presenta la relación molar de  $\text{Na}^+$  contra  $\text{Cl}^-$ , la cual refleja una tendencia bastante positiva con una estrecha relación entre estos iones. Obsérvese que dicha relación, sigue una tendencia muy cercana que la indicada para el agua de mar. Esto permite señalar que ambas especies podrían estar siendo aportadas durante la invasión de aguas marinas, por aguas fósiles o por los aerosoles marinos.

Nótese además en la Figura 38 que la muestra MASSP-20 está casi en el punto correspondiente a los valores de las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  correspondiente al agua de mar, lo que quiere decir que la fuente que aporta estos iones en dicha muestra viene dada por aguas marinas.

Con respecto a las relaciones correspondientes a  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  ambas frente a  $\text{Cl}^-$  (Figuras 39 y 40), presentan una correlación positiva en la mayoría de las muestras de aguas estudiadas, y similares tendencias con respecto al comportamiento para el agua de mar. Este comportamiento puede ser explicado por la posible presencia de cuñas de aguas salinas que introducen  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  al sistema de acuíferos, además de fenómenos de disoluciones de minerales que elevan dichos valores por encima de la tendencia que describe la recta. Nótese además, en la Figura 40, que la muestra MASSP-20 está en el mismo punto correspondiente a los valores de las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua de mar, indicando que la fuente principal de aporte de estos iones viene dada por las aguas marinas recientes o fósiles.

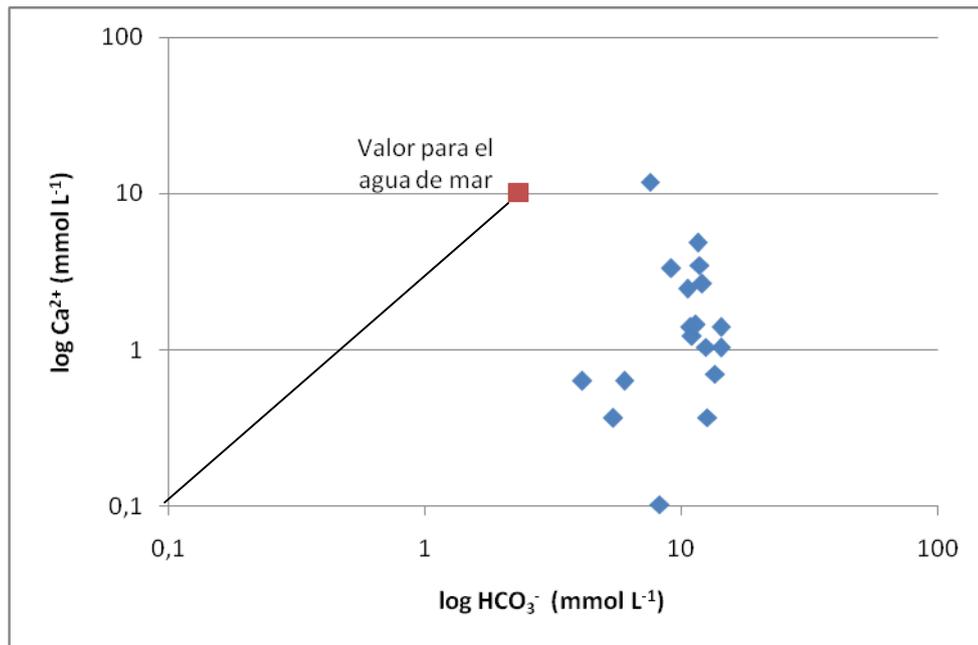
En el mismo orden de ideas, las Figuras 41 y 42 presentan las relaciones de  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  ambas contra  $\text{SO}_4^{2-}$ . Obsérvese que existe una correlación positiva, lo que parece reflejar un importante aporte de  $\text{SO}_4^{2-}$  por la disolución de sales de  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ , tales como la epsomita y mirabilita mostradas en las ecuaciones 9 y 10 <sup>[51]</sup>.



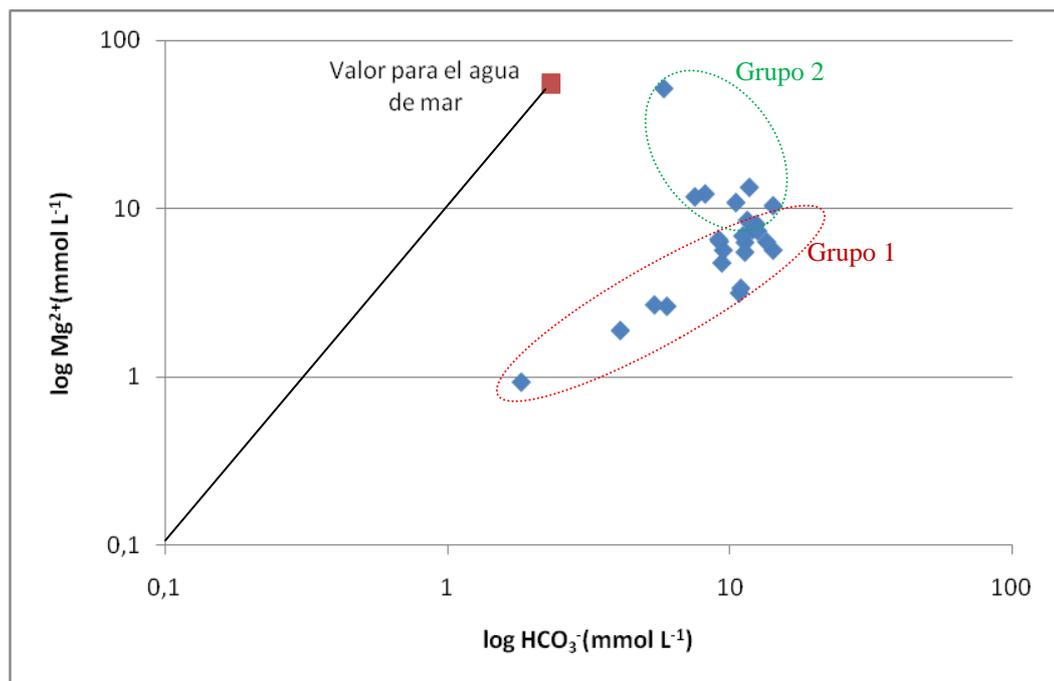
No obstante, debe señalarse que de las relaciones antes señaladas, la correspondiente al  $\text{Mg}^{2+}$  frente al  $\text{SO}_4^{2-}$ , presenta una alta dispersión, indicando que el  $\text{Mg}^{2+}$  puede provenir desde distintas fuentes de aporte.

De igual manera, se hace referencia a la relación que tienen las muestras con la recta correspondiente al agua de mar; esta es más marcada en la Figura 42, donde se puede inferir que parte del aporte de  $\text{SO}_4^{2-}$  al igual que como se mencionó anteriormente, para el  $\text{Na}^+$ , viene dado por las aguas marinas.

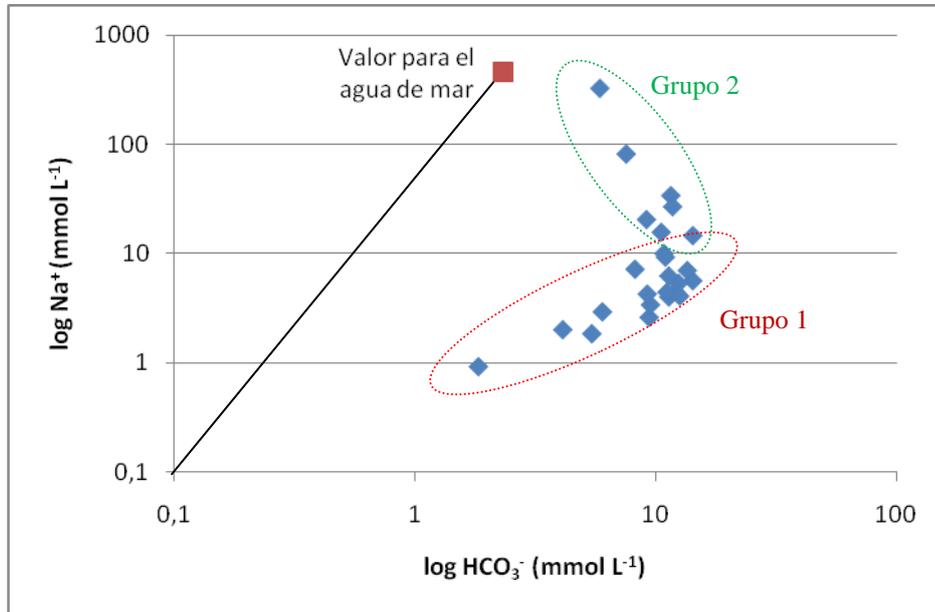
Finalmente, la Figura 43 presenta la relación de  $\text{Ca}^{2+}$  frente a  $\text{SO}_4^{2-}$ ; nótese que existe una buena correlación entre ambas especies, lo cual sugiere que estas aguas pueden estar drenando por litologías que contengan lentes de yeso; también puede confirmar la presencia de rocas de origen basáltico, que contienen sulfuros en su composición mineralógica. Así mismo, se observa en dicha figura la influencia que tiene la intrusión de cuñas salinas en el aporte de estos elementos en las muestras de agua, ya que el conjunto de puntos describe una tendencia similar a la relación constituida para el agua de mar.



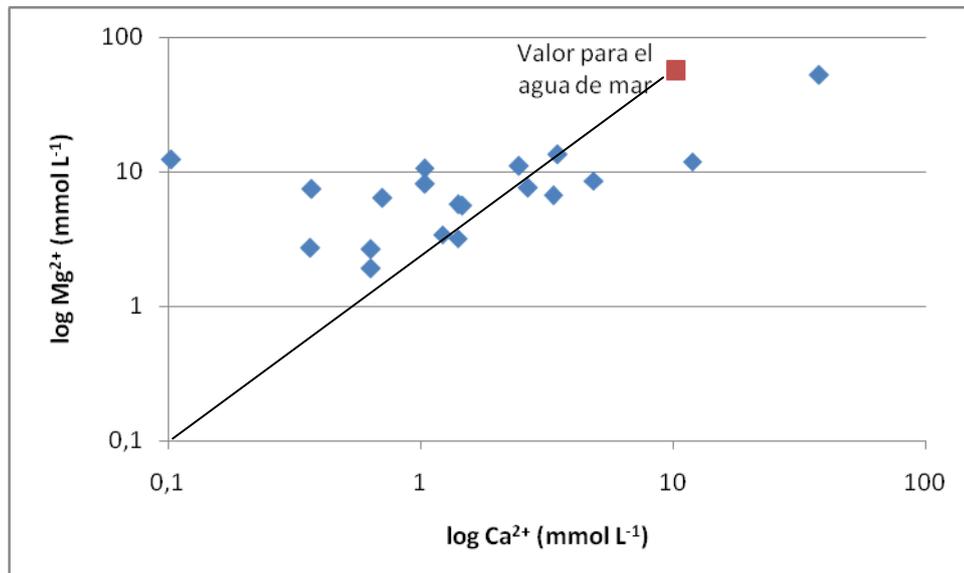
**Figura 34:** Correlación molar  $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$



