

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS  
PERTENECIENTES AL ACUÍFERO "EL TAPARO", PENÍNSULA DE PARAGUANÁ,  
ESTADO FALCÓN.

Trabajo Especial de Grado presentado ante la  
ilustre Universidad Central de Venezuela por  
el **Br. Jesús Alfredo Pérez Zafra** para  
obtener el Título de Licenciado en  
Geoquímica

**Caracas, Octubre de 2013**

# **ACTA**

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas pertenecientes al acuífero El Taparo, península de Paraguaná, estado Falcón” presentado por el Br. Jesús Alfredo Pérez Zafra, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciado en Geoquímica.

---

**Prof. Ramón Montero**

(Tutor Académico)

---

**Lic. Sherley Fernández**

(Tutor Industrial)

---

**Prof. José Vicente Gutiérrez**

(Jurado)

---

**Msc. Fernando De Carli**

(Jurado)

DEDICATORIA

*A MI DIOS, QUE SIEMPRE HA SIDO MI GUIA.*

*A MI MADRE POR SIEMPRE ESTAR INCONDICIONALMENTE  
PARA MI.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios primeramente por ser mi guía en cada uno de los caminos que emprendo, por permitirme vivir cada día al máximo, con alegrías y tristezas con avances y tropiezos pero cada uno me ha dejado una enseñanza a lo largo de mi vida, Gracias mi Dios.

A mis padres, Oris Zafra y Jesús Pérez quienes me dieron la vida. Especialmente a mi madre, vieja contigo he aprendido el valor de las cosas, de cada esfuerzo, de cada detalle, de cada lagrima, cada enseñanza que me has brindado y por el cual hoy me siento eternamente en deuda contigo, no solo por darme la vida, si no por cada uno de los esfuerzos que hiciste para llevarme hasta aquí, por compartir conmigo momentos de felicidad y de tristezas durante este largo camino que recorrimos juntos, por darme cada palabra de aliento cuando me sentí derrotado frente a las adversidades, por confiar en mí por estar incondicionalmente en cada uno de mis pasos, por ser tu mi mayor tesoro, mi amor eterno, mi vida y la mujer a la que admiro mucho. Esa persona que me enseñó que la vida hay que sufrirla pero gozarla, que hay que trabajarla pero manteniendo siempre los pies en la Tierra y la humildad por delante, la que me enseñó que si no se confía en uno, no se logran las cosas, GRACIAS TOTALES por cada una de esas palabras, amores y cariños que me has dado a lo largo de mi vida, por ser lo más bello que Dios me pudo regalar. Vieja, TE AMO INFINITAMENTE, no tengo forma de pagar todas las cosas que me has dado, estaré siempre agradecido. TE AMO MAMÁ! Esto te lo dedico.

A mi papa, que poco estuviste pero estuviste y es lo que importa. Gracias Alfredo, no sólo por la vida, si no por las enseñanzas que me has podido brindar durante mi paso por tu vida.

A mis hermanos locos José, Jesika, Jenyffer, Yelitza que me dio la vida, que sin Uds. muchachos la vida no sería igual de divertida, gracias por siempre apoyarme en todos y cada uno de mis pasos, por siempre tener una palabra de apoyo incondicional para mí.

José (Silvio) por ser el mayor de los cinco, gracias por tu creencia hacia mí, y por el apoyo. Te quiero mucho hermano.

Jesika (Cacique) tengo mucho que agradecerte pues siempre has estado de manera incondicional para mi, con esos buenos consejos que me han ayudado a seguir adelante, con esas palabras de aliento de que todo va a salir bien, que lo deje en manos de Dios, y así lo he hecho y como ha resultado. También tengo que agradecerte la Fe puesta en mi persona y cada uno de los momentos gratos que hemos vivido. Te quiero muchísimo. GRACIAS!

Jenyffer, (María) como no agradecerte el infinito apoyo que me brindas, el cariño y la confianza que pones en mi cada vez. Quiero decirte que te quiero mucho, y pues aquí está tu hermano para lo que salga.

Yelitza, (Coco) gracias por el infinito apoyo, por los abrazos y el cariño que me has brindado durante todos mis días, que fuiste la persona con quien más viví la infancia, y una persona importante en mi vida. Te quiero mucho enana!

A Chuchu, que a lo largo de los casi 20 años que llevas con mi mamá te has convertido en un segundo papa para mi, gracias infinitamente por el apoyo, por el esfuerzo realizado junto a mi mama, por las enseñanzas que me has brindado. Gracias!!

A mi yeri, mi amor durante estos 4 años, tengo que agradecerte el infinito apoyo brindado, gracias por esas palabras que me brindaron confianza, gracias por creer en mi y brindarme ese cariño. Por apoyarme en las decisiones tomadas y por estar siempre ahí pendiente de que todo vaya bien. TE AMO!!

A mis hermanos de la vida que desde el liceo hemos estado juntos viviendo experiencias grandes, inolvidables y de felicidad eterno: Laurent, Keyla y Kent, muchachos a Uds. GRACIAS, por estar, por el apoyo, por el cariño y los buenos ratos vividos y por los que faltan por vivir.

A mis amigos y hermanos de la vida: Juancho, Dibetsy, Yessenia, Marbily, Andrea, José Luis con quienes he compartido un buen trecho de camino, y hemos vivido experiencias únicas e inigualables, con los que he llorado, reído, cantado y bailado hasta que el cuerpo aguante, GRACIAS TOTALES por creer en mí, por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento en los momentos que mas necesité. Por los buenos ratos en la universidad y fuera de ella, esto se los dedico, me quedo corto de tanto que tengo para agradecerles.

A mi compañera de estudio de siempre, una gran amiga que me regalo la vida, Yrasenia (La kimbelyana de su madre) aunque nos separamos un poco después de tu grado, y que ahora nos vemos poco, pero hablamos mucho, siempre te recuerdo como una gran amiga, un excelente persona con la cual compartí más que estudios (entre estrés y risas) momentos inolvidables, y pues quiero agradecerte por el apoyo brindado y por tu amistad. Te quiero mucho.

A mi tía Josefina, que a pesar de conocerla ya cuando estaba grande se ha convertido en m tía favorita, gracias por el apoyo, por su creencia a si mi persona, por brindarme esas palabras tan bonitas que motivan a seguir. Gracias!! La quiero mucho!

A mi cuñado Julio, mi pana gracias por el apoyo y por creer en mí, aquí se ve el culmino de esos 2 años jajaja. Gracias!

A mi cuñada Edybeth, gracias por el apoyo y por estar pendiente, por creer en mi. Gracias!

A Omnain (Kuticos) por la ayuda prestada en la realización de este trabajo, por estar incondicionalmente ahí, gracias Kuticos te debo varias. Un abrazote!

A mi tutor y prof. Ramón Montero, por la ayuda, confianza depositada en mí para la realización de este trabajo. Gracias prof. Estaré eternamente agradecido.

A mi tutora Sherley del INAMEH, gracias por la colaboración, por el apoyo, por la comprensión en la realización de este trabajo. Gracias!

Al personal del INAMEH, por abrirme sus puertas para realizar este trabajo de investigación.

A la UCV, “La casa que vence las sombras” por permitirme recorrer sus aulas, formarme como profesional y egresar de la máxima casa de estudios que tiene este país.

A la Prof. Raiza Fernández del ICT, por siempre tener una palabra de aliento cuando las adversidades se presentan, por ese cariño que le brinda a cada uno de sus alumnos, porque de verdad que sí prof. las cosas Dios son perfectas y para él no hay imposibles, GRACIAS

A todos y cada uno de los que hicieron posible la realización de este trabajo de investigación, a cada una de las personas que conocí y formaron parte de mi vida universitaria.

Gracias infinitas a TODOS.

## RESUMEN

En la presente investigación fue realizado el estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas correspondientes al acuífero El Taparo, ubicado en la península de Paraguaná en el estado Falcón, Venezuela. Para ello fueron captadas 18 muestras pozos de bombeo y aljibes, a las cuales se les determinó especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  a fin de conocer factores y procesos que controlan la composición química de las aguas.

Para cumplir con los objetivos planteados, en la etapa de campo se realizó la toma de muestras con la simultanea medida de los parámetros pH, conductividad y temperatura; mientras que en la etapa de laboratorio, se determinaron las especies antes señaladas. Las técnicas usadas fueron espectroscopia de absorción y emisión atómica en llamas para la determinación de cationes, mientras que cromatografía iónica se uso para la determinación de los aniones, la sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) se conoció por absorción molecular. Por último, la alcalinidad se determinó a partir de una titulación volumétrica. Los resultados obtenidos fueron validados a partir del balance iónico con un % de error de menos del 10% y relaciones entre la conductividad de campo y la teórica

La interpretación de resultados se facilitó mediante el uso de diagramas de Piper y figuras de Stiff que conllevo a la clasificación de las aguas, permitiendo la identificación de 3 tipos a saber:  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$  y  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ . El uso de relaciones iónicas y de la prospección geofísica como método complementario ayudó a conocer los diversos procesos que afectan a dichas aguas, siendo el más importante la intrusión marina presente en esta zona, por su parte la prospección geofísica permitió conocer unidades litológica presentes en la zona de estudio, donde se identificaron calizas compactas y arenas de grano grueso a medio.

Dentro del marco legal y la calidad de las aguas, en atención al Decreto 883 (Gaceta oficial 5.021,1995) se determinó que solo el 5,56% de las aguas son aptas para el

consumo humano, caracterizada por el agua bicarbonatada sódica presente en una sola muestra captada.

## INDICE

### Contenido

I.- INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos .....	2
II.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	3
II.1.- Aguas subterráneas.....	4
II.2.- Acuíferos.....	4
II.3.- Composición química de las aguas subterráneas .....	7
II.4.- Factores que controlan la composición química del agua subterránea.....	12
II.5.- Acuífero costero .....	16
II.6.- Parámetros fisicoquímicos que rigen la movilidad de las especies químicas en las aguas subterráneas .....	17
II.7.- Clasificación de las aguas subterráneas .....	18
II.8.- Prospección geofísica.....	25
II.9.- Marco legal sobre la calidad de agua en Venezuela .....	27
III.- ZONA DE ESTUDIO .....	34
III.1.- Ubicación .....	34
La zona de estudio .....	35
III.2.- Geología Regional .....	36
III.3.- Geología local .....	39
III.4.- Clima .....	41
III.5.- Fisiografía y geomorfología .....	42

III.6.- Hidrología .....	42
III.7.- Hidrogeología.....	43
IV.- ANTECEDENTES .....	45
IV.1.- Internacionales .....	45
IV.2.- Nacionales .....	47
V.- METODOLOGIA.....	51
V.1.- Plan de muestreo.....	51
V.2.- Preparación de recipientes para captación de agua subterránea.....	52
V.3.- Etapa de campo .....	53
V.4.- Etapa de laboratorio .....	54
VI.- PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS .....	58
VI.1.- VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	59
VI.2.- HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS .....	61
IV. 2.1.- Clasificación de las aguas mediante el diagrama de Piper .....	61
IV. 2.2.- Clasificación de las aguas mediante figuras de Stiff. ....	63
Tabla 12.- Cuadro comparativo entre diagrama de Piper y Figuras de Stiff.....	67
VI.3.- VARIACION DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS .....	68
pH.....	68
Conductividad .....	71
VI.4.- VARIACION DE LA CONCENTRACION DE LOS CATIONES Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> .....	72
Sodio (Na <sup>+</sup> ).....	75
Potasio (K <sup>+</sup> ).....	77
Calcio (Ca <sup>2+</sup> ).....	79

Magnesio ( $Mg^{2+}$ ) .....	82
VI.5.- VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS ANIONES $HCO_3^-$ , $Cl^-$ , $SO_4^{-2}$ y $NO_3^-$ .....	85
Cloruro ( $Cl^-$ ) .....	87
Bicarbonato ( $HCO_3^-$ ).....	90
Sulfato ( $SO_4^{-2}$ ) .....	92
Nitrito ( $NO_2^-$ ).....	94
VI.6.- VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÍLICE DISUELTA ( $SiO_2$ ) .....	96
VI.8.- RELACIONES INTERELEMENTALES .....	101
Relación $Cl^-/HCO_3^-$ .....	104
Relación $SO_4^{-2}/Cl^-$ .....	106
Relación $Na^+/Cl^-$ .....	107
Relación $Ca^{2+}+Mg^{2+}/HCO_3^-+SO_4^{2-}$ .....	108
VI.9.- PROSPECCION GEOFISICA.....	110
VII.- CONCLUSIONES .....	116
VIII.- RECOMENDACIONES.....	117
VIII.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	118
APENDICE A.....	123
Datos de los pozos captados.....	123
APENDICE B.....	124
Concentraciones de las especies determinadas.....	124
APENDICE C .....	125
Calculo de la conductividad teórica y balance iónico .....	125
APENDICE D .....	126

Curvas de calibración .....	126
APENDICE E.....	130
Prospección geofísica.....	130

## INDICE DE FIGURAS

Fig.1.-Ciclo del agua.....	3
Fig.2.- Tipos de acuíferos en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos (modificado de López et al., 2009).....	6
Figura. 3.- Equilibrio agua dulce-agua salada (López y Gómez, 2007). ....	14
Figura 4.- Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación (López y Gómez, 2007). ....	15
Figura 5.- Acuífero multicapa, con diferentes estados de intrusión salina (López y Gómez, 2007). ....	17
Figura 6.- Figuras de Stiff para aguas subterráneas (Freeze y Cherry, 1979).....	23
Figura 7.- Diagrama de Piper para aguas subterráneas (Fetter, 1994).....	24
Figura 8.- Relación de la profundidad de la investigación con la distancia AB (Astier, 1975). ....	26
Figura 9.- Electrodo alienado de los dispositivos (Astier, 1975). ....	27
Figura. 10.- Ubicación de la zona de estudio.....	35
Figura. 11.- Ubicación de las parcelas del estudio (modificado de INAMEH, 2012). ....	36
Figura 12.- Mapa Geológico de la Península de Paraguaná .....	40
Figura 13.- Precipitación y evaporación promedio en mm de la estación Jadacaquiva .....	41
Figura 14.- Mapa Hidrogeológico de la Península de Paraguaná, Estado Falcón (INAMEH, 2012). ....	44
Figura 15.- Ubicación de pozos de muestreo de la zona de estudio .....	52
Figura 16.- Diferentes etapas llevadas a cabo durante este trabajo.....	57
Figura 17.- % Error del balance iónico (%B.I.) .....	59
Figura 18.- Relación entre cationes y aniones (meq/L).....	60
Figura 19.- Relación entre conductividad teórica y de campo ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). ....	61

Figura. 20.- Diagrama de Piper para las muestras de aguas subterráneas del acuífero el Taparo. .....	62
Figura. 21.- Distribución de las figuras de Stiff para la zona de captación .....	64
Figura 22.- Figuras de Stiff para aguas cloruras sódicas.....	65
Figura 23.- figuras de Stiff para aguas cloruradas cálcicas.....	66
Figura 24.- Figuras de Stiff para aguas cloruradas magnésicas .....	66
Figura 25.- Figura de Stiff para aguas bicarbonatadas sódicas .....	66
Figura 26.- Caja grafica del pH.....	68
Figura 27.- Distribución espacial del pH.....	70
Figura. 28.- Caja grafica para las conductividades medidas en $\mu\text{S}/\text{cm}$ .....	71
Figura 29.- Distribución espacial de conductividades.....	72
Figura 30.- Representación grafica de las concentraciones de los cationes a) $\text{Na}^+$ y b) $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{K}^+$ , para las muestras colectadas en el acuífero El Taparo. ....	73
Figura 31.- Cajas gráficas de cationes $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$ en $\text{mg}/\text{L}$ .....	74
Figura 32.- Distribución espacial de $\text{Na}^+$ .....	76
Figura 33.- Distribución espacial de $\text{K}^+$ .....	78
Figura 34.- Distribución espacial de $\text{Ca}^{2+}$ .....	81
Figura 35.- Distribución espacial de $\text{Mg}^{2+}$ .....	83
Figura 36.- Representación grafica de los valores de concentración de los aniones $\text{HCO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ y $\text{NO}_3^-$ para las muestras colectadas en el acuífero El Taparo. ....	86
Figura 37.- cajas gráficas de aniones.....	84
Figura 38.- Distribución espacial de $\text{Cl}^-$ .....	89
Figura 39.- Distribución espacial de $\text{HCO}_3^-$ .....	91
Figura 40.- Distribución espacial de $\text{SO}_4^{2-}$ .....	93

Figura 41.- Distribución espacial de $\text{NO}_3^-$ .....	95
Figura 42.- Caja gráfica para $\text{SiO}_2$ .....	97
Figura 43.- Distribución espacial de $\text{SiO}_2$ .....	98
Figura. 44.- Relación iónica Na/K en mmol/L .....	101
Figura 45.- Mapa comparativo entre los valores de concentración de $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$ en mg/L.....	104
Figura 46.- Relación iónica entre $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ en mmol/L.....	104
Figura 47.- Relación iónica entre $\text{rSO}_4^{2-}/\text{rCl}^-$ .....	106
Figura 48.- Relación $\text{Na}^+/\text{rCl}^-$ .....	107
Figura 49.- Relación $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ .....	109
Figura 50.- Distribución de los SEV.....	112
Figura 51.- Ubicación de los SEV y muestras captadas.....	113
Figura 52.- Ubicación aproximada de la cuña salina.....	114

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentración de especies según el tipo de agua (Custodio y Llamas, 1976) .....	11
Tabla 2.- Descripción de las aguas según su tipo atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) .....	28
Tabla 3.- Descripción de las aguas según su tipo atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) .....	28
Tabla 4.- Descripción de las aguas según su tipo atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) .....	29
Tabla 5.- Rango de parámetros fisicoquímicos atendiendo al Decreto 883, aguas tipo 1A (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) .....	30
Tabla 6.- Rango de parámetros fisicoquímicos atendiendo al Decreto 883, aguas tipo 1B (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) .....	30
Tabla 7.- Límites para aguas tipo 1A y 1B atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).....	31
Tabla 8.- Límites para aguas tipo 2A atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995) .....	32
Tabla 9.- Límites para aguas 2B atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).....	32
Tabla 10.- Límites para aguas 2A y 2B atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995).....	33
Tabla 11.- Datos de precipitación y temperatura, estación Jadacaquiva (INAMEH, 2012).....	41
Tabla 12.- Cuadro comparativo entre diagrama de Piper y Figuras de Stiff.....	67
Tabla 13.- Límites permisibles para las especies según Decreto 883 (Gaceta oficial 5.021, 1995) .....	100
Tabla 14.- Relaciones iónicas $\text{Na}^+/\text{K}^+$ para las muestras captadas en mmol/L.....	102
Tabla 15.- Relaciones iónicas $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ para las muestras captadas .....	105
Tabla 16.- Relaciones iónicas $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ para las muestras captadas en mmol/L .....	108

Tabla 17.- Relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ .....	110
---	-----

## I.- INTRODUCCIÓN

De toda el agua contenida en el planeta, las aguas subterráneas constituyen un importante reservorio, esto debido a que en contraste con las aguas superficiales, en muchos casos no necesita tratamientos como consecuencia de que en general son de buena calidad química; por ello estas aguas constituyen la fuente de abastecimiento más segura de agua potable como soporte para los servicios relacionados al ambiente, la industria y a la agricultura, además del uso doméstico. UNESCO (2007) estimó que este recurso posee un total de unos 10.000.000 km<sup>3</sup> (IGME, 2007).

A nivel mundial, muchas de las grandes metrópolis dependen de las aguas subterráneas, pese a que han disminuido su consumo debido a problemas de subsidencia del terreno (Bangkok), intrusión marina (Buenos Aires) o contaminación de las aguas subterráneas (Jakarta), además, existen pequeñas ciudades y comunidades rurales que utilizan con frecuencia este recurso para su abastecimiento doméstico (López et al., 2009).

En Venezuela, se cuenta con abundantes recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, cuya disponibilidad para el segundo caso alcanzan los 3,0510 Hm<sup>3</sup>/año (Guerra y Morón 2007). Los acuíferos del país con mayor potencial hidrogeológico corresponden a los ubicados en las unidades litológicas de sedimentos pocos o no consolidados que cubren una superficie total de 352.000 Km<sup>2</sup>, estos, a través de estudios preliminares, se han estimado en 5000 millones de m<sup>3</sup> por año, clasificándose de acuerdo a su potencial, en acuíferos de gran potencialidad, tal es el caso de los ubicados en: Mesa de Guanipa, sur de Monagas, sistema del río Guárico, llanos de Barinas y Portuguesa y llanos de Apure. Los acuíferos con potencial medio están ubicados en Barlovento, Valle de Caracas y en acuíferos en vías de agotamiento como el del Valle de Quíbor (MARN, 1987 en Guzmán y Pereira, 2009).

Con respecto al estado Falcón, específicamente la Península de Paraguaná, se caracteriza por estar dominada por una gran escasez de lluvias sobre su superficie, donde las aguas subterráneas son una alternativa como fuente abastecedora en dicha zona. No obstante, el crecimiento de la población y la intensa explotación de estos reservorios ponen de manifiesto la posible degradación de la calidad de las aguas subterráneas.

En ese sentido, el acuífero El Taparo, geográficamente perteneciente al estado Falcón, se caracteriza por ser próximo costero, que en épocas anteriores ha sido explotado en grandes proporciones, implicando una disminución excesiva de sus niveles; sin embargo, actualmente los niveles de agua en este se han recuperado, del mismo modo existe un aumento desproporcional en la salinidad en sus aguas, por tal motivo surge la necesidad de caracterizar tanto desde el punto de vista hidrogeoquímico como geofísico la zona correspondiente en función del grado de salinidad que esta presenta, a fin de determinar el aprovechamiento que se le puedan dar a las mismas para el consumo humano (INAMEH, 2012)

### **Objetivo general**

Estudiar desde el punto de vista hidrogeoquímico las aguas subterráneas, pertenecientes al acuífero El Taparo, Península de Paraguaná, Estado Falcón.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar las aguas mediante la medición de parámetros: pH, conductividad y temperatura, así como de las especies químicas mayoritarias y minoritarias  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SiO}_2$ .
- Establecer el o los tipos de aguas predominantes en la zona de estudio.
- Determinar el posible origen de la composición química de las aguas estudiadas.
- Identificar mediante la aplicación de sondeos geofísicos como método complementario, la zona de interface agua dulce/agua salada.

## II.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Un buen punto de partida es adoptar el ciclo hidrológico como marco básico de esta investigación, el mismo puede ser descrito a través de la figura 1. Este se puede considerar como la circulación continua de agua cerca de la superficie terrestre, desde el océano a la atmosfera y luego a través de la precipitación, con la subsiguiente formación de escorrentías superficiales y posteriormente el flujo de las aguas subterráneas va nuevamente al océano. El calentamiento de los océanos por la radiación solar hace que el agua se evapore a la atmosfera, este vapor es transportado por los vientos hacia los continentes donde se condensan y caen a la superficie como lluvia, granizo o nieve. Las precipitaciones se devuelven directamente a los océanos, bien sea por la intercepción con superficies con vegetación que por evapotranspiración es llevada el agua hacia la atmosfera, o es colectada a través de las escorrentías superficiales, o el agua se infiltra a través de los suelos y rocas subyacentes formando el agua subterránea. Las escorrentías superficiales y flujos de aguas subterráneas contribuyen con las corrientes superficiales y ríos a que fluyan hacia los océanos, embalses y lagos que suministran temporalmente zonas de almacenamiento (Hiscock, 2006).

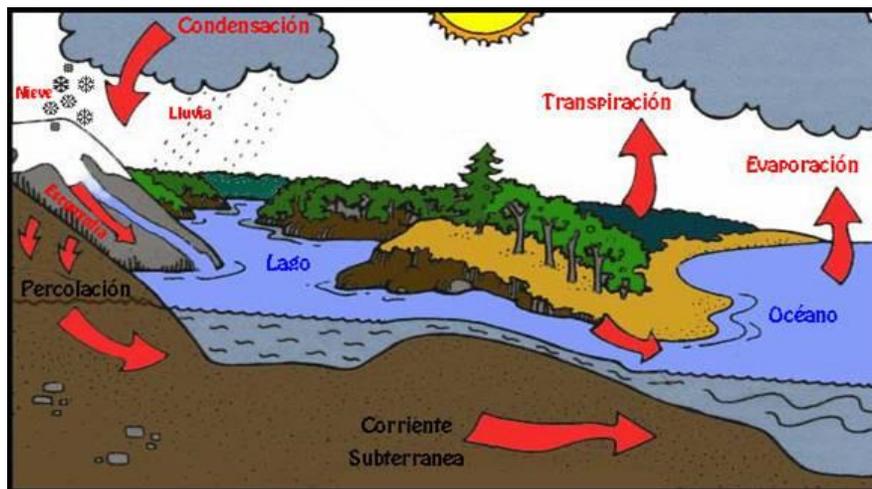


Fig. 1.- Ciclo del agua (Fagundo, 2007).

De toda el agua contenida en la Tierra el 97.25% corresponde a los océanos, los continentes y la atmosfera contienen el 2.75% de agua, de los cuales las capas de

hielo y glaciares significan el 2.05%, por su parte el agua subterránea a una profundidad de 4 km. representa el 0.68%, los lagos de agua dulce el 0.01%, la humedad del suelo posee el 0.005% y los ríos corresponden al 0.0001%. Alrededor del 75% del agua en los continentes está contenida en los glaciares o es salada. La importancia relativa de las aguas subterráneas viene dada cuando se considera que de la cuarta parte del agua restante en los continentes, aproximadamente el 98% se almacena bajo tierra. Esto permite resaltar el grado de importancia que estos reservorios de agua, en particular para ser usadas en poblaciones demográficamente crecientes (Hiscock, 2006).

## **II.1.- Aguas subterráneas**

El agua existente bajo la superficie del terreno es conocida como agua subterránea. En concreto, es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturando completamente los poros y fisuras del terreno (López et al., 2009).

Otros autores como Custodio y Llamas (1976) en Kutos (2012), la definen como aquella que está presente en el subsuelo, almacenándose en los poros de las rocas, fisuras, fracturas o cavernas. Aquellas zonas saturadas completamente de agua son conocidas como acuíferos.

## **II.2.- Acuíferos**

López et al. (2009) definen al acuífero como una o más capas de roca o de otros estratos geológicos presentes en el subsuelo, que tienen la suficiente porosidad y permeabilidad para permitir ya sea un flujo significativo de aguas subterráneas, o la extracción de cantidades significativas de estas. Esto puede presetar dimensiones muy variadas desde pocas hectáreas de superficies hasta miles de kilómetros cuadrados, y desde escasos metros de espesor a cientos o miles de metros.