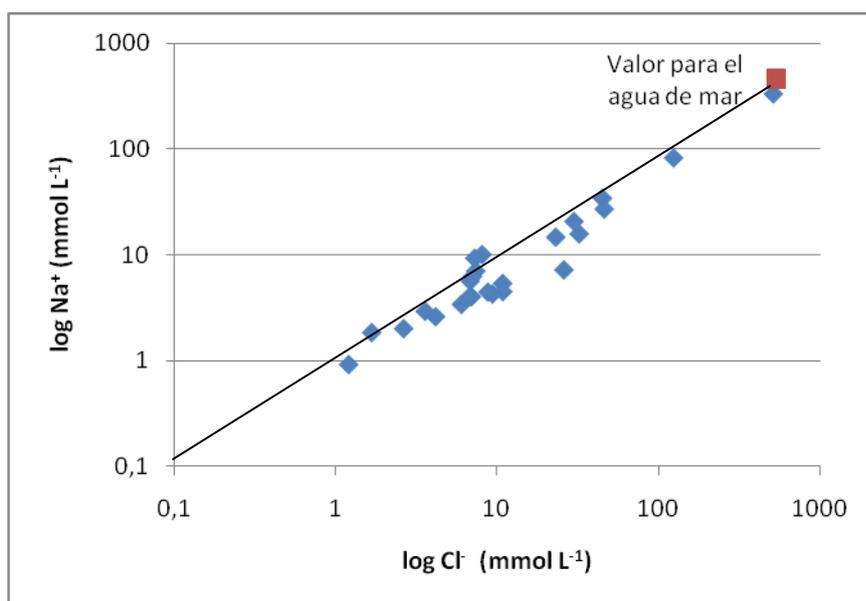
**Figura 35:** Correlación molar  $\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$



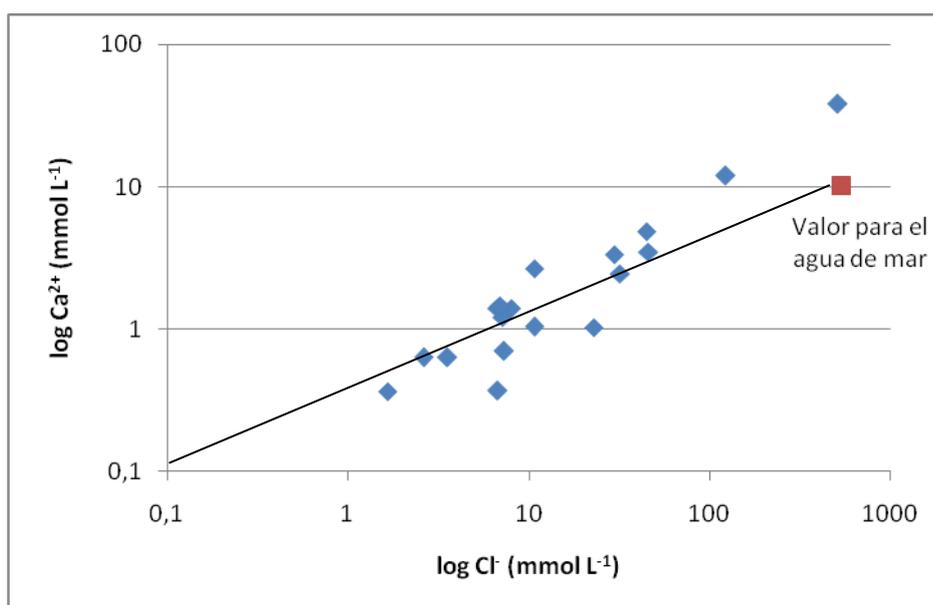
**Figura 36:** Correlación molar  $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$



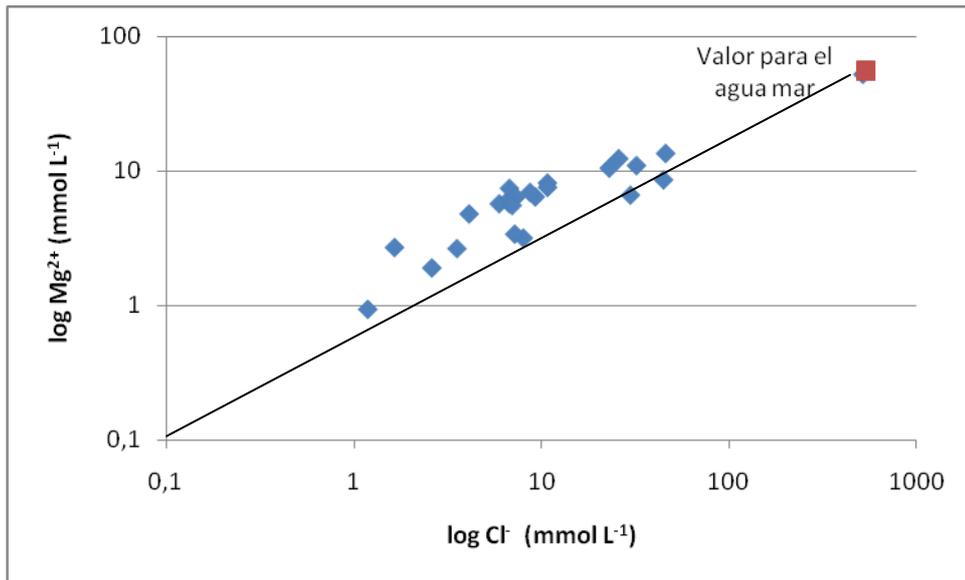
**Figura 37:** Correlación molar  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$



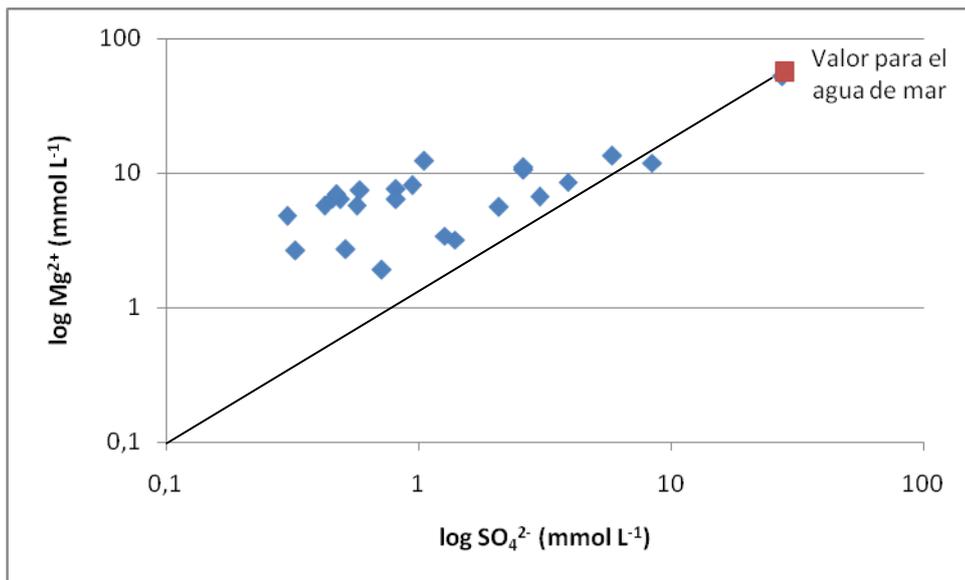
**Figura 38:** Correlación molar  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$



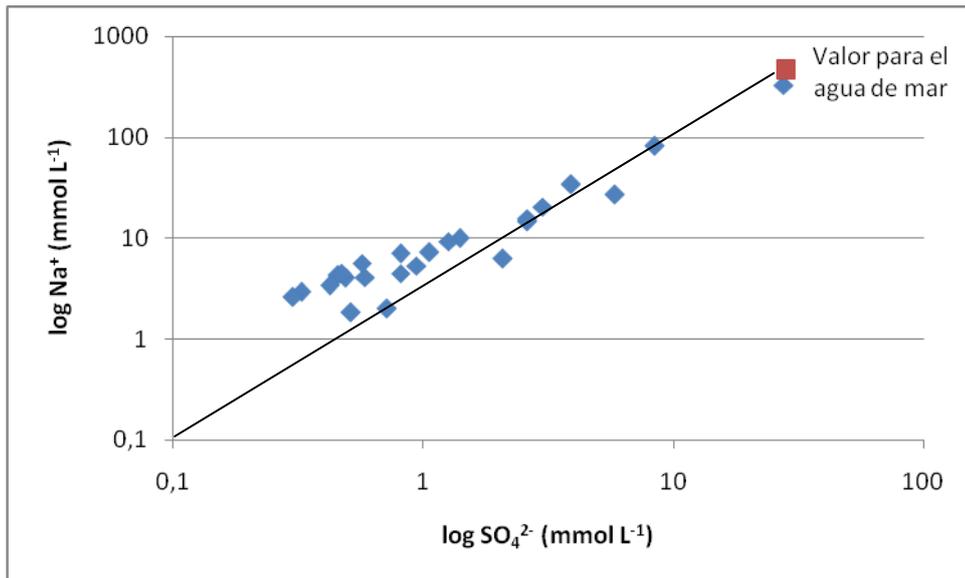
**Figura 39:** Correlación molar  $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$



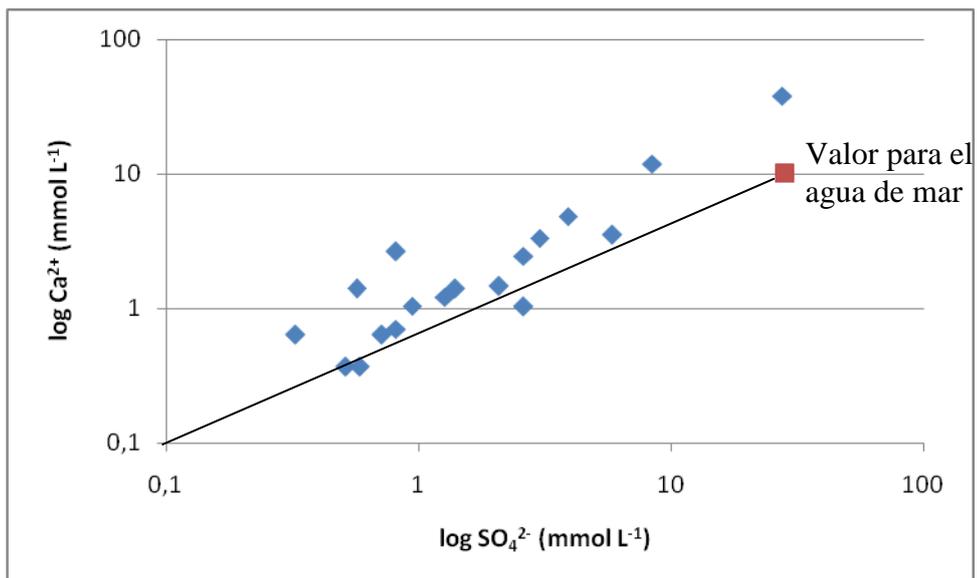
**Figura 40:** Correlación molar  $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$



**Figura 41:** Correlación molar  $\text{Mg}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$

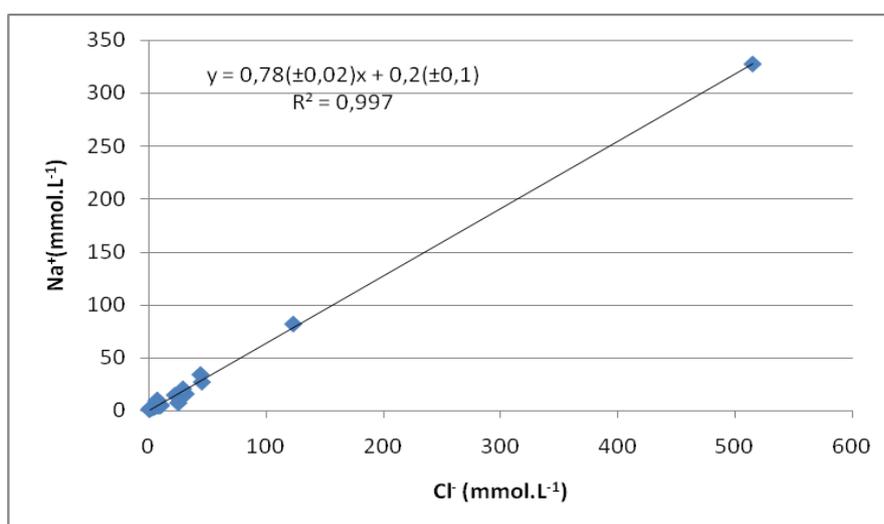


**Figura 42:** Correlación molar  $\text{Na}^+/\text{SO}_4^{2-}$



**Figura 43:** Correlación molar  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$

Por otra parte, en la Figura 44 se presenta la relación  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  a escala no logarítmica donde se reporta el valor de la pendiente de 0,78 unidades, lo cual indica que el aporte de estos iones a las muestras de aguas captadas en la zona de estudio viene dado por el agua de mar, a través del fenómeno de intrusión salina o por la circulación de las aguas por terrenos de formación marina.



**Figura 44:** Correlación  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  (no logarítmica)

En función de lo que se refiere al proceso de evolución hidrogeoquímica de las aguas, es importante resaltar lo referente al modelo de evaporación de las mismas donde inicialmente las aguas, las cuales tienen en su composición química los cationes y aniones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  se evaporan y da como resultado la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ . Por un lado, en una primera ruta si la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  es menor que la alcalinidad, todo el  $\text{Ca}^{2+}$  se elimina de la solución, pero por otro lado, en una segunda ruta si la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  es mayor a la alcalinidad, todas las especies de carbonato se eliminan de la solución y esta última tenderá a contener sulfatos y sales de cloruro. [49]

Siguiendo la primera ruta, la división química siguiente es causada por la precipitación de sepiolita  $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . En este punto, si la concentración

de  $Mg^{2+}$  es menor que la alcalinidad, el agua contendrá  $CO_3^{2-}$  y sales de  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$ ; ahora si la concentración de  $Mg^{2+}$  es mayor que la alcalinidad, la solución tendrá  $SO_4^{2-}$  y sales de cloruro. [49]

Finalmente, siguiendo la segunda ruta, el mineral que probablemente precipite es el yeso  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ . Si la concentración de  $Ca^{2+}$  en este punto, es mayor que la concentración de  $SO_4^{2-}$ , la solución contendrá cloruros de  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ; ahora si la concentración de  $SO_4^{2-}$  es mayor que la de  $Ca^{2+}$ , la solución resultante tendrá  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$  como principales aniones y  $Na^+$  y  $Mg^{2+}$  como principales cationes. [49]

Lo antes expuesto representa un modelo de los diferentes caminos en el que tiene lugar la evolución geoquímica de las aguas en su curso por la corteza terrestre, sirviendo además como apoyo en la explicación de la composición química formada por estas especies en las muestras de aguas captadas en la zona de estudio.

### V.2.2 Intercambio catiónico con arcillas

El fenómeno de intercambio iónico se produce cuando un catión en el agua tiene más fuerza de adsorción y desplaza a otros que estaban adheridos a la arcilla. Los divalentes son adsorbidos más fuertemente que los monovalentes, y dentro de cada grupo los de menor radio iónico. La secuencia de mayor a menor fuerza de adsorción es:  $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ . [7]

Por otra parte, es importante hacer referencia que posiblemente al principio del Cretácico Superior, la isla de Margarita fue sometida a una importante deformación orogénica, intrusión de rocas ultramáficas y metamorfismo. Este episodio estuvo seguido por asentamiento y deposición de clásticos cuarzoso de grano fino, constituyendo condiciones marinas poco profundas. [52]

En este sentido, las aguas subterráneas circulan por este terreno resultando en un incremento de  $Na^+$  y  $Cl^-$  por el lavado del mismo; esto es, toman alcalinos y ceden

los alcalinotérreos produciéndose lo que comúnmente es conocido como un ablandamiento natural de las aguas por el intercambio catiónico ocurrido, el cual viene acompañado de un marcado incremento de la salinidad. [32]

Por lo antes expuesto, puede explicarse el proceso de evolución geoquímica de las aguas, ya que en la mayoría de las muestras tomadas lejos de la zona costera la concentración de  $\text{Na}^+$  es menor debido a que muchas de ellas son aguas meteóricas, las cuales tienen menor tiempo de contacto con el suelo, donde el fenómeno de intercambio catiónico es menor.

### V.2.3 Intrusión marina

El análisis de muestras de aguas subterráneas en zonas donde hay una posible infiltración de agua de mar, deben mostrar una composición química diferente a la de una simple mezcla proporcional entre el agua de mar y el agua dulce. [19]

Para evaluar si existe una posible intrusión salina en un acuífero costero, se emplea el índice  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ . El ión  $\text{Cl}^-$  está presente en bajas concentraciones en las aguas subterráneas lo contrario ocurre con el ión  $\text{HCO}_3^-$ , el cual es el más abundante en aguas subterráneas, pero escaso en el agua de mar [19] (Tabla 1I, apéndice I).

El índice  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  resulta útil en la caracterización de la intrusión marina, ya que en aguas continentales tiene un valor aproximado entre 0,1 y 5 [18]. En función de lo antes expuesto, es de esperarse que las aguas correspondiente a los acuíferos que han sufrido el fenómeno de intrusión marina, presenten un valor de esta relación  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  superior al establecido para las aguas continentales. Dicho índice se presenta a continuación en la Tabla 7, el cual fue calculado para cada una de las muestras de aguas de interés para este estudio:

**Tabla 8.** Índices hidrogeoquímicos correspondiente a la relación  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  para cada una de las muestras representativas de la zona de estudio

Muestra	$\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$
MASEE-1	0,9
MASPSJ-2	0,3
MASPC-3	0,3
MASSJ-4	0,5
MASSJ-5	0,2
MASSJ-6	0,5
MASSJ-7	0,4
MASSJ-8	0,4
MASLM-9	2,2
MASSG-10	0,2
MASSG-11	0,4
MASSG-12	0,4
MASSG-13	2,0
MASSG-14	0,6
MASSG-15	0,3
MASSG-16	0,4
MASMA-17	2,0
MASSC-18	2,0
MASSS-19	0,3
MASSP-20	51,0
MASMM-21	2,3
MASLI-22	10,0
MASEV-23	0,4
MASPEV-24	0,4
MASPEV-25	0,4

Observando cada uno de los índices en la tabla anterior correspondientes a la relación  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  y de acuerdo a lo antes expuesto, se tiene que existe una influencia de intrusión marina para dos de las 25 muestras que representan la totalidad de los puntos muestreados; las cuales son MASSP-20 y MASLI-22; donde ambas presentan un índice significativamente superior al intervalo establecido para las aguas continentales. Es importante señalar que ambas se encuentran ubicadas en una zona muy cercana al límite costero teniendo mayor cercanía al mismo la muestra MASSP-20. Esto ocurre debido a que en la naturaleza se establece un equilibrio entre el agua dulce y el agua salada; cuando este equilibrio se rompe, el

agua salada invade el acuífero elevando el nivel de sales en las aguas y por esta razón, estas muestras presentan una alta concentración de sales, resaltando principalmente las altas concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  los cuales son los iones mas predominantes. Así mismo, evaluando los índices en la misma tabla, para el resto de las muestras, podría descartarse la influencia de una intrusión marina hacia el acuífero, ya que ninguno de estos índices sobrepasa el intervalo establecido para las aguas continentales.

#### **V.2.4 Influencia de la actividad antrópica en la calidad de las aguas**

La influencia de las actividades antrópicas a través de vertiginoso crecimiento demográfico de una región en particular frecuentemente conlleva al aumento en el consumo de agua con fines potables, de riego e industriales, trayendo como consecuencia el agotamiento y la contaminación de los cuerpos de aguas y la sobreexplotación de los acuíferos. Esto ocasiona el deterioro de la calidad de los reservorios de agua y de una reducción de los volúmenes de agua del acuífero, abatimiento de sus niveles, hundimiento del terreno y la intrusión de agua de mar en las zonas costeras; así como el surgimiento de enfermedades en plantas, animales y humanos <sup>[53]</sup>.

La economía de la isla de Margarita se fundamenta en el turismo, comercio e industria, sectores que a su vez han ayudado al crecimiento de otros como la construcción y el transporte. La labor agrícola es escasa, así como la explotación de minerales, pero con la expansión de la demanda local se ha reactivado la pesca y la agricultura extensiva, que ha crecido tanto en producción como en empleo <sup>[37]</sup>.

En función de lo antes expuesto, en la zona sur oriental de la isla de Margarita, existen diversos sectores donde es común el trabajo agrícola, e industrial los cuales están relacionados con los lugares donde fueron tomadas muestras de interés para este estudio.

La acumulación de  $\text{NO}_3^-$  en el agua tiene varias causas como la fertilización, la existencia de fuentes biogénicas humanas por defecto en redes cloacales y/o de fuentes biogénicas animales y/o industriales [54].

Las condiciones áridas crean flujos de irrigación, los cuales tienden a enriquecerse en algunos componentes químicos debido a los procesos de evapotranspiración, disolución y precipitación mineral, dilución de fertilizantes y a los residuos agrícolas e industriales; específicamente los fertilizantes son lixiviados por el exceso de agua introduciendo grandes cantidades de N al sistema de aguas subterráneas [17].

Bajo las condiciones oxidantes que existen en la zona no saturada y saturada del acuífero, el N es transformado en  $\text{NO}_3^-$  por el proceso de nitrificación el cual se observa en la ecuación 11[17].



En este sentido, el intervalo promedio de concentración de  $\text{NO}_3^-$  para las aguas naturales es 10-20  $\text{mgL}^{-1}$  [32], de acuerdo a los resultados de este estudio, el 52% de las muestras presentan concentraciones superiores a dicho intervalo (tabla 2A, apéndice A) lo cual afirma que existe una infiltración de esta especie hacia las aguas subterráneas, trayendo esto como consecuencia que no se pueda dar uso potable a las mismas ya que las altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  traen problemas en la salud. En el mapa que se encuentra en el apéndice J, se puede observar la ubicación de estas muestras que presentaron concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  superiores al intervalo establecido para aguas naturales.

### V.3 Calidad química de las aguas subterráneas y usos asociados

Atendiendo la normativa contenida en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), se tiene que existe un límite máximo permisible en los cuerpos de agua para la concentración de SDT en el país, dicho límite está asociado a los diferentes tipos de aguas según la clase que presentan, así como también para los usos asociados a las mismas (Tablas 4 y 5, apartado II.6). Evaluando dicho parámetro en cada una de las muestras de interés en el presente trabajo de investigación, se tiene que el 68% de las muestras de aguas que incluye a las rotuladas como MASEE-1, MASPC-3, MASSJ-4, MASSJ-6, MASSJ-7, MASSJ-8, MASLM-9, MASSG-13, MASSG-15, MASSG-16, MASMA-17, MASSC-18, MASSS-19, MASSP-20, MASMM-21, MASLI-22, MASEV-23, sobrepasan dicho límite trayendo como consecuencia que se incluyan dentro del tipo de agua clase 4 donde los usos asociados que éstas presentan se puede observar en la Tabla 4 que son armonía paisajística; comercio y navegación industrial. Por su parte, el 32% de las muestras constituidas por MASPSJ-2, MASSJ-5, MASSG-10, MASSG-11, MASSG-12, MASSG-14, MASPEV-24, MASPEV-25 presentan una concentración menor al límite establecido en el citado Decreto, por lo que son aguas del tipo correspondiente a las tres primeras clases, donde sus usos asociados igualmente se pueden observar en la tabla 4 del presente trabajo de investigación; entre los cuales están uso doméstico, protección de las comunidades hidrobiológicas, recreación de contacto total y de segundo contacto, uso agrícola, entre otros. La concentración de los SDT para cada una de las muestras se puede observar en la tabla 2A del apéndice A.