En el mismo orden de ideas Gil (2008), define al acuífero como aquellas formaciones geológicas que almacenan y liberan agua, con la particularidad, del carácter móvil y renovable de las aguas que llegan y saturan el medio permeable,

permitiendo que el hombre pueda extraerla y aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para sus necesidades. Los acuíferos pueden ser clasificados atendiendo a su carácter hidrostático o según su grado de permeabilidad.

Según la hidrostática del agua los acuíferos se definen como libres, confinados y semiconfinados (Figura. 2).

Acuíferos libres son aquellos en los cuales existe una superficie libre de agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto a presión atmosférica.

Acuíferos confinados se trata de acuíferos donde el agua está sometida a una elevada presión, superior a la atmosférica ocupando la totalidad de los poros en la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. Dentro de este parámetro existe una clasificación basada en los pozos que se puedan realizar al acuífero tomando en cuenta la altura del nivel freático o nivel piezométrico. De este modo se consideran como pozos surgentes o artesianos, aquellos en los que el nivel freático queda situado en una cota superior a la boca del pozo, y por tanto el agua sale al exterior por sí sola; mientras que los no surgentes, son aquellos cuyo nivel piezométrico queda por debajo de la superficie topográfica de los alrededores del pozo.

Acuíferos semiconfinados pueden considerarse como un caso particular de en los que el tope o la base de la secuencia estratigráfica, o ambos, no son totalmente impermeables sino que permiten la circulación vertical del agua. Este paso vertical puede hacerse desde o hacia el acuitardo, e incluso variar con el tiempo, según sean los valores relativos de los niveles piezométricos (López et al., 2009).

Por otro lado, en función de su grado de permeabilidad los acuíferos se clasifican como de medios porosos, fisurados y kársticos.

Los acuíferos de medios porosos se encuentran en los sedimentos detríticos presentando unas excelentes condiciones para almacenar y transmitir el agua.

Los acuíferos de medios fisurados se localizan en las fracturas de las rocas.

Los acuíferos de medios kársticos se tratan de grandes embalses subterráneos cuyas aguas circulan y se almacenan dentro de las cavidades de las formaciones rocosas calcáreas, las cuales tienen una porosidad secundaria originadas por disolución, presentando canales y cavernas de gran tamaño que cuando se saturan de agua constituyen acuíferos muy importantes.

Las formaciones geológicas cuando transmiten el agua muy lentamente y es difícil extraerla mediante captaciones en cantidades importantes, reciben el nombre de acuitardo. Sin embargo, pueden intercambiar importantes cantidades de agua con aquellos acuíferos con los que están en contacto horizontal, ya que la superficie de intercambio es muy grande; a su vez, existen formaciones geológicas que conteniendo agua en su interior no la transmiten, por tanto no permite su extracción, conociéndose como acuicluido, también existen capas confinantes capaces de no contener agua (López et al., 2009).

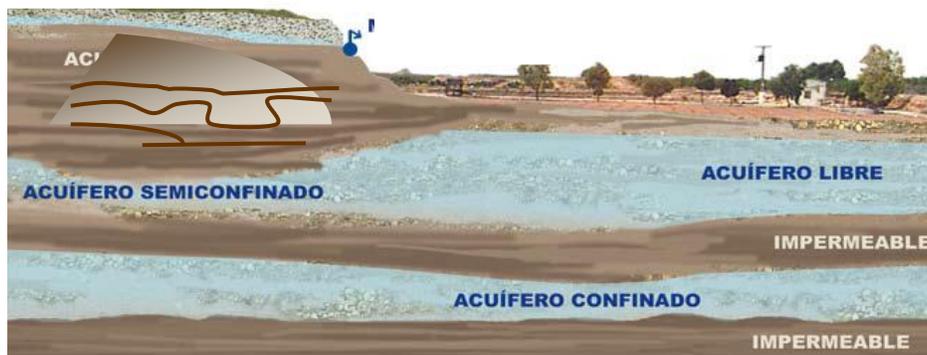


Figura 2.- Tipos de acuíferos en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos (modificado de López et al., 2009).

Posterior a la descripción del agua subterránea y lugares donde se almacena las mismas, es importante conocer cuáles son las principales especies químicas presentes que permitan dilucidar los procesos que pueden estar controlando su abundancia en algún lugar en particular.

### II.3.- Composición química de las aguas subterráneas

A pesar de la gran variabilidad de los elementos presentes en el agua subterránea y de la de sus concentraciones, éstos han sido clasificados atendiendo a la clasificación de Freeze y Cherry (1979) por su frecuencia de aparición y valor de concentración decreciente en mayoritarios o fundamentales, minoritarios o secundarios y traza.

Los constituyentes mayoritarios o fundamentales, están conformados por los aniones ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ),  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y otros como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , por su parte los Constituyentes minoritarios o secundarios están conformados por los aniones  $\text{F}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SH}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{BO}_3^-$  y cationes  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , por último los correspondiente a los traza  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , entre otros.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en condiciones particulares un constituyente minoritario puede alcanzar intervalos de concentración que permitan incluirlo dentro de los mayoritarios. En un agua natural dulce estos constituyentes aparecen por lo general en forma iónica como sales casi totalmente disociadas, con menor frecuencia se presentan en forma molecular parcialmente disociadas o como iones complejos de sustancias orgánicas o inorgánicas (Porrás et al., 1985).

A continuación se describe las características principales de los constituyentes más significativos.

#### Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ )

El dióxido de carbono disuelto en agua juega un papel importante en la composición química del agua, puesto que este se disuelve en la misma en función de su presión parcial, una parte permanece en disolución en forma de gas mientras la otra reacciona con el agua para formar ácido carbónico  $\text{H}_2\text{CO}_3$  que se disocia parcialmente para dar iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (Porrás et al., 1985).

El  $\text{CO}_2$  disuelto en agua procede fundamentalmente de la zona edáfica (respiración de organismos y descomposición de materia orgánica), mientras que las calizas y dolomías al ser disueltas constituyen otra fuente de iones carbonatos y bicarbonatos (Porrás et al., 1985).

Aguas cuyo pH es inferior a 8,3 para la mayoría de las aguas subterráneas naturales, la especie carbonatada dominante es el ion bicarbonato. En estas aguas la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  suele variar entre 50 y 400 mg/L, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/L. Para concentraciones de 1000 mg/L de  $\text{HCO}_3^-$  se señala que son aguas pobres en  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  o en las que se producen fenómenos de liberación de  $\text{CO}_2$  en el acuífero (Porrás et al., 1985).

#### Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )

Exceptuando a las evaporitas y a las secuencias sedimentarias de origen marino, las rocas por lo general presentan escasa concentración de cloruros; sin embargo dada la alta solubilidad de sus sales, estas pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones altas. Por su parte, el agua de lluvia puede ser otra fuente importante de cloruro, especialmente en zonas costeras (Porrás et al., 1985).

La concentración de cloruros en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de 10 mg/L a más de 2000 o 3000 mg/L (Porrás et al., 1985).

#### Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

El ion sulfato procede del lavado de terrenos en ambientes marinos, de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, y de la descomposición de sustancias orgánicas, entre otras. Sin embargo, la disolución de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno, representan frecuentemente el aporte más significativo de este ion en las aguas subterráneas (Porrás et al., 1985).

La mayoría de las aguas subterráneas sulfurosas presentan contenidos apreciables de  $\text{HS}^-$  o  $\text{H}_2\text{S}$  que, incluso a concentraciones muy bajas le confieren al agua un olor característico. En aguas dulces la concentración normal de  $\text{SO}_4^{2-}$  puede variar entre 2 y 150 mg/L. En aguas salinas asociadas a  $\text{Ca}^{2+}$  puede llegar a 5000 mg/L y las asociadas con  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  en salmueras puede alcanzar hasta 200 000 mg/L (Porras et al. 1985).

#### Iones nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ )

Los compuestos nitrogenados presentes en las aguas naturales están inmediatamente relacionados con el ciclo del nitrógeno, donde éste se concentra en mayor proporción en la atmósfera en fases gaseosas. En su fase oxidada, constituye una relativamente importante fracción en suelos y sustancias orgánicas, mientras que en rocas solo se encuentra como minoritario. Este elemento puede aparecer en sus formas de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NH}_4^+$  y por oxidación puede transformarse en  $\text{N}_2$  (gas) y finalmente en  $\text{NO}_3^-$  que es la forma más usual y estable que el nitrógeno presenta en las aguas subterráneas, estando dichos procesos redox influenciados por actividades biológicas (Porras et al., 1985).

Generalmente el  $\text{NH}_4^+$  o el amoníaco, aparecen en concentraciones traza en aguas subterráneas, aumentando su concentración cuando el medio es fuertemente reductor. El amonio es indicador de contaminación reciente probable, para los nitritos, pueden estar en las aguas como consecuencia de la oxidación del amoníaco, o como resultado de la acción microbiana de los nitratos (Porras et al., 1985).

#### Iones $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{Mg}^{2+}$

El calcio suele ser un catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, como constituyente de silicatos, carbonatos y sulfatos. Su concentración varía ampliamente en aguas subterráneas desde los 10 y 250 mg/L en aguas dulces, en

aguas que drenen en o través de terrenos yesíferos pueden llegar a los 600 mg/L y en salmueras de  $\text{CaCl}_2$  hasta los 50.000 mg/L (Porrás et al., 1985).

Para el caso del ion magnesio, éste es menos abundante que el ion calcio en las aguas, procede de la disolución de rocas carbonáticas como dolomías, y calizas magnesianas, así como de evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, también del agua marina. La concentración de  $\text{Mg}^{2+}$  no suele sobrepasar los 40 mg/L, en terrenos calcáreos puede rebasarse a veces los 100 mg/L y en terrenos evaporíticos pueden alcanzarse valores de 1000 mg/L (Porrás et al., 1985).

### Iones $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$

El sodio es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y por la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como  $\text{NaCl}$ . El ion sodio es altamente soluble y tiende a permanecer en solución; sin embargo, puede ser adsorbido por las arcillas de elevada capacidad de intercambio catiónico y puede ser intercambiado por  $\text{Ca}^{2+}$  provocando una disminución en la dureza de las aguas (ablandamiento natural). Su concentración es muy variable, pudiendo alcanzar hasta los 120.000 mg/L en zonas evaporíticas, sin embargo, raramente sobrepasa 100 o 150 mg/L en aguas dulces normales (Porrás et al., 1985).

En el caso del ion potasio, el mismo procede de la meteorización de feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de la silvina ( $\text{KCl}$ ). Este ion tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de los minerales con alta capacidad de intercambio catiónico, por ello su concentración en aguas subterráneas es mucho menor que el ion sodio. Éste no suele sobrepasar los 10 mg/L en estas aguas, aunque en casos excepcionales puede alcanzar los 100.000 mg/L (salmueras), concentraciones por encima de los 10 mg/L, en ocasiones puede ser indicio de contaminación por vertido de aguas residuales (Porrás et al., 1985).

## Sílice SiO<sub>2</sub>

El origen fundamental de la sílice disuelta (SiO<sub>2</sub>) en el agua subterránea, se debe a los procesos de hidrólisis de feldspatos y silicatos en general, siendo la concentración de éste en aguas subterráneas entre 3-8 mg/L, que representa la solubilidad del cuarzo a 25° C, pero en ocasiones se puede aproximar a los 100 mg/L (Porras et al., 1985).

La tabla 1, resume las concentraciones de las especies según el tipo de agua.

**Tabla 1. Concentración de especies según el tipo de agua (Custodio y Llamas, 1976)**

<b>Especie</b>	<b>Tipos de agua</b>	<b>Concentraciones (mg/L)</b>
Na <sup>+</sup>	- Dulce - De mar - Salmuera - Subterránea - Superficiales	1 – 150 10000 Hasta 100000 6-500 <1 a >300
K <sup>+</sup>	- Dulce - De mar - Salmuera - Superficial	0,1 – 10 400 100 - 100000 1 - 3
Ca <sup>2+</sup>	- Dulce - De mar - Salmuera - Subterránea	10 – 250 400 Hasta 50000 Varía ampliamente
Mg <sup>2+</sup>	- Dulce - De mar - Salmuera	1 – 100 1200 Algunos miles de ppm
Cl <sup>-</sup>	- Dulce - De mar	10 – 250 (a veces >250) 18000 – 21000

	- Salmuera	Hasta 220000
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- Dulce - De mar	50 – 350 (a veces 880) 100
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	- De mar	< 1
CO <sub>2</sub>	- En general - Acuíferos profundos	1 – 30 Hasta 1500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	- Dulce - De mar - Salmuera	2 – 150 3000 Hasta 200000
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	- En general - De mar - Subterránea - Contaminada	0,1 – 10 <1 <10 200 – 1000

#### II.4.- Factores que controlan la composición química del agua subterránea

Las aguas naturales adquieren su composición química mediante procesos complejos, donde intervienen factores geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, climáticos, pedológicos, antrópicos y fisicoquímicos, entre otros (Fagundo y González, 2005).

Los factores geológicos se relacionan con la litología (composición de minerales y rocas), el estado de las secuencias estratigráficas, la tectónica, el agrietamiento, la textura y porosidad de las rocas. La litología determina, por lo general, las facies hidroquímicas dominantes en una región determinada, es decir, el tipo de agua. Por su parte, los aspectos vinculados al agrietamiento y porosidad de las rocas influyen de manera determinante en el estado de división de las partículas, mientras más pequeños sean éstas, poseerán mayor superficie y se facilitará la disolución mineral (Fagundo y González, 2005).