Es importante acotar que de acuerdo al último censo realizado en el país para el año 2011, el estado Nueva Esparta cuenta con un total de 490.494 habitantes, de los cuales más del 90% habitan la zona oriental de la isla de Margarita <sup>[55]</sup>; esto hace notar que en la isla existe una gran demanda de agua para consumo humano, y más aún para esta zona, en particular en épocas de vacaciones. Debido a ello se puede señalar que este trabajo de investigación sirve como base para que se tomen en cuenta los pozos aptos para el consumo humano, como se estableció anteriormente

y de esta manera poder tener otras fuentes de agua para surtir a la población y disminuir el déficit ya existente.

## VI. CONCLUSIONES

- 1- Las metodologías utilizadas para la validación de resultados fueron acertadas, sin embargo, aunque la relación de conductividad ideal contra la conductividad de campo no sea exactamente la unidad, se tiene que estas variaciones de la linealidad están sujetas a que existen valores de conductividad muy elevados ( $>400 \mu\text{Scm}^{-1}$ ), lo que favorece a la saturación del electrodo.
- 2- En la zona sur oriental de la isla de Margarita predominan cuatro tipos de aguas, a saber: bicarbonatadas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ) representando el 56% de las muestras, cloruradas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ ) representando el 20% de las muestras, cloruradas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ ) representando el 16% de las muestras y bicarbonatadas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ) representando el 8% de las muestras.
- 3- En la zona de estudio las aguas evolucionan desde bicarbonatada magnésica a clorurada sódica, estando ello en concordancia con lo esperado en relación con la evolución geoquímica para las aguas.
- 4- De acuerdo con la concentración de los SDT en las muestras, se estableció la clasificación del 76% de ellas como salobres, el 20% como frescas o dulces y el 4% como salinas.
- 5- Los índices  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  calculados para cada una de las muestras, pone en evidencia que las aguas representadas por las muestras MASSP-20 y MASLI-22, sufren una posible influencia de intrusión marina.
- 6- Existe una relación entre la calidad química de las aguas subterráneas y la topografía de la zona en estudio; es decir, a medida que los pozos se encuentran en las zonas altas del área, el contenido de sales es menor, debido a que son aguas recién incluidas en el ciclo hidrológico, mientras que

aquellos pozos de las zonas bajas o zonas de descarga se encuentran afectados por tener mayor tiempo de interacción agua-roca, y por ende mayor cantidad de sales disueltas. Estos pozos lejanos a la zona de recarga, mayormente cercanos a la costa, tienen la influencia de mezcla con agua de mar.

- 7- En atención al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) en cuanto a los valores de SDT para la calidad química de las aguas subterráneas, se puede señalar que el 68% de las muestras presentan una calidad aceptable; mientras que el 32% restante pertenecen a las tres primeras clases, las cuales son: excelente, muy buena y buena.
- 8- La calidad química de las muestras pertenecientes a aguas superficiales es mucho mejor que las de las aguas subterráneas, teniendo las superficiales el menor contenido de SDT que el resto de las muestras y entrando así en la clasificación de las aguas como excelentes según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).
- 9- Los principales fenómenos que controlan las características de las aguas en la zona de estudio son: la disolución de minerales máficos, mezclas con aguas marinas fósiles, intrusiones marinas y actividades antrópicas.

## VII. RECOMENDACIONES

- 1- Realizar un estudio de los elementos traza como Mn, Sr, B, Fe, Ni, entre otros en toda la zona de estudio, con el fin de conocer en qué concentraciones están presentes estas especies en las aguas y conocer en qué grado están afectando la calidad química de las mismas.
- 2- Poner en marcha un estudio en la zona sur oriental de la isla de Margarita, donde exista un mayor número de muestras de aguas subterráneas recolectadas, con el fin de establecer con más detalle, probables procesos y factores que controlan la composición química de las mismas.
- 3- Realizar un estudio isotópico en las aguas de la zona, para así de esta manera establecer el origen de las aguas subterráneas, para verificar si se trata de aguas meteóricas, marinas recientes o fósiles.
- 4- La posibilidad de intrusión marina en otros acuíferos de aguas dulces situados cercanos a la costa, puede hacer incrementar la salinidad de las aguas subterráneas, dejando inútiles amplias zonas acuíferas, dañando los cultivos y reduciendo las reservas hidráulicas. Es necesario tomar medidas preventivas y formular proyectos para la desalinización de las aguas.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Campos, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Editorial Universitaria Potosina. Tercera edición. México, 326p.

[2] Gaceta Oficial N° 5021, Decreto Presidencial 883, 1995, Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Sub-Comisión de Aguas, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales.

[3] Keith, D. (1973). *Hidrología: Agua Subterránea*. Editorial Paraninfo, Madrid, España, 371p.

[4] López, J., Navarrete, P., Moreno, L., Garrido, E. (1998). *Calidad Química y Contaminación de las Aguas Subterráneas en España, período 1982-1993*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid. 451p.

[5] Porras, J., Nieto, P., y Calvín J. (1979). *Aguas Subterráneas: Contaminación Urbana, Industrial y Agrícola*. Editorial CIFCA, Madrid, 23p.

[6] Kramer F. (2003). *Educación Ambiental para el desarrollo sostenible*. Edición Fuencarral. Madrid. 151p.

[7] Sánchez F. J. (2005) *Evolución geoquímica de las aguas subterráneas*. Universidad de Salamanca. 6p. Disponible: <http://web.usal.es/javisan/hidro>. Fecha de consulta: 12/11/2011.

[8] Winter. T. C., Harvey J. W., Franke O. L., and Alley W. M. (2010). *Ground Water and Surface Water a single resource*. U.S. Geological Survey. Disponible: <http://pubs.water.usgs.gov/cir1139>. Fecha de Consulta: 12/11/2011.

- [9] Martínez P. E., Martínez P., y Castaño S. (2005). *Fundamentos de Hidrología*. Editorial Mundi-Prensa, Madrid, España. 77p.
- [10] Prando R. (1996). *Manual de Gestión de la Calidad Ambiental*. Editorial Piedra Santa, S.A. Guatemala, 184p.
- [11] Lagger J., et al. (2000). *La importancia de la Calidad del Agua en la producción lechera*. Argentina: Facultad de Ciencias Veterinarias. Vol. 17 354 p.
- [12] Jiménez B. (2001). *La Contaminación Ambiental en México: Causas, Efectos y Tecnología apropiada*. Editorial Limusa. México, 926p.
- [13] Calderón P. (2009). *Caracterización Hidroquímica de las Aguas Subterráneas de la cuenca del río Itata*. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Chile. 121p.
- [14] Jin Z., Chen Y., Wang F., and Ogura N. (2004). *Detection of nitrate source in urban groundwater by isotopic and chemical indicators*, Hangzhou City, China. *Environmental Geology* 45 p.
- [15] Porras, J., et al. (1985). *Calidad y Contaminación de las Aguas Subterráneas en España*. Instituto Geológico y Minero de España. (I.G.M.E).
- [16] Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the characteristics of natural water*. U.S. Geological Survey. Washington, 363 p.
- [17] Cardona, A., Carrillo J., Huizar R., and Graniel E. (2004). *Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, México*. *Environmental Geology*. 45 p.

[18] Custodio, E. y Llamas, M. (1976). *Hidrología Subterránea*. Edición Omega, S.A. Barcelona, España, 2359 p.

[19] Todd D. (1973) *Hidrología (Agua subterránea)*. Paraninfo, Madrid 326 p.

[20] Tarbuck E; Lutgens F (1999) *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física*. Prentice Hall, Madrid 259 p.

[21] Collins A. (1975) *Geochemistry of oilfield Waters*. Elsevier Scientific. Amstendarm. Holanda. 496 p.

[22] Causapé J. (2003). *Calidad de los ríos Riquel y Arba. Influencia del regadío de Bardenas y modelización geoquímica del sistema en Zaragoza, España*. Servicio de investigación Agroalimentaria y Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente. 58 p.

[23] Jalali, M. (2005). *Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran*. *Geology Environment*, 47 p.

[24] Sherif, M., El Mahmoudi, A., Garamoon, H., Kacimov, A., Akram, S., Ebraheem, A. And Shetty, A. (2006). *Geoelectrical and hydrogeochemical studies for delineating seawater intrusion in the outlet of Wadi Ham, UAE*. *Environmental Geology*, 536 p.

[25] Anshumali, A., and Ramanathan E. (2007). *Seasonal variation in the major ion chemistry of Pandoh Lake, Mandi District, Himachal Pradesh, India*. *Applied Geochemistry*. 22 p.

[26] Chen A., Lin C., Lu W., Zhu L., Wu Y. Li J. (2007). *Well water contaminated by acidic mine water from the Dabaoshan Mine, South China: Chemistry and toxicity*. *Chemosphere*. 70 p.

- [27] Muñoz, L., Rubio, G., y Enrique, C. (2011). *El Embalse de Mequinenza: caracterización del agua y del entorno*. Proyecto fin de carrera, Escuela de Ingeniería Técnica Industrial, Universidad de Zaragoza, España. 135p.
- [28] Vargas, M. (1997). *Estudio preliminar de las características hidrogeológicas de la isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela*. Trabajo de Ascenso, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas. 107 p.
- [29] Rodríguez, D. (2000). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la zona Fuente Paraguachí, isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 157 p.
- [30] Corsi, J., (2006). *Estudio de los procesos hidrogeoquímicos que controlan la composición de las aguas subterráneas de la cuenca Pedro González, estado Nueva Esparta, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 90 p.
- [31] D'Elia, K. (2006). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la cuenca Santa Ana, isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 81 p.
- [32] Michel, J. (2006). *Estudio de la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la cuenca Fuente Paraguachí, isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 126 p.
- [33] Gamboa, N. (2007). *Estudio Hidrogeoquímico y Geofísico en el sector La Cabrera, carretera vieja Ocumare-Charallave, estado Miranda, Venezuela*. Trabajo

Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 141 p.

**[34]** Faublack, A. (2008). *Estudio Hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de los sectores Barbacoas, estado Aragua y Cachamas, estado Guárico, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 109 p.

**[35]** Jiménez, J. (2009). *Factores y Procesos que determinan la calidad química de las Aguas Subterráneas del sector Sur-Central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. 110 p.

**[36]** Blanco, L. (2011). *Estudio Hidrogeoquímico de la cuenca del río Caucagua, estado Miranda*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. 113 p.

**[37]** Clima, Relieve, Vegetación y Economía de Margarita, Nueva Esparta-Venezuela, (2010). Disponible: [www.isla-margarita24.com](http://www.isla-margarita24.com). Fecha de consulta: 27/11/2011.

**[38]** Consejo de desarrollo científico y humanístico. Universidad Central de Venezuela, (2007). Disponible: [www.venezuelaparatodos.wordpress.com](http://www.venezuelaparatodos.wordpress.com). Fecha de consulta: 11/01/2012.

**[39]** American Public Health Association, APHA (1995). *Standard Methods of Examination of Water and Wastewater*. Washington, 20<sup>th</sup> Edition.

**[40]** Marín, M. (2002). *Análisis Químico de Suelos y Aguas*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España. 174 p.

- [41] Montero, R. (1996) Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas asociadas a zonas de explotación de hidrocarburos. Universidad Central de Venezuela. 172 p.
- [42] Reinman, C., Filzmoser, P. and Garrett, R. (2005) Background and Threshold: critical comparison of methods of determination. Science of the total environment. Vol 346. 16 p.
- [43] Yanes, C. (1997) Estudio geoquímico regional de los ríos del Escudo de Guayana. Tesis Doctoral. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias y Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, 199 p.
- [44] Mason, M. and Moore, C. (1982) Principles of Geochemistry. Fourth Edition. Wiley and Sons. New York, USA. 344 p.
- [45] Davies, S. y De Wiest, R. (1971) Hidrogeología. Ediciones Ariel. Barcelona, España. 563 p.
- [46] Pimienta, J. (1980) La captación de aguas subterráneas. 2<sup>da</sup> Edición. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona, España. 196 p.
- [47] Adams, S., Titus, R., Pietersen, K., Tredoux, G. and Harris, C. (2001) Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. Journal of Hydrology. Vol. 241. 103 p.
- [48] Hargraves, R., Hess, H. and Maxwell, J. (1949) Geological Reconnaissance of the Island of Margarita, Geol. Soc. Amer. Bull. Vol. 60. 1868 p.
- [49] Drever, J. (1997) The geochemistry of natural waters. Prentice Hall, New Jersey, USA. 437 p.