Los factores hidrogeológicos, están relacionados con la permeabilidad del acuífero, el tipo de flujo su velocidad, así como la zona por donde se mueve el agua. Todos estos aspectos inciden en el tiempo de contacto entre el agua y el mineral. La concentración de CO<sub>2</sub>, la dureza y otras propiedades fisicoquímicas de las aguas minerales difieren de acuerdo a la forma en que se mueve el agua y la zona hidrogeológica (Fagundo y González, 2005).

En la zona de recarga del acuífero o en la zona de aireación, la concentración de CO<sub>2</sub> de las aguas es relativamente elevado, puesto que en estos lugares se dan los procesos de descomposición bacteriana de la materia orgánica. El pH en esta zona suele no ser elevado y la dureza es baja (Fagundo y González, 2005).

En la zona de conducción del acuífero el nivel de CO<sub>2</sub> suele ser menor, porque una parte del gas es consumido, como consecuencia de la interacción del agua con los minerales del medio rocoso. El agua en esta zona adquiere una mayor mineralización y un pH más elevado (Fagundo y González, 2005).

Los factores del tipo geomorfológicos también influyen en la composición química de las aguas, en especial, el escarpe de los macizos, el tipo de vegetación, el grado de erosión de los terrenos y la naturaleza de las propias formas del relieve. A su vez, los factores del tipo pedológicos influyen a partir de asociaciones al tipo de suelo que yace sobre las secuencias estratigráficas y su interacción con las aguas (Fagundo y González, 2005).

En el mismo orden, el factor climático también ejerce influencia sobre la composición química de las aguas subterráneas, puesto que interviene de forma activa en la dinámica de meteorización mecánica y química, acarreado la fragmentación, traslado de minerales desde su lugar de origen, así como la disolución de los mismos. Entre los factores más importantes que influyen en que las aguas adquieran su composición química son la temperatura, la humedad relativa, la intensidad y duración de las precipitaciones, la intensidad y duración de las radiaciones y la velocidad del aire, entre otros (Fagundo y González, 2005).

Finalmente el factor antrópico siendo este el que juega un papel importante en la variación de la composición química de las agua, ya que las actividades del hombre conduce al deterioro de la calidad de las aguas tanto superficiales como subterráneas, a pesar que estas últimas son menos susceptibles para la contaminación, pero una vez alteradas se hace muy difícil restablecer su calidad química (Fagundo y González, 2005). Este último factor nos permite hablar acerca de los diversos problemas que se puedan suscitar en un acuífero costero a causa de la intervención del hombre en los mismos, como es el caso del estudiado en esta investigación.

En un acuífero costero, existe una relación de equilibrio natural entre el agua subterránea dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que pugna por penetrar tierra adentro y que usualmente lo hace en forma de cuña apoyada en la base del acuífero dada su mayor densidad (Fig.3). La penetración de esta cuña dependerá de las características del acuífero: geometría, propiedades hidráulicas (permeabilidad, nivel piezométrico, entre otros) y será función inversa del flujo de agua dulce que a lo largo de la costa descarga al mar. 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 (López y Gómez, 2007).

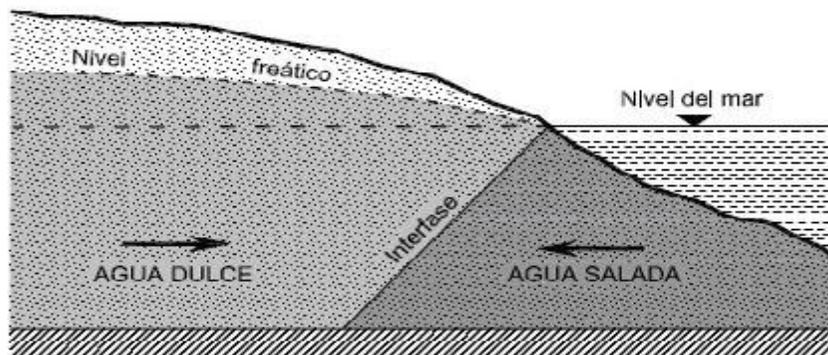


Figura. 3.- Equilibrio agua dulce-agua salada (López y Gómez, 2007).

Este equilibrio natural puede verse alterado por la acción humana al modificar la descarga de agua dulce al mar, fundamentalmente debido a extracciones por bombes del acuífero, provocando un descenso de la superficie piezométrica y en consecuencia la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro. Otras modificaciones del ciclo hidrogeológico, que alteren las entradas en el acuífero, como por ejemplo la construcción de presas en el cauce de un río que alimente un acuífero, pueden también alterar el equilibrio agua dulce - agua salada. Se puede definir por tanto, la intrusión marina, como el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce, como consecuencia de una disminución del flujo de agua dulce hacia el mar debido a la intervención humana (López y Gómez, 2007).

Esta intrusión provocará el aumento de la salinidad en las aguas subterráneas con la consiguiente contaminación del acuífero costero y la limitación de su aprovechamiento para determinados usos. Pero esa invasión de agua marina puede producirse de diferentes formas, siendo las más frecuentes el avance horizontal de la interfase hacia el interior y el ascenso vertical en forma de cono ("upconing") de la interfase a favor de pozos o sondeos en los que tiene lugar un bombeo intensivo (Fig.4) (López y Gómez, 2007).

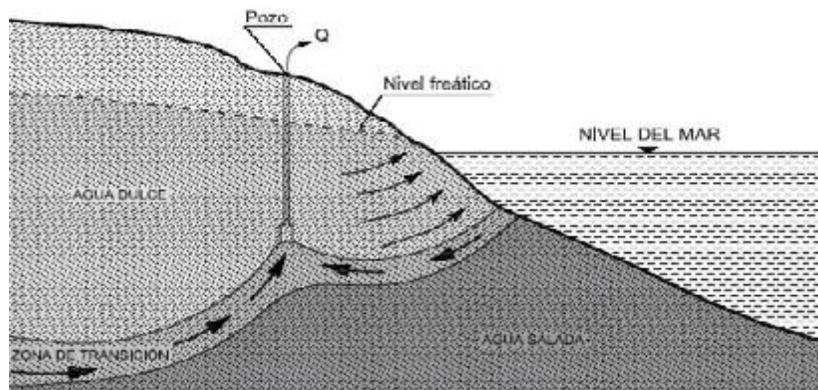


Figura 4.- Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación (López y Gómez, 2007).

Existen otros mecanismos de salinización diferentes de la intrusión marina, que pueden producirse individualmente o acompañar a la intrusión, como la disolución de sales y lixiviado de minerales, evaporación, mezcla con otras aguas salinizadas procedentes de pasados procesos de intrusión o presencia de aguas congénitas asociadas a los sedimentos de origen marino, vertidos industriales, entre otros (López y Gómez, 2007).

## **II.5.- Acuífero costero**

De forma sencilla, se puede definir un acuífero costero como aquella formación geológica capaz de almacenar agua y transmitirla, es decir que puede moverse a través del mismo, pero con la característica particular de que está conectado hidráulicamente con el mar, y en una mayoría de casos alguno de sus límites puede estar a su vez relacionado hidráulicamente con otros acuíferos del interior. De esta forma se pueden considerar como el último eslabón en el ciclo natural del agua, en su variante subterránea, puesto que reciben agua de otros acuíferos, de aguas superficiales o de lluvia directamente, para devolverla finalmente al mar (López y Gómez, 2007).

Considerando la naturaleza de estas formaciones puede hacerse una primera clasificación básica de acuíferos costeros en dos tipos principales: detríticos y carbonatados. Hay otro tipo de acuíferos menos frecuente, constituido por plataformas volcánicas, consistentes en rocas efusivas porosas y permeables con una morfología sensiblemente llana. Entre los acuíferos detríticos costeros podemos distinguir, atendiendo a su morfología, los siguientes deltas, aluviales costeros, llanuras costeras y piedemontes costeros. Todos ellos están constituidos principalmente por capas alternantes de gravas, arenas, limos y arcillas, con diferente geometría y continuidad espacial (López y Gómez, 2007).

Por su parte las llanuras detríticas costeras suelen dar lugar a acuíferos multicapa, libres y/o semiconfinados que yacen, bien sobre materiales de baja permeabilidad que aíslan hidráulicamente el conjunto superior, o bien sobre otras formaciones acuíferas más competentes (acuíferos carbonatados) de las que

reciben un aporte de recursos (Fig.5). Éstas a menudo afloran hacia el interior a modo de orla montañosa que limita la llanura y pueden continuar por debajo de la formación detrítica hasta entrar en contacto directo con el mar. Tal es el caso de las planas litorales del Levante español (López y Gómez, 2007)

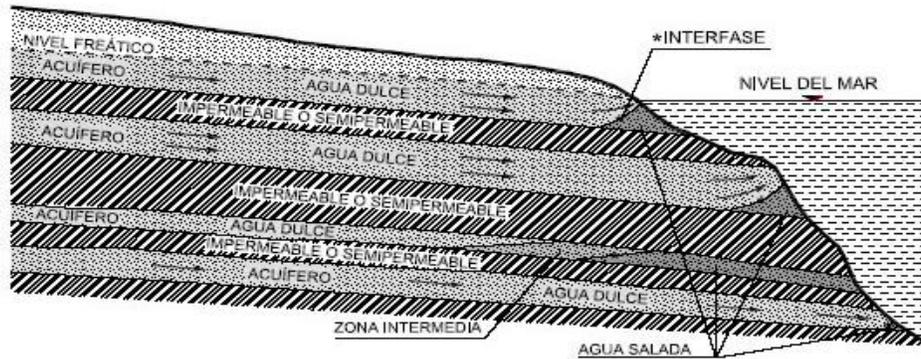


Figura 5.- Acuífero multicapa, con diferentes estados de intrusión salina (López y Gómez, 2007).

Esas formaciones carbonatadas, con mayor o menor grado de karstificación, constituyen otro tipo de acuíferos costeros. Éstos, salvo alguna excepción presentan un relieve bastante abrupto, lo que limita en muchos casos el desarrollo de una actividad productiva en su propio ámbito, aunque sí pueden ser fuentes de recursos para zonas situadas en sus proximidades. Estos acuíferos se encuentran representados en muchas partes del mundo, y particularmente tenemos importantes ejemplos en el mediterráneo (López y Gómez, 2007).

## II.6.- Parámetros fisicoquímicos que rigen la movilidad de las especies químicas en las aguas subterráneas

Los parámetros que controlan la movilidad de los iones y especies química son la temperatura, conductividad y el pH.

## Temperatura

Este parámetro es importante medirlo en el campo para interpretaciones detalladas de la composición química del agua, en aguas subterráneas la temperatura media anual mas el gradiente geotérmico regional (Sánchez, 2011).

## Conductividad

Este parámetro mide la facilidad del agua para conducir la corriente eléctrica. El agua destilada es prácticamente aislante, pero la conductividad aumenta rápidamente con la cantidad de iones disueltos. Su importancia se basa en que se mide muy fácilmente e indica aproximadamente la salinidad del agua (Sánchez, 2011).

La conductividad varía mucho con la temperatura, existen conductivímetros que introducen la corrección automática, en otros hay que medir la temperatura con un termómetro y realizar el ajuste manual (Sánchez, 2011).

## pH

Mide la acidez del agua, este es igual al  $-\log (H^+)$ , siendo  $(H^+)$  la actividad de iones hidrogeno. En aguas naturales oscila entre 5,5 y 8,5, en aguas subterráneas habitualmente es de 6,5 a 8,5 (Sánchez, 2011).

## **II.7.- Clasificación de las aguas subterráneas**

De forma general, las aguas naturales han sido clasificadas de muchas maneras tomando en cuenta su génesis, tipo de roca asociada, características fisicoquímicas, uso y otras propiedades, por lo que en esta investigación es de gran importancia conocer dichas clasificación. En ese sentido, las aguas subterráneas pueden ser clasificadas atendiendo a su génesis, uso e hidroquímica, entre otros.

### Clasificación según su génesis

De acuerdo a su origen las aguas se clasifican como meteóricas, connatas o fósiles, magmáticas, metamórficas y juveniles.

Las aguas subterráneas meteóricas son aquellas que en un tiempo reciente formaron parte del ciclo hidrológico. Presenta una composición isotópica igual o muy semejante al agua superficial; asimismo se derivan de lluvias, nieve, ríos y otros cuerpos de agua que han percolado desde la superficie hasta el acuífero (White et al. (1963) en Fagundo y González (2005)). Su composición está influida principalmente por la del agua de filtración y la del material del acuífero (Custodio y Llamas, 1976).

Las aguas connatas o fósiles son aquellas aguas que han sido incorporadas al acuífero durante la sedimentación, por lo que no han tenido contacto con la atmósfera en mucho tiempo (White et al. (1963) en Fagundo y González (2005)). Esta agua puede ser posteriormente expulsada después de la consolidación de la roca; sin embargo, si la litología después de haber experimentado el proceso diagenético es aún porosa puede quedar algo de agua en ella, que es considerada como agua fósil (Custodio y Llamas, 1976). Generalmente son salobres, enriquecidas en I, B, SiO<sub>2</sub>, nitrógeno combinado, Ca<sup>2+</sup> y baja concentración de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Mg<sup>2+</sup>, con respecto al agua de mar (White et al. (1963) en Fagundo y González (2005)).