**[50]** Freeze, A. and Cherry, J. (1979) Groundwater. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 286 p.

**[51]** Fetter, C (1994) Applied Hidrogeology. Third Edition. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, USA. 370 p.

**[52]** Taylor, G. (1960) Geología de la isla de Margarita, Venezuela. III Congreso Geológico Venezolano, Tomo II. 893 p.

**[53]** Rao, N. (2006) Seasonal variation of groundwater quality in a part of Guntur fistrict, Andhra Pradesh, India. Environmental Geology. Vol 49. 429 p.

**[54]** Ruda, E. , Mongiello, A. y Acosta, A. (2004) Contaminación y salud del suelo. Ediciones UNL, Santa Fe, Argentina. 62 p.

**[55]** Sol de Margarita. Resultados, último ceso nacional (2012). Disponible: [www.elsoldemargarita.com.ve](http://www.elsoldemargarita.com.ve). Fecha de consulta: 24/08/2012.

**[56]** Miller, J. N. y Miller, J. C. (2002) Estadística y Quimiometría para química analítica. Pearson Educación, S.A. 4<sup>ta</sup> Edición. Madrid, España. 296 p.

**[57]** Cravotta, C. (1986) Spatial and Temporal Variations of groundwater chemistry in the vicinity of carbonate-hosted zinc-lead occurrences, Sinking Valley, Blair Country, Pennsylvania State University. 810 p.

**[58]** Langmuir, D. (1997). Aqueos Enviromental Geochemistry. Prentice Hall. Colorado School of Mines, USA. 294 p.

## **APÉNDICES**

## **APÉNDICE A**

- 1- Localización, profundidad y parámetros fisicoquímicos medidos en campo de los pozos muestreados

### Datos recopilados y generados en el estudio

**Tabla 1A** Datos de localidad, ubicación geográfica, profundidad, pH, conductividad y temperatura de los pozos muestreados, recopilados durante la etapa de campo

Muestra	Localidad	UTM Este	UTM Norte	Latitud	Longitud	Prof. (m)	pH	Cond. ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	T (°C)
MASEE-1	Los Peñones	393367	1213518	10°58'57"	63°58'56"	27	6,9	3700	29,8
MASPSJ-2*	San Juan B.	397988	1217827	11°00'89"	63°56'03"	NC	7,8	1001	30,4
MASPC-3	Punta Cují	397841	1217784	11°00'89"	63°56'11"	NC	6,9	1901	29,4
MASSJ-4	San Juan B.	396809	1217173	11°00'56"	63°56'68"	73	6,7	2363	31,6
MASSJ-5	San Juan B.	396397	1217159	11°00'55"	63°56'90"	50	7,4	820	31,7
MASSJ-6	San Juan B.	396502	1217061	11°00'50"	63°56'84"	46	6,8	2312	31,1
MASSJ-7	San Juan B.	396783	1217949	11°01'01"	63°56'71"	NC	6,9	1961	29,6
MASSJ-8	San Juan B.	396792	1217920	11°00'96"	63°56'69"	NC	6,8	1877	29,8
MASLM-9	Los Millanes	395632	1222180	11°03'27"	63°57'33"	47	7,0	6240	30,9
MASSG-10	Guarame	408396	1224618	11°04'62"	63°50'32"	87	7,4	1297	27,9
MASSG-11	Guarame	408377	1224634	11°04'63"	63°50'33"	96	7,2	1524	28,5
MASSG-12	Guarame	408611	1224673	11°04'65"	63°50'20"	40	7,0	1706	29,0
MASSG-13	Sabana de Guacuco	410627	1221834	11°03'11"	63°49'09"	46	6,9	3410	31,8
MASSG-14	Sabana de Guacuco	410447	1221863	11°03'13"	63°49'19"	62	7,1	1779	31,8
MASSG-15	Sabana de Guacuco	410210	1220725	11°02'51"	63°49'32"	41	6,8	1881	30,4
MASSG-16	Sabana de Guacuco	410126	1220910	11°02'61"	63°49'37"	60	6,9	1866	31,5
MASMA-17	Guayamurí	407787	1219414	11°01'79"	63°50'65"	NC	6,5	4390	30,5
MASCC-18	Palo Sano	407198	1218739	11°01'43"	63°50'97"	NC	6,7	4210	31,6
MASSS-19	Salamanca	405988	1221461	11°02'90"	63°51'64"	NC	6,8	2009	29,2
MASSP-20	Pedregal	393613	1223930	11°04'22"	63°58'44"	50	6,5	46000	30,6
MASMM-21	Porlamar	406411	1211859	10°57'69"	63°51'39"	80	6,9	6050	30,0
MASLI-22	La Islita II	402032	1209974	10°56'66"	63°53'80"	50	6,6	13280	31,4
MASEV-23	El Valle	402806	1215202	10°59'50"	63°53'38"	NC	6,7	1981	27,8
MASPEV-24*	El Valle	402804	1215108	10°59'45"	63°53'38"	NC	7,4	760	25,9
MASPEV-25*	El Valle	402350	1215245	10°59'52"	63°53'63"	NC	7,6	329	24,5

Cond.: Conductividad

Prof.: Profundidad

NC: No conocida

\*: Muestra de agua superficial

## **APÉNDICE B**

- 1- Parámetros de la estadística descriptiva calculados en las réplicas de la muestra MASEE-1

### Precisión de los análisis

**Tabla 1B** Parámetros de la estadística descriptiva calculados para 3 réplicas de la muestra MASEE-1 para determinar la precisión de los análisis

<b>Especie Química</b>	<b>Promedio (X) (mgL<sup>-1</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (S) (mgL<sup>-1</sup>)</b>	<b>Porcentaje error relativo (Sr) (%)</b>	<b>CV (%)</b>	<b>LC<sub>95%</sub>(mgL<sup>-1</sup>)</b>
Na <sup>+</sup>	336	2	1	0,5	4
K <sup>+</sup>	1,36	0,02	3	2	0,05
Ca <sup>2+</sup>	41,4	0,2	1	0,6	0,6
Mg <sup>2+</sup>	255	2	2	0,7	4
Cl <sup>-</sup>	814,6	0,8	0,2	0,1	1,9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250	1	1	0,6	3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,05	0,08	5	2	0,19
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	871	2	0,6	0,3	6
SiO <sub>2</sub>	26,45	0,04	0,3	1	0,11

## APÉNDICE C

- 1- Condiciones experimentales de los análisis de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  mediante la técnica de Espectrometría de Emisión y Absorción Atómica
- 2- Condiciones experimentales de los análisis de los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  mediante la técnica de Cromatografía Iónica
- 3- Condiciones experimentales de los análisis de la sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) por la técnica de Espectrometría de Absorción Molecular en el UV-Visible.
- 4- Soluciones madre para la elaboración de curvas de calibración de las especies catiónicas y aniónicas.

### Condiciones experimentales de los análisis

**Tabla 1C** Condiciones experimentales de análisis por Espectrometría de Absorción y Emisión Atómica con llama

Elemento	Equipo	Longitud de onda ( $\lambda$ ) (nm)	Ancho de Rendija (nm)	Combustible
Na	AAAnalyst 200	589,0	0,2-0,4	Acetileno/Aire
K	AAAnalyst 200	766,5	0,2-0,4	Acetileno/Aire
Ca	AAAnalyst 200	422,7	0,7	Acetileno
Mg	AAAnalyst 200	202,6	0,7	Acetileno/Aire

**Tabla 2C** Condiciones experimentales de análisis por Cromatografía Iónica

<b>Equipo</b>	Cromatógrafo Iónico. Dionex DX-100
<b>Velocidad de flujo (<math>\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}</math>)</b>	0,8
<b>Presión de la columna</b>	1854-1868
<b>Fase móvil</b>	Carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )1,8mM/ Bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ )1,7mM
<b>Detector</b>	Conductividad
<b>Polaridad</b>	+
<b>Atenuación</b>	100 ( $\text{Cl}^-$ ), 30 ( $\text{NO}_3^-$ ), 30 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )
<b>Tiempo de retención (minutos)</b>	1,027 ( $\text{Cl}^-$ ), 1,775 ( $\text{NO}_3^-$ ), 3,252 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

**Tabla 3C** Condiciones experimentales de análisis por Espectrometría de absorción molecular en el UV-Vis

Elemento	Equipo	Longitud de onda ( $\lambda$ ) (nm)
Si	Spectronic 20. Bausch & Lomb	680

**Tabla 4C** Reactivos utilizados para la preparación de las soluciones madres para la preparación de los patrones para la construcción de las curvas de calibración.

	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>
<b>Reactivo</b>	NaCl	KCl	CaCO <sub>3</sub>	Mg metálico	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaNO <sub>3</sub>
<b>Marca</b>	Merck	Riedel- de Haen	Merck	Merck	Merck	Baker Analyzed	AnalaR
<b>Pureza</b>	99,5%	99,5%	99%	99,9%	99,5%	99,7%	99,5%

## **APÉNDICE D**

- 1- Método para la determinación de Si en agua mediante la técnica de Espectrometría de Absorción Molecular en el UV-Visible.

**Descripción del método empleado para la determinación de sílice disuelta (SiO<sub>2</sub>) mediante la técnica de fotolorimetría** <sup>[39]</sup>.

**1- Preparación de la muestra**

- Se añadió una alícuota de la muestra en un balón de 100 ml de tal forma que al realizar la formación del complejo y llevar a volumen, la concentración de Si estuviese en un intervalo entre 0.7 y 1.5 mgL<sup>-1</sup> de Si. Luego se acidificó con 1 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.25 M, marca Riedel-de Haen.
- Se agregó 5 ml de una solución de Molibdato de Amonio al 5 % P/P marca Certified A.C.S con 99,9% de pureza, se esperó 10 minutos para la formación del complejo, la solución se tornó amarilla.
- Se agregó 5 ml de una solución de Acido Oxálico al 10 % P/P, marca Seelze-Hannover con 99,5% de pureza.
- Se añadió 3 ml de una solución reductora de Sulfato ferroso amoniacal (sal de Mohr) al 0.25 % P/P marca AnalaR con 99% de pureza, cambió la solución a color a azul.
- Se aforó con agua desionizada.
- Se dejó reposar la solución por 20 minutos aproximadamente.
- Se preparó un blanco realizando el mismo procedimiento antes descrito, pero sin añadir la muestra.

**2- Preparación de las soluciones patrón**

La curva de calibración, se realizó en un intervalo de 0 – 2 mgL<sup>-1</sup> realizando el siguiente procedimiento:

- En 5 balones de 100 ml se añadió una alícuota de una solución de Si de 40mgL<sup>-1</sup> en cada uno, de tal manera que cubriera el rango de 0 – 2 mgL<sup>-1</sup>.

- Para la formación del complejo se siguieron los mismos pasos que se realizaron para la preparación de la muestra, desde acidificar con el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hasta añadir la solución reductora de sal de Mohr.

### **3- Determinación de la longitud de onda de máxima absorción.**

Para la determinación del máximo de absorción se realizaron mediciones de la absorbancia del patrón intermedio de la curva en un rango de 550 a 800 nm con intervalos de 20 nm cada medición. Luego se realizó una grafica de Absorbancia en función de longitud de onda y se determinó la longitud de onda de máxima absorción, la cual fue de 680 nm.

- 4-** Se determinó finalmente la absorbancia de las soluciones patrones y de las muestras a la longitud de onda determinada en el paso anterior (680nm).