Por su parte, las aguas magmáticas se asocian a eventos ígneos o hidrotermales, con concentraciones relativamente elevadas de Li, F, SiO<sub>2</sub>, S, CO<sub>2</sub> y baja concentración de I, B, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y nitrógeno combinado ((White et al. (1963) en Fagundo y González (2005)).

Asimismo, las aguas metamórficas, son las aguas que están o han estado en contacto con las rocas durante su metamorfismo (Custodio y Llamas, 1976). Se caracterizan por tener elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> y de B, baja

concentración de  $\text{Cl}^-$ , en relación con el agua de mar ((White et al. (1963) en Fagundo y González (2005)).

Finalmente, las aguas juveniles son aquellas que ascienden del interior de la Tierra, del manto terrestre o de la parte baja de la corteza, sin haber estado antes en la superficie. Nunca han formado parte del ciclo hidrológico (Custodio y Llamas, 1976).

### Sobre la base de su uso

La composición química de un agua natural, en función del uso que se le dé, se denomina calidad del agua. Para ello existen una serie de normas que regulan las concentraciones permisibles que debe poseer cada elemento o indicador de calidad según los diferentes usos (Fagundo y González, 2005). Estas se clasifican en

Suministro rural y urbano, regadío para la producción agraria, abastecimiento para los procesos industriales, producción de energía mecánica y eléctrica, agua para fines terapéuticos, consumo mediante embotellamiento, carga, descarga y transportación, conservación de la flora y fauna silvestre, reproducción y consumo de plantas y animales acuáticos, agua para fines recreativos y culturales.

### Según la base hidroquímica:

1. Clasificación de Alekine: este método toma en cuenta los tres aniones más importantes  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . A su vez, cada clase se divide en tres grupos, según el catión que predomine ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  o  $\text{Na}^+$ ). Y estas se clasifican en de acuerdo a su tipo en aguas bicarbonatadas (predominio de  $\text{HCO}_3^-$ ), aguas sulfatadas (predominio de  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y aguas cloruradas (predominio de  $\text{Cl}^-$ ), de acuerdo a sus clases en aguas cálcicas (predominio de  $\text{Ca}^{2+}$ ), aguas magnésicas (predominio de  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aguas sódicas (predominio de  $\text{Na}^+$ ), en cuanto a grupos se clasifican en  $r\text{HCO}_3^- > r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}$ ,  $r\text{HCO}_3^- < r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+} < r\text{HCO}_3^- + r\text{SO}_4^{2-}$ ,  $r\text{HCO}_3^- + r\text{SO}_4^{2-} < r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}$

$rMg^{2+}$ , es decir,  $rCl^- > Na^+$  y  $rHCO_3^- = 0$ . Este grupo no existe del tipo I (Fagundo y González, 2005).

2. Clasificación de Shchoukarev: este método emplea como índice de clasificación los iones que se encuentran en un porcentaje superior a 25% del total de miliequivalentes de aniones o de cationes (Fagundo y González, 2005):

Con relación a los aniones se clasifican en aguas bicarbonatadas, aguas sulfatadas, aguas cloruradas, aguas bicarbonatadas sulfatadas, aguas bicarbonatadas cloruradas, aguas sulfatocloruradas, aguas sulfatocloruradas bicarbonatadas.

Con relación a los cationes se clasifican en aguas cálcicas, aguas magnésicas, aguas sódicas, aguas calcicomagnesianas, aguas calcicosódicas, aguas magnésicosódicas, aguas cálcico-magnésico-sódicas.

3. Clasificación de Kurlov: este método es similar al anterior, pero toma en cuenta para la clasificación los iones que se encuentran en un porcentaje superior al 20% en lugar del 25% del total de miliequivalentes de aniones o cationes (Fagundo y González, 2005).
4. Clasificación de Palmer: este método se fundamenta en que las características de las aguas naturales dependen de la salinidad. Considera que las sales de ácidos fuertes originan salinidad, mientras que las de los ácidos débiles producen alcalinidad (Fagundo y González, 2005), de acuerdo con este método las aguas se caracterizan por las propiedades siguientes S1 salinidad primaria (por álcali), S2 salinidad secundaria (dureza permanente), S3 salinidad terciaria (acidez), A1 alcalinidad primaria (alcalinidad permanente) y A2 alcalinidad secundaria (alcalinidad temporal).

5. Clasificación de Scholler: este método toma en consideración la concentración en miliequivalentes por litro (meq/L) de los compuestos disueltos, obteniendo el orden de importancia siguiente: cloruros > sulfatos > bicarbonatos mas carbonatos > índice de intercambio de base (IIB) > relaciones entre aniones y cationes (Fagundo y González, 2005). Mediante este método se establecen los tipos de aguas siguientes:

Con relación al cloruro (Cl<sup>-</sup>) se clasifican en aguas hipercloruradas (>700 hasta saturación), aguas clorohalásicas (420-700), aguas cloruradas fuertes (140-420), aguas cloruradas medias (40-140), aguas oligocloruradas (15-40) y aguas cloruradas normales (<10).

Sobre la base del SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (r SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) se clasifican en aguas hipersulfatadas (>58), aguas sulfatadas (24-58), aguas oligosulfatadas (6-24) y aguas sulfatadas normales (<6)

Con relación a la concentración de rHCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + rCO<sub>3</sub><sup>-2</sup> se clasifican en aguas hipercarbonatadas (>7), aguas carbonatadas normales (2-7) y aguas hipocarbonatadas (<2).

#### Empleo de métodos numéricos

El tratamiento numérico de los datos químicos es imprescindible para poder interpretar procesos, características, factores antrópicos que puedan darse en las aguas subterráneas, por tanto las estimaciones estadísticas como la media aritmética, máximos y mínimos, moda, varianza, desviación estándar, intervalos de confianza, entre otros nos permitirán caracterizar dichos fenómenos. A su vez existen sistemas computarizados para la realización de mapas y diagramas que permiten visualizar las diversas informaciones obtenidas de forma más clara, entre ellos se tienen las figuras de Stiff y los diagramas de Piper (Gómez, 2009).

## Figuras de Stiff

En este diagrama se tienen 3 rectas paralelas igualmente espaciadas interceptadas por una recta perpendicular originando cuatro semirectas a la izquierda (campo de cationes), y cuatro semirectas a la derecha (campo de aniones). Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los meq/L del ion correspondiente y se unen los extremos, obteniendo un polígono representativo (Gómez, 2009). La figura 6 muestra un diagrama típico para las aguas subterráneas.

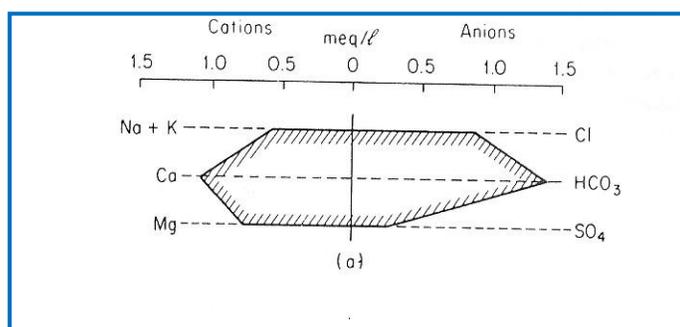


Figura 6.- Figuras de Stiff para aguas subterráneas (Freeze y Cherry, 1979).

## Diagramas de Piper

Se trata de un diagrama triangular compuesto que está constituido por dos triángulos equiláteros en los que se representan, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua de interés, y un campo romboidal central en que se representa la composición del agua deducida a partir de los aniones y cationes (Figura 7) (Gómez, 2009).

Es necesario reducir las concentraciones de los iones expresadas en meq/L a % meq/L, en los que se pueden reunir en cada triángulo tres aniones y/o tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como aniones se suele representar al  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ , y como cationes el  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  (Gómez, 2009).

A cada composición aniónica o catiónica le corresponde un punto en cada triángulo. Para obtenerlo basta trazar por el punto que representa el porcentaje de cada ion, una paralela al lado opuesto al vértice representa el 100% de dicho ion (Gómez, 2009).

En este tipo de diagramas no se representan concentraciones absolutas. Si se quiere tenerlas en cuenta se puede asociar a cada punto representativo de un análisis una cifra que indique la conductividad, residuo seco, o un círculo de radio proporcional a esas magnitudes o bien un listado adjunto (Gómez, 2009).

A pesar de este inconveniente y a la imposibilidad de representar más de tres iones por triángulo, estos diagramas permiten reflejar mezclas de aguas, precipitaciones. Disoluciones, procesos de intercambio iónico, así como representar varias muestras (Gómez, 2009).

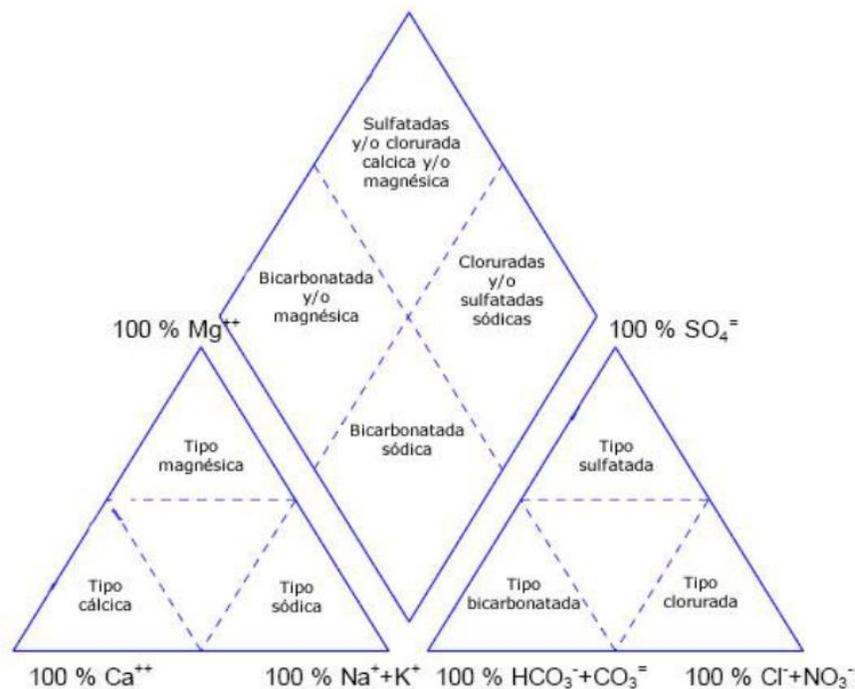


Figura 7.- Diagrama de Piper para aguas subterráneas (Fetter, 1994)

La geofísica mide características físicas a través de las cuales se hacen inferencias sobre las características de los estratos rocosos. Las medidas se hacen en la superficie de la tierra o en pozos. La prospección geofísica eléctrica u otras técnicas geofísicas más costosas, como sísmica, son herramientas de gran utilidad para llegar a conocer la geometría del sector a captar (Pulido y Rodríguez, 2007).

## **II.8.- Prospección geofísica**

El rápido crecimiento de las necesidades urbanas e industriales, aunado al crecimiento de las actividades agrícolas que han llevado al desarrollo de los sistemas de regadíos, han traído consigo la explotación intensiva de algunos acuíferos, con la consecuencia de que su nivel estático ha aumentado en profundidad, algunas veces, acompañado de un incremento en la salinidad de sus aguas (Astier, 1975).

Dentro de los métodos de prospección geofísica, el más empleado es el eléctrico con un (45%), seguido por la sísmica de refracción que ocupa el 14%; mientras que la testificación, ha alcanzado niveles de 31% y hasta casi 47% de uso (Astier, 1975).

Dada la importancia que revisten los métodos eléctricos, seguidamente es realizada una breve reseña de los mismos, resaltando, en qué consisten, los tipos y su principal aplicación.

### Métodos eléctricos

Los métodos de prospección eléctrica responden a 2 criterios a saber, los que utilizan el paso por el terreno de una corriente natural o artificial y lo que no hacen intervenir campos magnéticos. Éstos se clasifican en

Métodos que utilizan corrientes naturales que incluyen al método de la polarización espontánea y al método telúrico, mientras que los métodos que utilizan corrientes artificiales donde se encuentran a los métodos de las

equipotenciales, método de las relaciones de caída de potencial, método de resistividades y método de la polarización inducida.

Es importante destacar que dentro de los métodos de resistividades se encuentran los sondeos eléctricos, siendo este el método complementario a usar en esta investigación, por tanto es el que será descrito a continuación (Astier, 1975).

Los sondeos eléctricos consisten en establecer la curva de variación de la resistividad aparente con la profundidad de un terreno a través de medidas en superficie realizadas con ayuda de un dispositivo de cuatro electrodos llamados A, M, N y B en la figura 6, se ilustra la disposición de los mismos. La profundidad de alcance de la resistividad aplicada en superficie puede regularse variando la distancia entre los electrodos A, B a los cuales se les aplica corriente eléctrica, en la figura 8 se ilustra como las líneas de corriente penetran tanto cuanto mayor es la distancia interelectródica AB. Frecuentemente se emplean las siglas SEV o SE para designar los sondeos eléctricos (Astier, 1975).

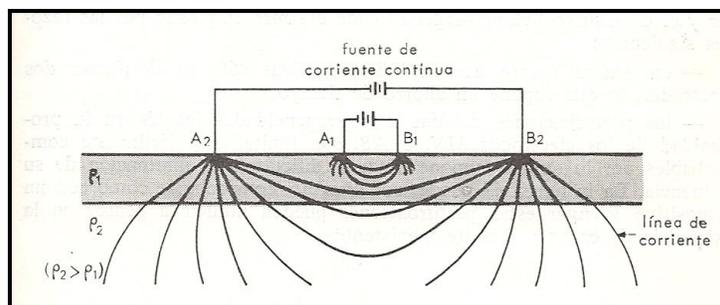


Figura 8.- Relación de la profundidad de la investigación con la distancia AB (Astier, 1975).

### Dispositivos de medidas

Los dispositivos electródicos más empleados son el Schlumberger y el Wenner, ambos rectilíneos y simétricos donde los 4 electrodos están alineados y el punto 0 es el centro común de AB y MN (Fig. 9).

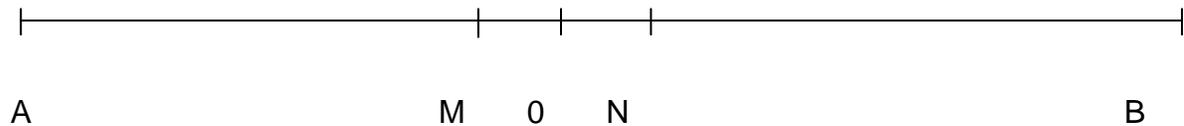


Figura 9.- Electrodo alienados de los dispositivos (Astier, 1975).

### Interpretación de los sondeos eléctricos

La primera fase de la interpretación de un sondeo eléctrico consiste en individualizar las diferentes capas resistivas y conductoras que lo componen y calcular la resistencia transversal de las primeras y la conductancia longitudinal de las segundas. Generalmente, este trabajo se realiza por superposición de ábacos trazados en coordenadas logarítmicas (Astier, 1975).

La segunda fase de la interpretación es la obtención de los espesores de las capas a partir de su conductancia o resistencia. Esto permite la identificación geológica de las capas y el conocimiento de su resistividad a escala regional (Astier, 1975).

### **II.9.- Marco legal sobre la calidad de agua en Venezuela**

De acuerdo al DECRETO N° 883 (GACETA OFICIAL 5.021, 1995), las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos permite clasificar a las aguas en atención a su calidad como tipo 1, 2 hasta las tipo 7.

Tipo 1: Aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él. Las aguas del tipo 1 se desagregan en los siguientes sub-tipos:

**Tabla 2.- Descripción de las aguas según su tipo atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

Sub Tipo 1A:	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes.
Sub Tipo 1B:	Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.
Sub Tipo 1C:	Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional.

Tipo 2: Aguas destinadas a usos agropecuarios. Las aguas del Tipo 2 se desagregan en los siguientes sub-tipos:

**Tabla 3.- Descripción de las aguas según su tipo atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

Sub Tipo 2A:	Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano.
Sub Tipo 2B:	Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario.

Tipo 3: Aguas marinas o de medios costeros destinadas a la cría y explotación de moluscos consumidos en crudo.

Tipo 4: Aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Las aguas del Tipo 4 se desagregan en los siguientes subtipos:

**Tabla 4.- Descripción de las aguas según su tipo atendiendo al Decreto 883  
(Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

Sub Tipo 4A:	Aguas para el contacto humano total.
Sub Tipo 4B:	Aguas para el contacto humano parcial

Tipo 5: Aguas destinadas para usos industriales que no requieren de agua potable.

Tipo 6: Aguas destinadas a la navegación y generación de energía.

Tipo 7: Aguas destinadas al transporte, dispersión y desdoblamiento de poluentes sin que se produzca interferencia con el medio ambiente adyacente.

A los efectos de esta norma, se establecen los siguientes criterios para la clasificación de las aguas, así como los niveles de calidad exigibles de acuerdo con los usos a que se destinen, aquí se presentan las relacionadas a consumo como agua potable así como los parámetros para aquellas de uso de riego.

Las aguas del sub-tipo 1A son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

**Tabla 5.- Rango de parámetros fisicoquímicos atendiendo al Decreto 883, aguas tipo 1A (Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

<b>Parámetro</b>	<b>Límite o rango máximo</b>
Oxígeno disuelto ( O.D )	mayor de 4,0 mg/l . (*)
pH	mínimo 6,0 y máximo 8,5.
Color real	menor de 50, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 25, UNT.
Fluoruros	menor de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 2000 NMP por cada 100 ml.

(\*)Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%

Las aguas del sub-tipo 1B son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

**Tabla 6.- Rango de parámetros fisicoquímicos atendiendo al Decreto 883, aguas tipo 1B (Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

<b>Parámetro</b>	<b>Límite o rango máximo</b>
Oxígeno disuelto (O.D.)	mayor de 4,0 mg/l . (*)
pH	mínimo 6,0 y máximo 8,5.
Color real	menor de 150, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 250,UNT.
Fluoruros	menor de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 10000 NMP por cada 100 ml.

(\*)Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%

Las aguas de los sub-tipo 1A y 1B no deberán exceder, además, los siguientes límites:

**Tabla 7.- Límites para aguas tipo 1A y 1B atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

<b>Elemento o compuesto</b>	<b>Límite</b>
Aceites minerales	0,3 mg/l
Aluminio	0,2 mg/l
Arsénico total	0,05 mg/l
Bario total	1,0 mg/l
Cadmio total	0,01 mg/l
Cianuro total	0,1 mg/l
Cloruros	600 mg/l
Cobre total	1,0 mg/l
Cromo Total	0,05 mg/l
Detergentes	1,0 mg/l
Dispersantes	1,0 mg/l
Dureza, expresada como CaCO <sub>3</sub>	500 mg/l
Extracto de carbono al cloroformo	0,15 mg/l
Fenoles	0,002 mg/l
Hierro total	1,0 mg/l
Manganeso total	0,1 mg/l
Mercurio total	0,01 mg/l
Nitritos + Nitratos (N)	10,0 mg/l
Plata total	0,05 mg/l
Plomo total	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sodio	200 mg/l
Sólidos disueltos totales	1500 mg/l
Sulfatos	400 mg/l
Zinc	5,0 mg/l
<b>Biocidas</b>	
Organofosforados y Carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l

Las aguas del Sub-Tipo 1C son aquellas en las cuales el pH debe estar comprendido entre 3,8 y 10,5.

Las aguas del Sub-Tipo 2A son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

**Tabla 8.- Límites para aguas tipo 2A atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

<b>Parámetro</b>	<b>Límite o rango máximo</b>
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100 ml
Organismos coliformes fecales	menor a 100 NMP por cada 100 ml.

Las aguas del Sub-Tipo 2B son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

**Tabla 9.- Límites para aguas 2B atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

<b>Parámetro</b>	<b>Límite o rango máximo</b>
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 5000 NMP por cada 100 ml.
Organismos coliformes fecales	menor a 1000 NMP por cada 100 ml.

Las aguas de los Sub-Tipo 2A y 2B no deberán exceder, además, los siguientes límites:

**Tabla 10.- Límites para aguas 2A y 2B atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995)**

<b>Elementos o compuestos</b>	<b>Límites</b>
Aluminio	1,0 mg/l
Arsénico	0,05 mg/l
Bario	1,0 mg/l
Boro	0,75 mg/l
Cadmio	0,005 mg/l
Cianuro	0,2 mg/l
Cobre	0,20 mg/l
Cromo Total	0,05 mg/l
Hierro Total	1,0 mg/l
Litio	5,0 mg/l
Manganeso Total	0,5 mg/l
Mercurio	0,01 mg/l
Molibdeno	0,005 mg/l
Níquel	0,5 mg/l
Plata	0,05 mg/l
Plomo	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sólidos disueltos totales	3000 mg/l
Sólidos flotante	Ausentes
Vanadio	10,0 mg/l
Zinc	5,0 mg/l
<b>Biocidas</b>	0,1 mg/l
Organofosforados y carbamatos	
Organoclorados	0,2 mg/l
<b>Radiactividad</b>	
Actividad $\alpha$	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l)
Actividad $\beta$	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l)

### **III.- ZONA DE ESTUDIO**

En esta sección se presentan los rasgos más importantes de la zona de estudio, incluyendo su ubicación, geología regional y local, hidrología, hidrogeología, relieve, vegetación y suelos.

#### **III.1.- Ubicación**

El área de estudio está ubicada al suroeste de la Península de Paraguaná, al norte del estado Falcón, en las inmediaciones de la intersección entre los límites municipales correspondiente a Los Taques, Carirubana y Falcón. Específicamente corresponde a un sector entre la ciudad de Punto Fijo y los centros rurales, La Trinidad y San Antonio, una parte pertenece al municipio Los Taques y el resto al municipio Carirubana.

Geográficamente la zona de estudio está ubicada entre las coordenadas geográficas, WGS 11°43'00" y 11°45'30" de latitud norte y 70°7'00" y 70°9'30" de longitud oeste. Las coordenadas UTM, datum Regven WGaS 84, corresponden al huso 19, 1295570 y 1299960 m Norte; 373780 y 378290 m Este. La figura 10, presenta la ubicación de la misma.

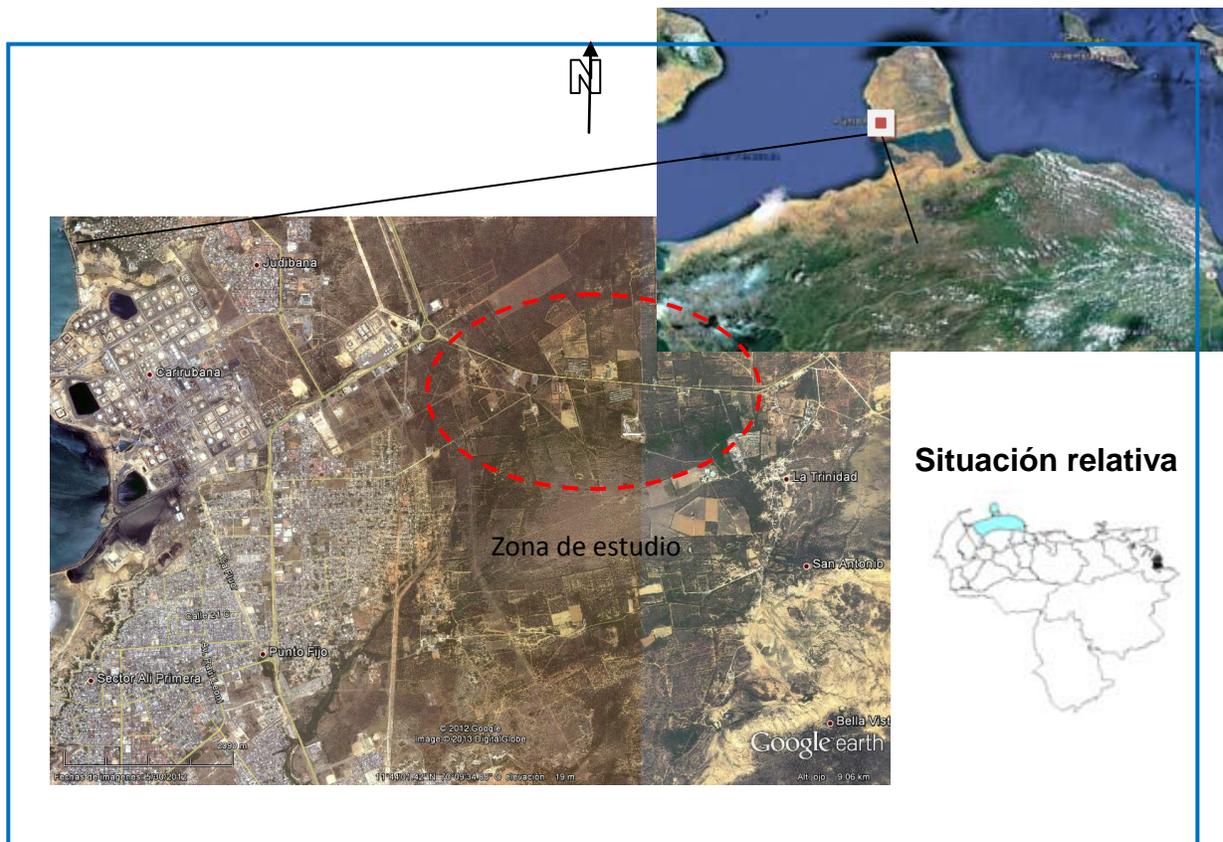


Figura. 10.- Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio está constituida por cinco (5) parcelas, cuatro (4) en el sector el Taparo y una (1) en el sector San Antonio. En la figura 11, se puede observar la ubicación de las parcelas señaladas.