## **APÉNDICE E**

- 1- Ecuaciones utilizadas para determinar la precisión de los análisis para las especies químicas en estudio
- 2- Cálculo del límite de confianza y límite de detección

**Ecuaciones utilizadas para determinar la precisión de los análisis, cálculo del límite de detección y límite de confianza para las especies químicas en estudio**<sup>[56]</sup>.

E.1- Ecuaciones utilizadas para determinar la precisión de los análisis para las especies químicas en estudio

$$X = \sum X_i / N$$

$$S^2 = (\sum (X_i - X)^2) / (N - 1)$$

$$Sr\% = (2S/X) * 100$$

$$CV = (S/X) * 100$$

Donde:

X= promedio

X<sub>i</sub>= concentración de las especies químicas

N= número de muestras

S= desviación estándar

Sr%= desviación estándar relativa porcentual

CV= coeficiente de varianza

E.2- Límite de confianza y límite de detección

E.2.1- Límite de confianza

Los límites de confianza de la media vienen dados por:

$$\bar{X} \pm t_{n-1} S / \sqrt{n}$$

El subíndice (n-1) indica que t depende de esta cantidad, que se conoce como el número de grados de libertad; el valor de t depende también del grado de confianza requerido. Para el caso de este estudio se considera el 95% de confianza.

## E2.2- Límite de detección

A continuación se presenta las ecuaciones utilizadas para determinar el límite de detección de cada una de las especies químicas estudiadas:

$$S_m = S_b + 3 S_a$$

Donde:

$S_m$  = mínima señal analítica

$S_b$  = intercepto de la recta de regresión

$S_a$  = desviación estándar del intercepto (con 95% de confianza)

Luego se sustituyo  $S_m$  en la siguiente ecuación:

$$LD = \frac{S_m - S_b}{m}$$

Donde: LD = límite de detección

$m$  = pendiente

## APÉNDICE F

- 1- Datos del balance de carga, conductividad ideal y conductividad de campo
- 2- Cálculo de la conductividad teórica ideal
- 3- Cálculo del error relativo en el balance de carga

### **Datos y Ecuaciones del balance de carga**

**Tabla 1F** Datos del balance de carga: sumatoria de cationes y aniones, % de error del balance de carga, conductividad ideal calculada y conductividad medida en campo

<b>Muestra</b>	<b>Cationes (meqL<sup>-1</sup>)</b>	<b>Aniones (meqL<sup>-1</sup>)</b>	<b>%BC</b>	<b>Conductividad ideal (uScm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Conductividad de campo (uScm<sup>-1</sup>)</b>
MASEE-1	37,73	42,51	6	5136	3700
MASPSJ-2	9,58	10,22	3	1242	1001
MASPC-3	19,94	22,23	5	2632	1901
MASSJ-4	23,80	25,47	3	3236	2363
MASSJ-5	8,02	8,68	4	1123	820
MASSJ-6	25,00	24,60	1	3242	2312
MASSJ-7	19,27	21,91	6	2676	1961
MASSJ-8	18,57	20,83	6	2620	1877
MASLM-9	62,32	64,62	2	8176	6240
MASSG-10	12,31	14,39	8	1655	1297
MASSG-11	14,95	16,75	6	2032	1524
MASSG-12	16,95	19,63	7	2341	1706
MASSG-13	32,17	36,54	6	4549	3410
MASSG-14	17,24	19,90	7	2410	1779
MASSG-15	19,95	20,91	2	2625	1881
MASSG-16	18,52	21,14	7	2587	1866
MASMA-17	42,61	48,25	6	6113	4390
MASSC-18	40,59	45,36	6	5767	4210
MASSS-19	21,31	22,94	4	2840	2009
MASSP-20	515,15	577,39	6	71450	46000
MASMM-21	61,03	69,67	7	8496	6050
MASLI-22	132,08	148,43	6	18545	13280
MASEV-23	20,32	22,51	5	2897	1981
MASPEV-24	7,12	8,16	7	1092	760
MASPEV-25	2,95	3,22	4	513	329

### F.1- Cálculo de la conductividad teórica ideal <sup>[41]</sup>.

La conductividad ideal de una solución a 25°C, es considerada como la resultante de las contribuciones aditivas de los componentes iónicos y las conductividades equivalentes iónicas.

La misma se calcula como la sumatoria del producto del ión por su conductividad:

Considerando solo la contribución de los cationes, la conductividad ideal se calcula según la siguiente ecuación:

$$\text{Cond.ideal catiónica}(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}) = \sum(\text{cationes}\cdot u_0) + [((e^{-\text{pH}})^*1000)*349,8]$$

Tomando en cuenta solo la contribución aniónica, la conductividad ideal obedece a la siguiente ecuación:

$$\text{Cond.ideal aniónica}(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}) = \sum(\text{aniones}\cdot u_0)$$

Finalmente, la conductividad ideal total a 25°C es:

$$\text{Cond.ideal a 25°C}(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}) = \text{Cond.ideal catiónica} + \text{Cond.ideal aniónica}$$

Donde los aniones y cationes representan las concentraciones totales determinadas para los iones en ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), y  $u_0$  es la conductividad iónica específica equivalente de cada especie expresada en  $(\mu\text{S}\cdot\text{L})\cdot(\text{cm}\cdot\text{mg})^{-1}$  a 25°C.

**Tabla 2F** Conductividades equivalentes de los iones en solución acuosa a 25°C <sup>[57]</sup>.

Especie iónica	Conductividad a 25°C $((\mu\text{SL})\cdot(\text{cmmg})^{-1})$
Ca <sup>2+</sup>	3,00
Mg <sup>2+</sup>	4,34
Na <sup>+</sup>	2,17
K <sup>+</sup>	1,89
Cl <sup>-</sup>	2,14
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,74
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,67
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,15

## F.2- Cálculo del balance de carga <sup>[41]</sup>.

El balance de carga es calculado con la siguiente ecuación:

$$\%BC = [(\Sigma^+ - \Sigma^-) / (\Sigma^+ + \Sigma^-)] * 100$$

Donde  $\Sigma^+$  y  $\Sigma^-$  son la sumatoria de las concentraciones de las especies catiónicas y aniónicas respectivamente, expresadas en miliequivalentes por litro (meq.L<sup>-1</sup>).

## **APÉNDICE G**

- 1- Ecuaciones para determinar el error de la pendiente y del punto de corte

**Cálculo del error de la pendiente y del punto de corte de las curvas de calibración de las especies químicas determinadas** <sup>[56]</sup>.

Los errores aleatorios en los valores de la pendiente y ordenada en el origen son importantes, considerándose las ecuaciones utilizadas para calcularlos. En primer lugar se calcula el estadístico  $S_{y/x}$ , que estima los errores aleatorios en la dirección Y.

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}}$$

Donde:

$\hat{Y}_i$ : puntos sobre la recta de regresión calculada correspondiente a los valores individuales de x.

$Y_i$ : valores individuales de Y en la recta

n-2: número de grados de libertad

Una vez obtenido un valor de  $S_{y/x}$  se puede calcular  $S_b$  y  $S_a$ , las desviaciones estándar de la pendiente (b) y ordenada en el origen (a). Estas vienen dadas por:

$$S_b = \frac{S_{y/x}}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2}} \quad \text{y} \quad S_a = S_{y/x} * \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{n * \sum (X_i - \bar{X})^2}}$$

Donde:

$\bar{X}$  = promedio de los valores individuales de x

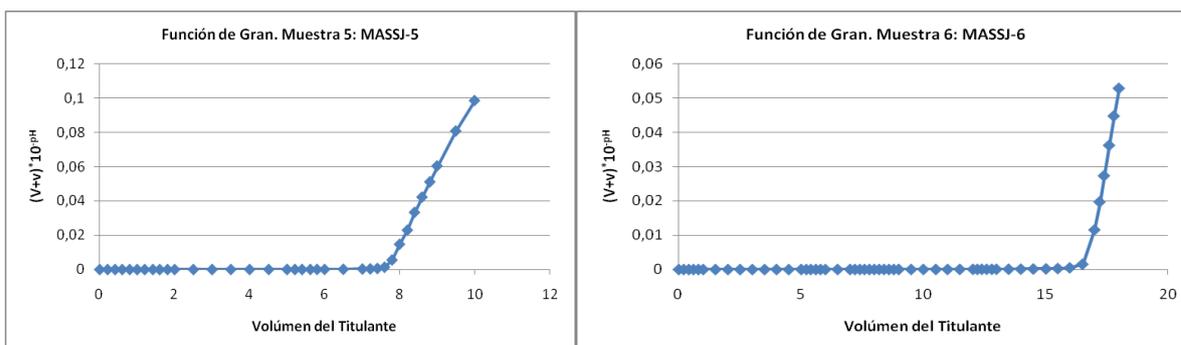
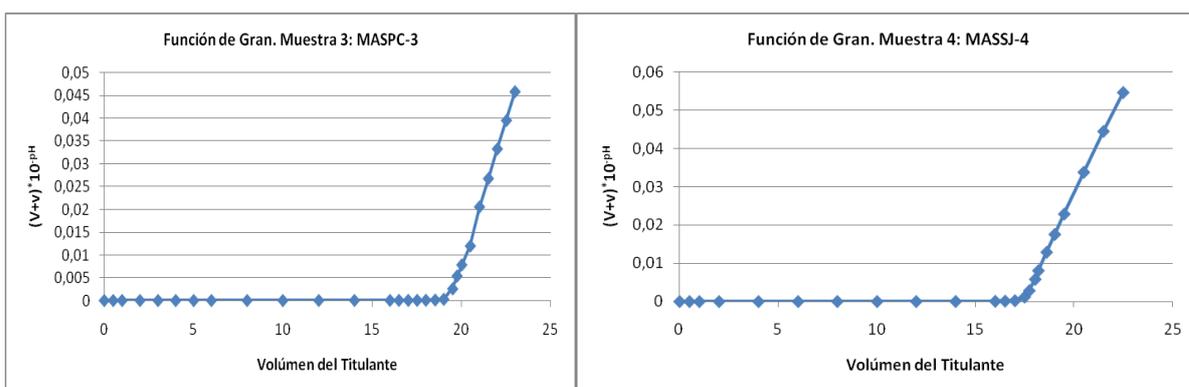
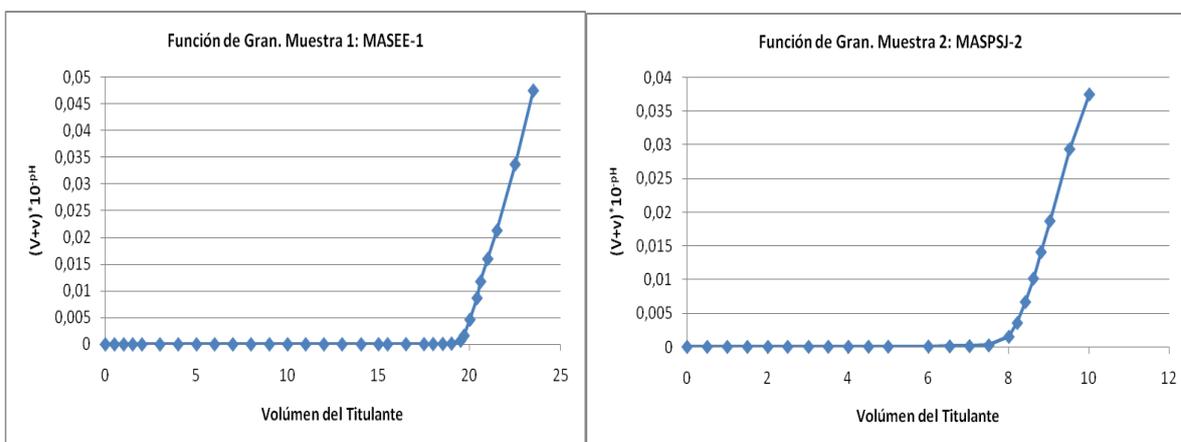
$X_i$  = valores individuales de x en la recta