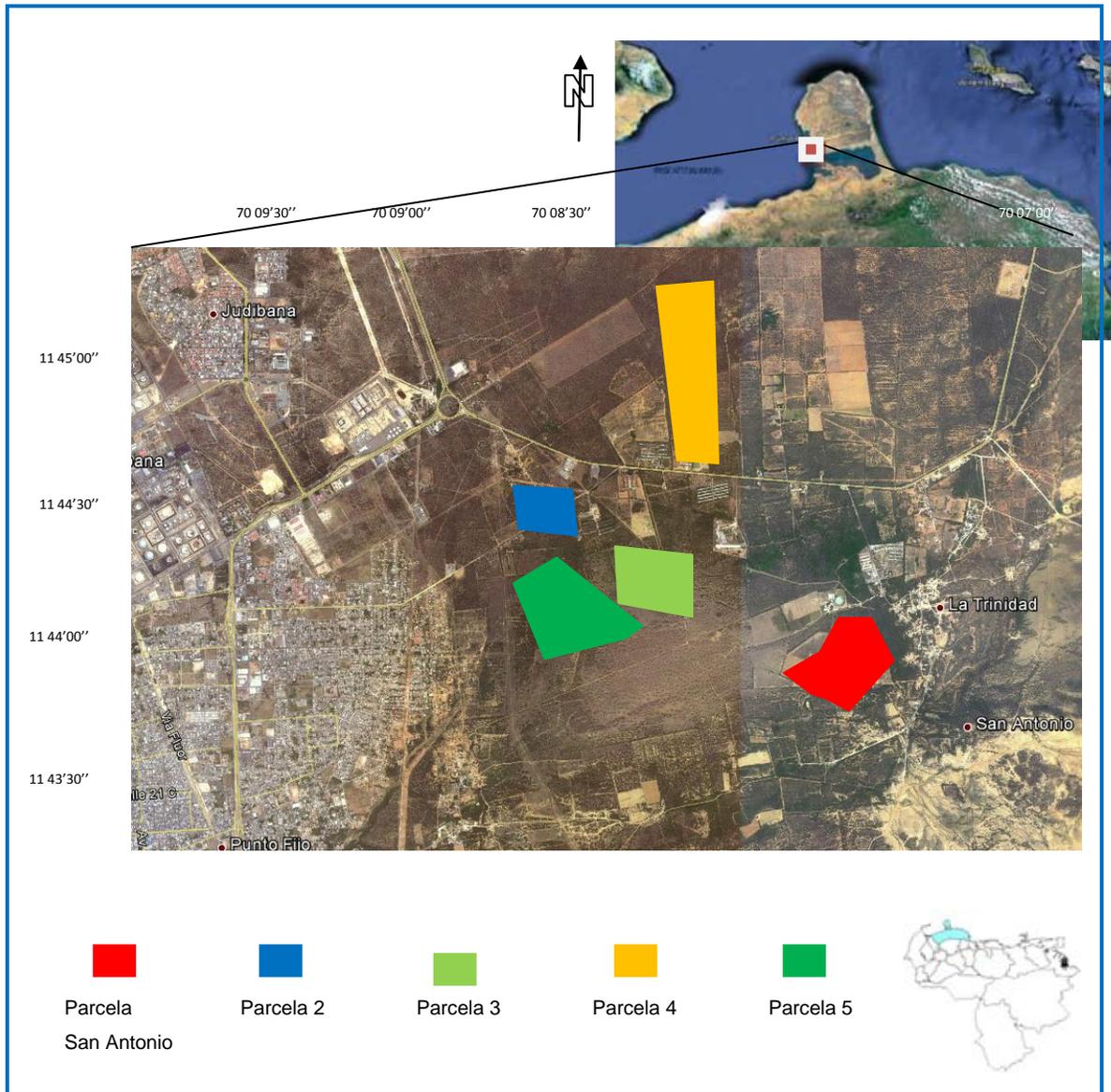


Figura. 11.- Ubicación de las parcelas del estudio (modificado de INAMEH, 2012).

### III.2.- Geología Regional

La Península de Paraguaná, situada en el litoral norteño del Estado Falcón, constituye la avanzada más septentrional de la tierra firme venezolana en el Mar Caribe. Comprende unos 2.500 Km<sup>2</sup> de superficie y se une al resto de Falcón por una estrecha faja de dunas y salinetas denominada Istmo de Los Médanos, de unos 30 Km de longitud por unos 5 Km de anchura y altitud media de alrededor de

6 m (Codecido et al., 1974). Regionalmente, la estructura de la península se asemeja a la de un domo cuyos flancos, buzan suavemente hacia afuera desde un núcleo central ígneo-metamórfico conocido como Arco de Cocodite y Pilar de Santa Ana (Ayala, 2006).

En la península de Paraguaná están presentes remanentes ígneo-metamórficos que afloran en el Macizo de Cocodite, situado al oeste de Pueblo Nuevo y al norte de San José de Cocodite, en el cerro Santa Ana; así como, manchas aisladas de una complejo ultramáfico, que afloran en los cerros de Tausabana, El Rodeo y Arajó (Ayala, 2006).

La mesa de Cocodite cuya altura no excede los 200 m de altitud, está constituida en gran parte por el granito de Paraguaná, también llamado plutón granítico de El Amparo, que consiste de una roca compuesta por 30% de cuarzo, 60% microclino y plagioclasa, biotita y hornblenda en un 10%, con titanita, circón, apatito y granate como accesorios. El cuerpo presenta facies dioríticas y está asociado a un sistema de diques ácidos y básicos (González de Juana et al., 1980).

Discordantemente sobre el complejo antes mencionado, o en contacto de falla con él, yace una sucesión de unos 1.400 m. de espesor de estratos marinos Mesozoicos levemente metamorizados, cuyos afloramientos se observan en diferentes localidades de la Mesa de Cocodite, con localidad tipo al oeste de la población de Pueblo Nuevo de donde deriva el nombre de la formación. Esta sucesión consiste principalmente en filitas carbonosas, pizarras y metaargilitas, con capas lenticulares de calizas grises recristalizadas, cuarcitas, metaareniscas conglomeráticas feldespáticas e intercalaciones lenticulares de conglomerados guijarrosos principalmente de cuarzo blanco. La unidad presenta también delgadas capas de ftanita recristalizada. Las calizas contienen ejemplares muy ocasionales de amonites, se puede inferir una edad jurásico-cretácea para la Formación Pueblo Nuevo (Codecido et al., 1974).

En la extensión occidental de la Mesa de Cocodite son observados diques ácidos predominantemente graníticos y riolíticos, intrusivos en la parte inferior de la

Formación Pueblo Nuevo allí expuesta. Hacia la parte central, en la quebrada de Chirache, diques similares cortan al Plutón Granítico de El Amparo, y en la región de Miralejos a la sucesión metamórfica (Codecido et al., 1974).

Hacia el flanco noroccidental de la Mesa de Cocodite aflora la Formación Cantaure, de extensión limitada y con un espesor de unos 75 m. La secuencia comienza con una brecha compuesta por fragmentos de *Balanus* y bloques de cuarzo y granito. A pesar de que no se observa una sección completa, es aparente que continúa con una secuencia de lutitas verdosas, localmente yesíferas y jarosíticas, intercaladas con limo y niveles calcarenosos. Estos últimos son ricos en faunas malacológicas, generalmente indicativas de sedimentación de aguas someras. Las lutitas adyacentes a estas capas contienen las mejores microfaunas. Estas, junto con las calcareniscas, guardan gran semejanza con la Formación Querales de Falcón central. La edad de la Formación Cantaure se ha determinado a base de su microfauna. Las asociaciones de foraminíferos pertenecen a las zonas de *Globigerinatella* insueta y *Praeorbulina* glomerosa, cuyas edades se pueden situar en la parte superior Mioceno Inferior (Codecido et al., 1974).

Finalmente, la Formación Paraguaná está formada por sedimentos del Plioceno con terrazas del Cuaternario hacia la costa. Los sedimentos pliocenos constituyen una secuencia sencilla que se inicia con lutitas calcáreas fosilíferas, lutitas estériles con intercalaciones de limo del Miembro El Hato, depósitos biostromales de bancos de ostras y pecten y culmina con depósitos de algas del Miembro de Amuay (Codecido et al., 1974).

Localmente, en particular en las zonas circunvecinas a los cerros de Santa Ana, Arajó y Tausabana como también hacia el noreste, se desarrolla una facies arenosa de color marrón rojizo, posiblemente más joven que los arrecifes de algas (Codecido et al., 1974).

Una facies conglomerática denominada El Alto suprayacen a las calizas biostromales y exhibe un contacto gradado con ellas. Es posible que este material terrígeno sea equivalente lateral de la Formación Coro. Los mejores desarrollos

del Conglomerado de El Alto se encuentran en Guaquira Arriba y en el Cerro El Alto al norte de Pueblo Nuevo (Codecido et al., 1974). En la figura 12, se presentan las ubicaciones de cada una de las formaciones ya mencionadas.

### **III.3.- Geología local**

En el área de estudio correspondiente al sector del Taparo, afloran en mayor proporción sedimentos del Plioceno, correspondientes específicamente a la Formación Paraguaná, y en menor proporción a las terrazas y aluviones correspondientes al Cuaternario. Entre las litologías presentes se encuentran materiales carbonáticos, muy fosilíferos y compactos, que componen casi la totalidad de la superficie de la zona; además están presentes secuencias bandeadas de limolitas que se alternan con finas arcillitas que constituyen muy probablemente la unidad permeable del acuífero, presentando aproximadamente un espesor promedio de 30 m, hasta llegar a las lutitas marinas del miembro El Hato (INAMEH, 2012).



### III.4.- Clima

En la zona de estudio predomina el clima semi-árido, de acuerdo con los datos obtenidos de la estación Jadacaquiva, la más cercana al área de interés, registra precipitaciones promedio de lluvia anual de 304.8 mm, con evaporación media anual de 2947.4 mm y temperatura media anual de 25.9 °C. Esta condición climática imperante favorece el desarrollo de vegetación arbustiva espinar y cactáceas, característica del área de estudio, en la tabla 2 se puede ver los datos referentes a precipitaciones y temperaturas registradas por la estación Jadacaquiva, mientras que el figura 13 muestra el comportamiento de los datos registrados por dicha estación. (INAMEH, 2012).

**Tabla 11.- Datos de precipitación y temperatura, estación Jadacaquiva (INAMEH, 2012).**

	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
PP (mm)	13.5	8.2	4.5	8.5	13.8	10.7	15.7	16.7	39.8	64.8	78.2	51.3	304.8
EVP (mm)	193.0	221.9	269.7	264.6	281.0	274.8	284.5	286.5	268.6	231.7	190.9	180.1	2947.4
T °C	25.2	25.1	25.8	27.1	27.6	27.7	27.3	27.8	28.2	27.6	26.5	25.7	25.9

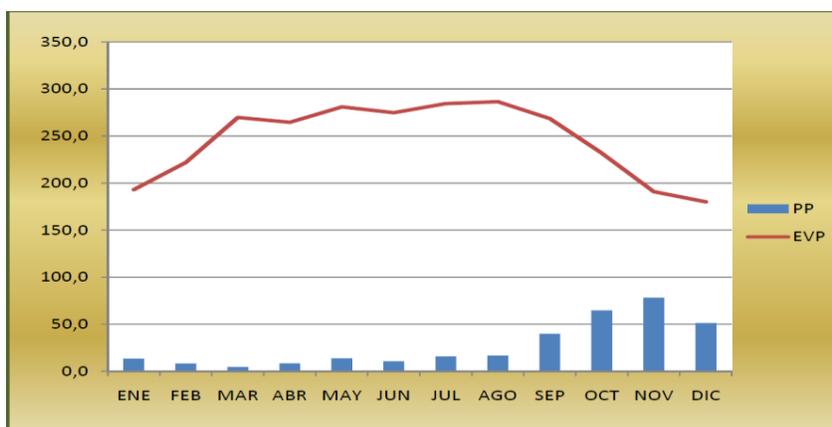


Figura 13.- Precipitación y evaporación promedio en mm de la estación Jadacaquiva (1969-2000) (INAMEH, 2012).

### **III.5.- Fisiografía y geomorfología**

La topografía es plana en su totalidad con muy poca diferencia en la elevación, cuya altura generalmente no sobrepasa los 50 m. y en las cuales los afloramientos son escasos, formando una extensa llanura costera que culmina en el mar con playas arenosas, debido al bajo buzamiento que varía entre 0 y 20 grados. En el área de El Taparo, los desniveles del terreno aproximados son de 5 m y en general las altitudes están entre 20 m a 25 m, con pendientes muy suaves en el orden del 0 al 2% (INAMEH, 2012).

El proceso de formación que dió origen a gran parte de la Península de Paraguaná, es indicativo del relieve predominante, los sedimentos depositados en ambiente marino de edad Terciaria pertenecientes a la Formación Paraguaná. La geomorfología de las rocas terciarias en Paraguaná, y específicamente en la parte sur occidental de la península es sumamente suave, en muchos casos, las capas son casi horizontales (INAMEH, 2012).

### **III.6.- Hidrología**

Las características climáticas mencionadas influyen en el comportamiento de la red hidrográfica. Estas condiciones de semi-aridez limitan el flujo superficial de agua sólo en la temporada lluviosa, quedando los escasos cursos de aguas presentes de carácter intermitente. De ocurrir precipitaciones con intensidades considerables en muy corto tiempo el escurrimiento de agua superficial es consumido por la alta tasa de evaporación y la infiltración, lo que limita el tiempo de permanencia de agua en escurrimiento en la superficie del terreno (INAMEH, 2012).

En el área de El Taparo, todos los cursos de aguas presentes son de régimen efímeros, de acuerdo a las características de sus cauces poseen un patrón de flujo de tipo dendrítico. La dirección de flujo de estos cursos intermitentes es hacia el este, confluyendo en un solo cauce que desemboca en la quebrada Guaranao. Ésta representa el curso de agua principal, cuyo flujo es en sentido suroeste desembocando en el Golfete de Coro (INAMEH, 2012).

### **III.7.- Hidrogeología**

Las características geomorfológicas, conjuntamente con la geología, y condiciones climáticas, intervienen directamente sobre el comportamiento de las unidades hidrogeológicas, así como en las forma de ocurrencias de las aguas subterráneas, en el área de estudio (INAMEH, 2012).