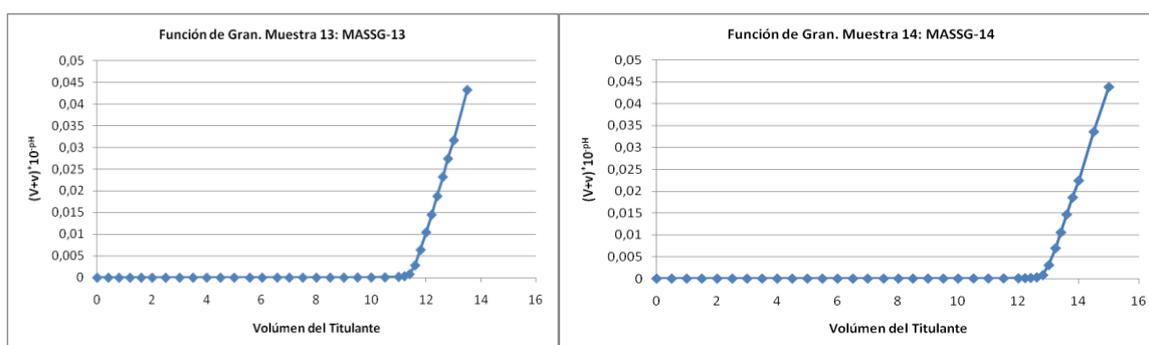
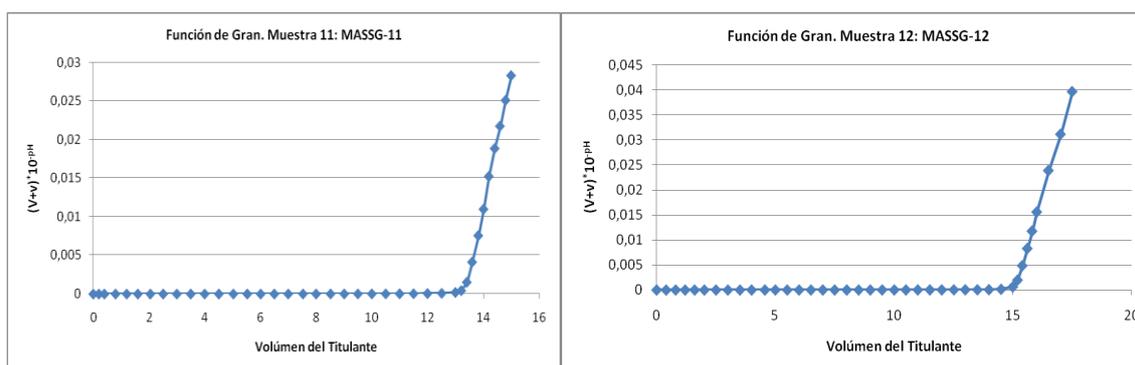
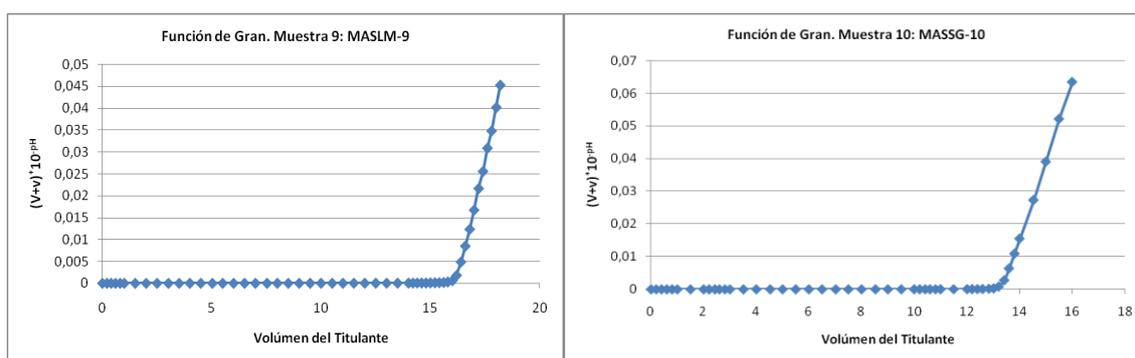
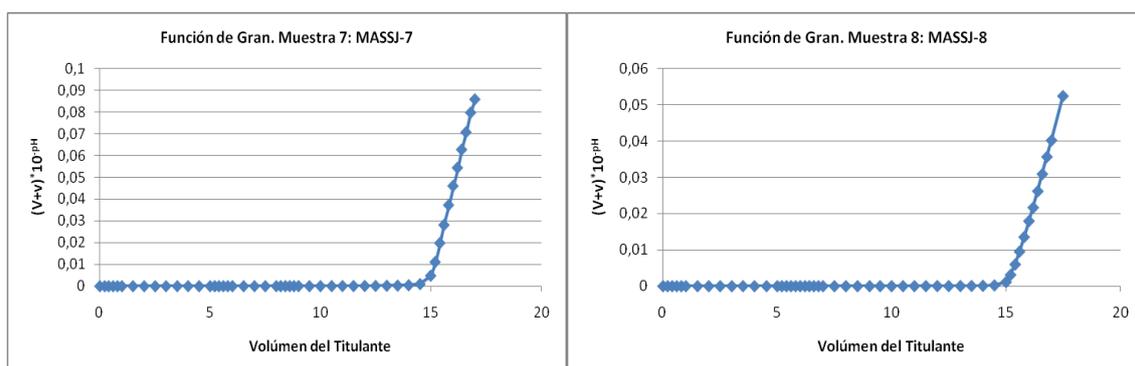
## **APÉNDICE H**

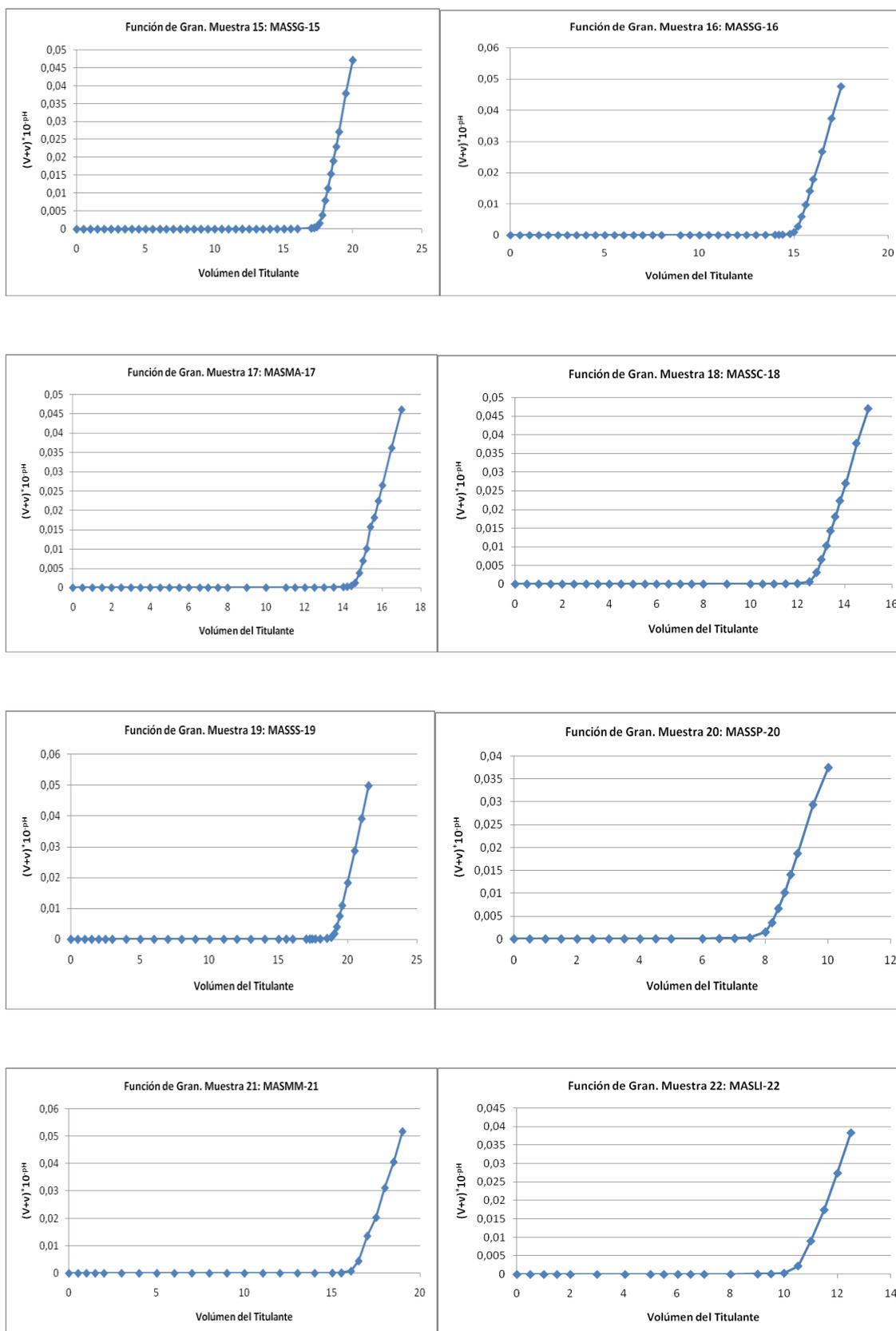
- 1- Curvas de titulación- Determinación de alcalinidad
- 2- Curvas de calibración para cationes, aniones y sílice disuelta

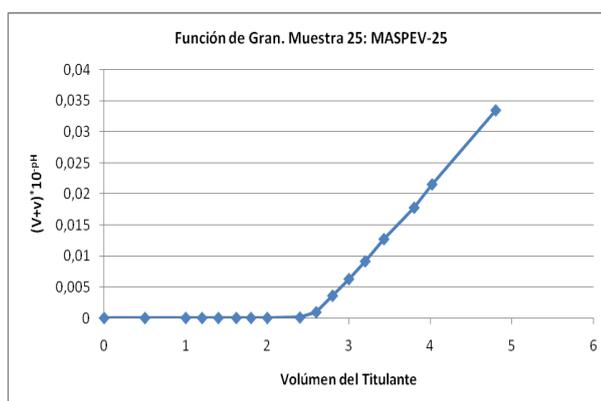
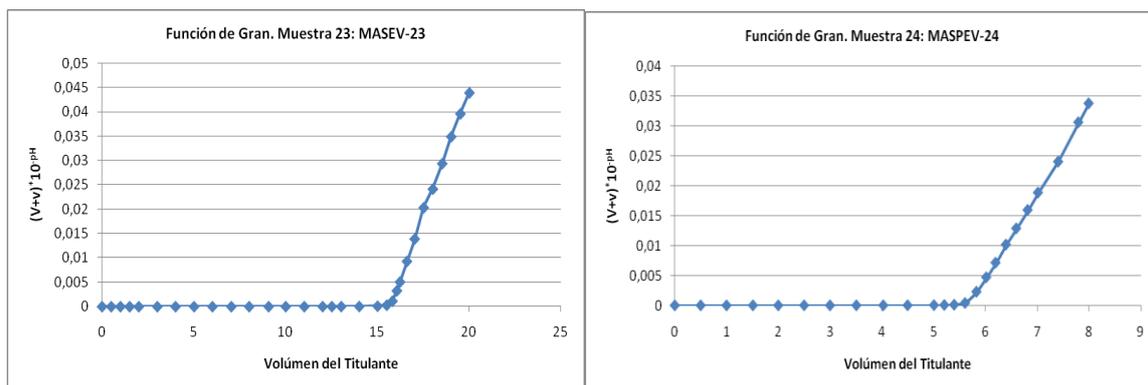
## Curvas para la determinación de la alcalinidad, cationes, aniones y sílice disuelta

### H.1- Curvas de Titulación (Función de Gran) para la determinación de la alcalinidad

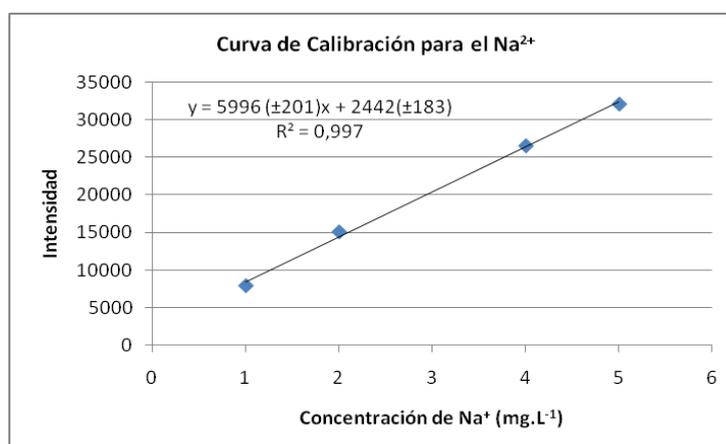
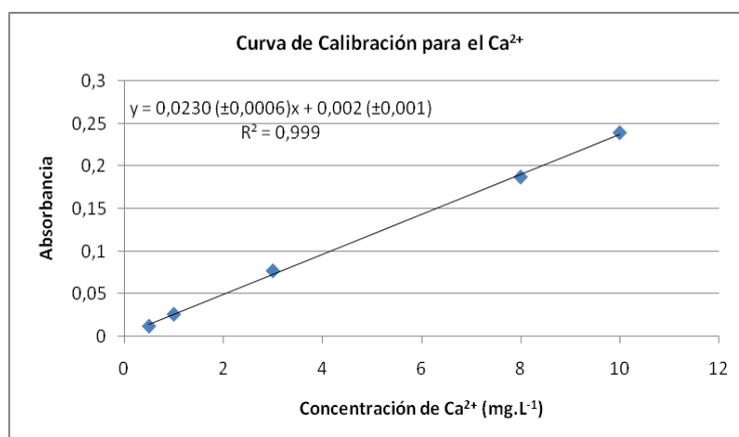
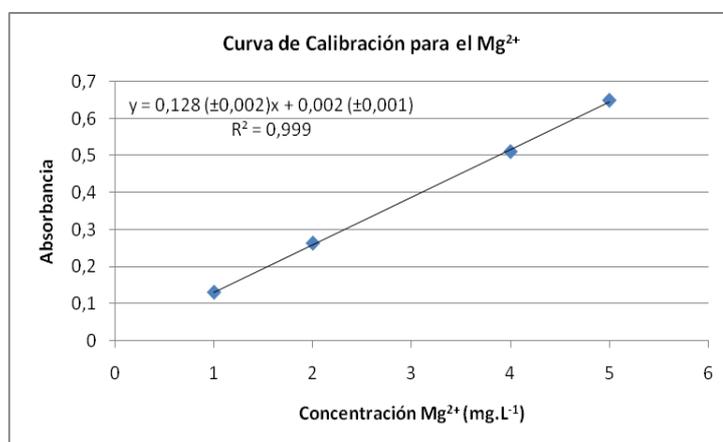


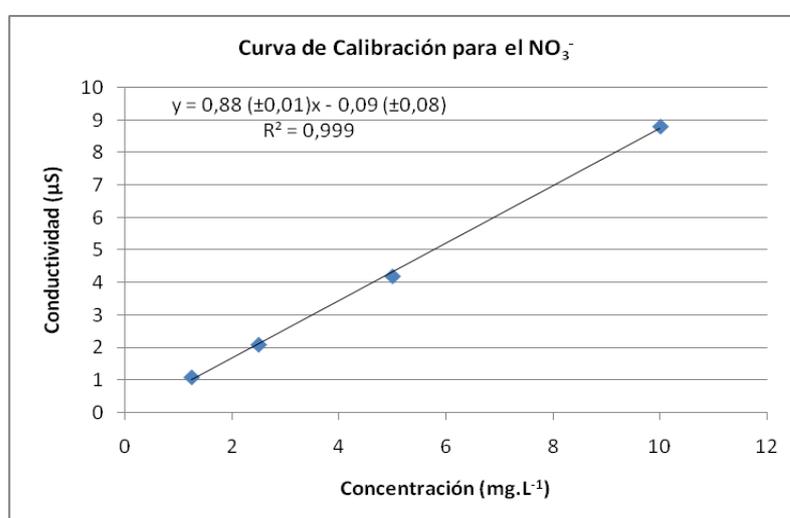
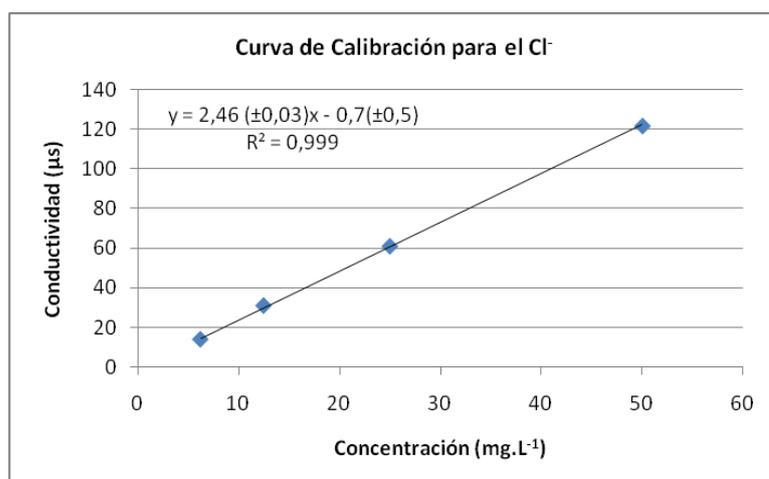
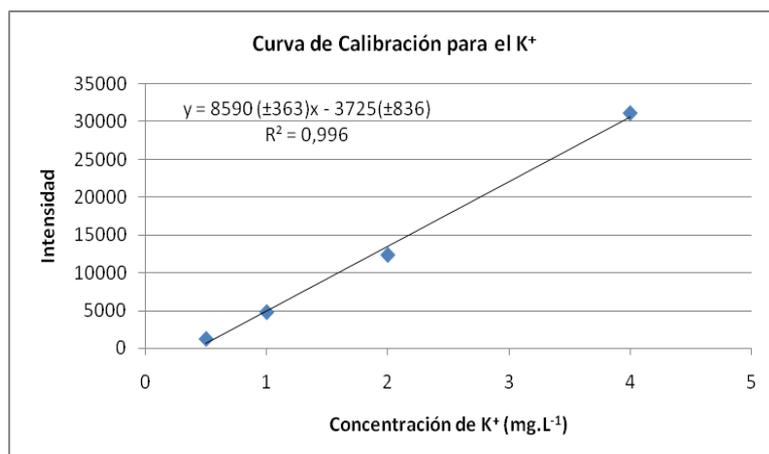


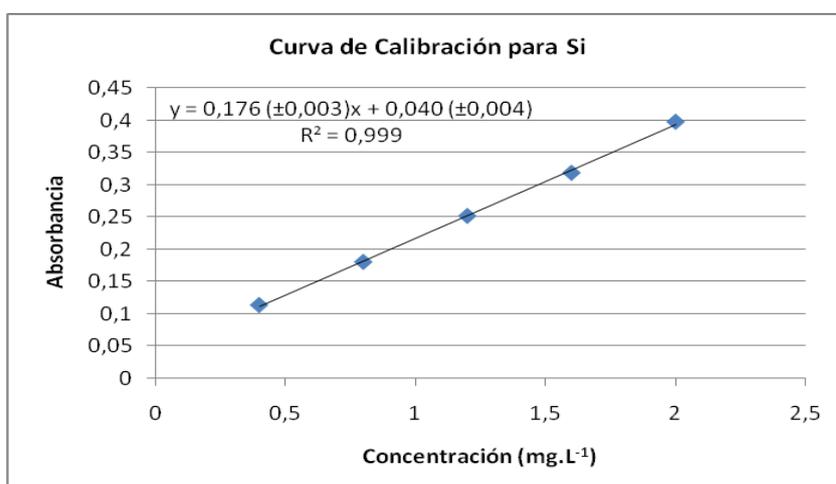
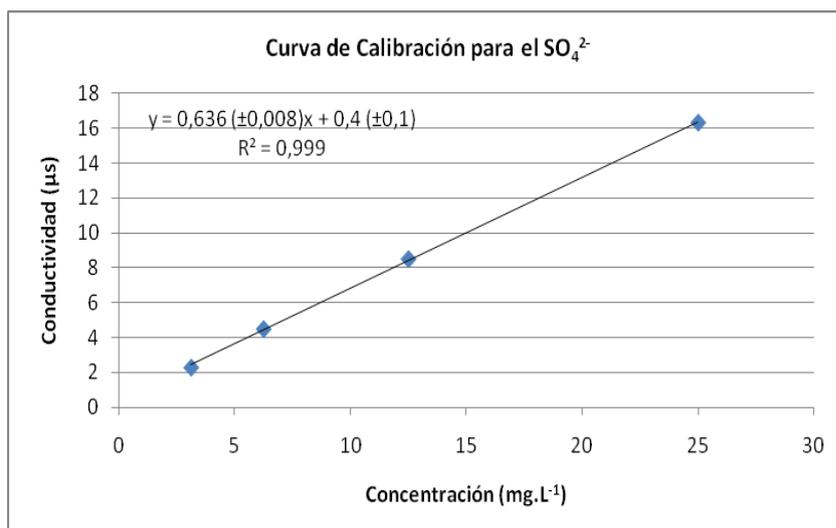




## H.2- Curvas de calibración utilizadas para la cuantificación de las especies químicas analizadas







## **APÉNDICE I**

- 1- Parámetros y concentraciones de elementos para el agua de mar y aguas subterráneas.

**Tabla 1I** Parámetros y concentraciones de elementos para el agua de mar y aguas subterráneas <sup>[58]</sup>.

<b>Parámetros y Elementos</b>	<b>Agua de mar</b>	<b>Aguas subterráneas</b>
pH	8,1-8,4	7,4
Conductividad	50.000 $\mu\text{Scm}^{-1}$	Depende de T
SiO <sub>2</sub>	6,4 $\text{mgL}^{-1}$	16 $\text{mgL}^{-1}$
Mg <sup>2+</sup>	1350 $\text{mgL}^{-1}$	7 $\text{mgL}^{-1}$
Na <sup>+</sup>	10.500 $\text{mgL}^{-1}$	30 $\text{mgL}^{-1}$
Ca <sup>2+</sup>	410 $\text{mgL}^{-1}$	50 $\text{mgL}^{-1}$
K <sup>+</sup>	390 $\text{mgL}^{-1}$	3 $\text{mgL}^{-1}$
Cl <sup>-</sup>	19.000 $\text{mgL}^{-1}$	20 $\text{mgL}^{-1}$
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2700 $\text{mgL}^{-1}$	30 $\text{mgL}^{-1}$
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,67 $\text{mgL}^{-1}$	---
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	142 $\text{mgL}^{-1}$	200 $\text{mgL}^{-1}$
SDT	35.000 $\text{mgL}^{-1}$	350 $\text{mgL}^{-1}$

## **APÉNDICE J**

- 1- Mapa de ubicación de los puntos de muestreo en la zona Oriental de la isla de Margarita.

**Ubicación de los puntos donde se captaron las muestras de aguas en la región Oriental de la isla de Margarita, Edo. Nueva Esparta, Venezuela.**