Desde el punto de vista de las Regiones Hidrogeológicas, corresponde a la Provincia Planicie Costera, Sub Provincia Planicie Costera del Mar Caribe, Cuenca Planicie Península de Paraguaná, donde es característico el desarrollo de acuíferos litorales costeros, cuya dinámica sedimentaria se caracteriza por escasos aportes de sedimentos de las quebradas existentes en la zona, predominando el material sedimentario en el intervalo de las arenas, limos y arcillas (INAMEH, 2012).

De acuerdo a las características geomorfológicas y estructurales, las áreas con mayores potencialidades para la acumulación de las aguas subterráneas, corresponde a los sedimentos aluvionales cuaternarios, donde el agua subterránea se acumula en las capas clásticas de dichos sedimentos (INAMEH, 2012).

La hidrogeología de la zona está influenciada por dos formas de ocurrencias de acumulación de las aguas, a través del flujo y la escorrentía que atraviesa los intersticios porosos de los sedimentos Cuaternarios. Otra forma de almacenamiento se debe a la infiltración directa en rocas sedimentarias por distintos patrones de fracturamiento, planos de fallas y grietas que al unirse van conformando áreas de mayor tamaño, ya que estos debilitan la cohesión de las rocas, generando porosidad secundaria y formación de reservorios para la acumulación de las aguas subterráneas (INAMEH, 2012). En la figura 14 se puede ver un mapa hidrogeológico de la zona de estudio.

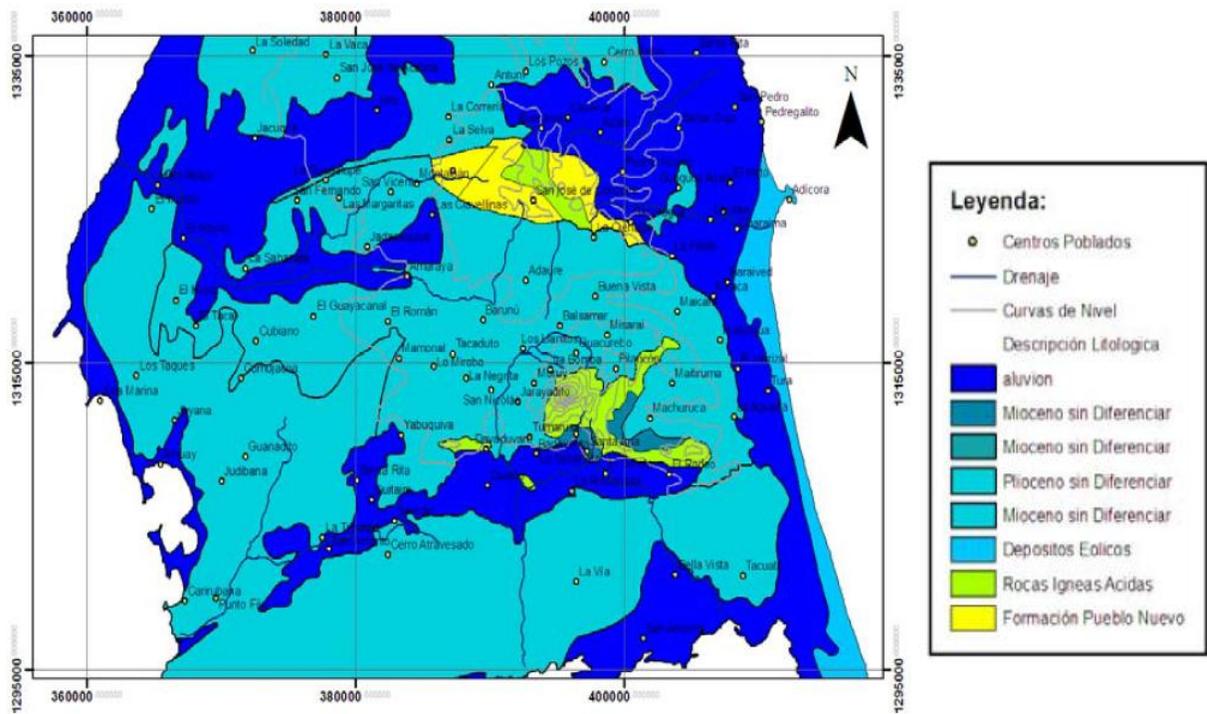


Figura 14.- Mapa Hidrogeológico de la Península de Paraguaná, Estado Falcón (INAMEH, 2012).

## IV.- ANTECEDENTES

En esta sección se presentan los diversos estudios relacionados con el área de las aguas subterráneas, tanto a nivel internacional como nacional, con el propósito de conocer el estado actual de los estudios relacionados con la geoquímica de las aguas subterráneas, las metodologías usadas en estos estudios y las herramientas hidrogeoquímicas implementadas. Estos servirán de apoyo al presente trabajo de investigación.

### IV.1.- Internacionales

Baghvand et al. (2010) realizaron un estudio de la calidad hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de un acuífero ubicado en Irán Central, adyacente al desierto Kavir. En esta zona el agua subterránea constituye más de la mitad del suministro de agua demandada en Irán anualmente, por lo que la importancia de las aguas subterráneas en la zona puede ser sobrestimada debido a que es el único recurso disponible para el consumo y la agricultura. Para cumplir con los objetivos propuestos en este estudio, los autores tomaron 20 muestras en pozos perforados, a las cuales se les determinaron parámetros como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), los iones mayoritarios como  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$ . Estos autores determinaron que las aguas de la zona están dominadas por aguas ricas en  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$ , diferentes a las aguas comunes en Irán ( $Ca^{2+}$ - $HCO_3^-$ ), concluyendo que las mismas aguas no son aceptables para el consumo debido a la alta salinidad que presentan.

Mondal et al. (2010) estudiaron el proceso de interacción entre aguas subterráneas y aguas salinas en Sachas al SO de India, a través de análisis de iones mayoritarios; para ello se tomaron 18 muestras de aguas subterráneas a las cuales les determinaron parámetros como pH, conductividad eléctrica y los iones mayoritarios  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  y  $NO_3^-$ , obteniendo que

las aguas de la parte central de son aptas en, mientras que hacia los canales y bahías no pueden ser usadas para el consumo/riego, debido a la presencia de 2 tipos de aguas subterráneas, dulces y saladas, generando una fuerte afección del agua dulce por parte de la intrusión de los canales y bahías.

Ketata et al. (2011) realizaron un estudio hidrogeoquímico y estadístico de las aguas del sur de Gabes en Túnez, donde las aguas contienen altos nivel de fluoruros ( $F^-$ ), lo cual representan un problema de calidad a nivel nacional, por lo que para cumplir con los objetivos de este trabajo, se tomaron 2 o 3 muestras por años desde 1995-2003 en invierno y verano, y se les determinaron parámetros como pH, salinidad y niveles de concentración de  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $F^-$ ,  $HCO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$ , resultando que las muestras mostraron pequeñas variaciones de una estación a otra y de un año a otro. Estos autores concluyen que la salinidad y los iones mayoritarios están influenciados por infiltración del agua de lluvia en las zonas de recarga, además de la contribución de un acuífero al Norte de la zona que es relativamente salino.

Jamshidzadeh y Mirbagheri (2011) evaluaron la cantidad y calidad del agua subterránea de la cuenca Kashan, en Irán Central. Con el propósito de conocer la posibilidad de que las mismas puedan ser usadas para el consumo y para la agricultura. Para ello, estos autores captaron 53 muestras de 21 pozos, a las que se les determinaron los parámetros como pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos (SDT); así como los cationes y aniones mayoritarios  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $Cl^-$  los resultados obtenidos les permitió señalar que la cantidad de agua disminuyó aproximadamente 7.93 m. entre 1990 y 2006, mientras que la calidad del agua, no es apta para el consumo en muchas partes de la cuenca, ya que es afectada por la intrusión de un lago salino ubicado en la cuenca bajo estudio.

Monjerezi et al. (2011) realizaron un estudio de los procesos hidrogeoquímicos de las aguas subterráneas de una área del valle del Rio Shire, en Malawi, a fin de determinar la relación entre la composición química de las aguas subterráneas y la

geología de dicha zona. Para comprender los procesos hidrogeoquímicos que controlan la variación espacial de la composición química del agua subterránea, se tomaron 247 muestras a las que les midieron los parámetros pH, conductividad eléctrica y temperatura; asimismo determinaron las especies  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  y  $SiO_2$ , además de sólidos totales disueltos (SDT). Los resultados indican que el carácter químico en la zona es extremadamente variable, debido a factores como bajo contenido de sólidos disueltos totales, meteorización de aluminosilicatos por percolación del agua supersaturada de  $CO_2$ , además del intercambio catiónico en los minerales de arcilla entre  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ .

Atwia et al. (2012) realizaron un estudio hidrogeoquímico y geofísico de las aguas subterráneas de la zona de Burg El-Arab, al noreste de la costa de Egipto. En esta zona los autores recolectaron 34 muestras de aguas, a las que se les midieron los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, conductividad y sólidos disueltos totales, también determinaron las especies químicas  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  y  $HCO_3^-$ , mientras que el estudio geofísico implicó la aplicación de los SEV a través de 42 medidas de resistividad con la configuración Schlumberger, donde la distancia de los electrodos fue gradualmente aumentada. A partir de este estudio los investigadores determinaron que las aguas predominantes son cloruradas sódicas, en algunas zonas con baja salinidad así como en otras con alta salinidad, concluyendo que las aguas no son aptas para el consumo debido a su alta concentración de  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$ .

#### **IV.2.- Nacionales**

Rodríguez (2000), realizó un estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la zona La Fuente-Paraguachí, Isla de Margarita, Venezuela. En esta se tomaron 46 muestras de aguas subterráneas, tomándose en cuenta el aspecto de las mismas a saber, olor y sabor. A su vez, se les midieron los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura, además se determinaron las especies químicas  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $SiO_2$ , traza como Rh, Ba,

Pb y SDT. Este autor concluyó que un grupo de las aguas de acuerdo a los SDT son dulces, mientras que el otro grupo son salobres, también identificó aguas bicarbonatadas magnésicas, cloruradas magnésicas, cloruradas sódicas. Finalmente, las relaciones interiónicas Na vs Cl, muestran concentraciones anómalas, asociándolo a procesos de mezcla entre aguas dulces y saladas.

Kassabi (2002), realizó el estudio hidrogeoquímico y remediación de aguas subterráneas de la cuenca del Lago de Valencia. En esta se tomaron 21 muestras a las que se les midieron los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad, alcalinidad y sólidos suspendidos, a su vez se determinaron las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$ . Este autor concluyó que en la mayoría de las aguas las concentraciones de las especies determinadas presentan relación con la litología, sin embargo existen 3 muestras que arrojan indicios de actividad antrópica, por su parte la concentración de nitratos es elevada, relacionándolo con el factor antrópico. Finalmente, en la reacción catalítica usada para remover el nitrato, el % de remoción varía según el % de matriz de agua tratada, es decir, a mayor matriz menor es el % de remoción de nitratos.

Barreto (2006), estudió hidrogeoquímicamente las aguas superficiales de la zona costera comprendida entre las bocas de los ríos Yaracuy y Tocuyo, estado Falcón, Venezuela. En esta se tomaron 71 muestras de aguas distribuidas de la siguiente forma, 2 de quebradas, 7 de ríos, 19 de caños, 18 de albuferas, 5 del Golfete de Cuare, las mismas se tomaron en 2 periodos de muestreo. A dichas muestras se les midieron los parámetros fisicoquímicos pH, Eh, temperatura, conductividad, salinidad y sólidos suspendidos totales (SST), además se determinaron las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ . El autor concluyó que el  $\text{Na}^+$  es el catión dominante, seguido por  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , en el caso de los aniones, el  $\text{Cl}^-$  es el más dominante, seguido por  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  lo que permitió identificar aguas Na-Cl.

Ayala (2006) estudió los procesos, factores que afectan la calidad química de las aguas subterráneas de la región Santa Ana, Península de Paraguaná, estado

Falcón, Venezuela. En esta zona se recolectaron 36 muestras de aguas a las que se le midieron los parámetros pH y conductividad y se determinaron las especies  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ , lo que permitió detectar la presencia de una variedad de aguas, entre las que destacan cloruradas sódicas, cloruradas magnésicas y cloruradas cálcicas; a su vez identificó 2 muestras que arrojaron valores de aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas magnésicas. Ayala (2006) concluyó que solo el 6% de las aguas de la zona son aptas para el consumo; mientras que el 94% de las mismas, por sus altos valores de  $\text{Na}^+$   $\text{Cl}^-$  no son de buena calidad química para tal fin.

Gamboa (2007) realizó un estudio hidrogeoquímico y geofísico en el sector La Cabrera, Ocumare del Tuy, estado Miranda, Venezuela. Para ello, recolectó 8 muestras de aguas subterráneas directamente de pozos de bombeo a los que se le midieron parámetros fisicoquímicos temperatura, pH, Eh y conductividad; asimismo determinó la proporción de especies  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SiO}_2$ . La aplicación del diagrama de Piper permitió identificar 2 tipos de aguas: 1.- sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas, mientras que con las figuras de Stiff, determinó aguas cloruradas sódicas y/o magnésicas y bicarbonatadas sódicas y/o magnésicas.

Faublack (2008), realizó un estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de los sectores Barbacoas, Edo. Aragua y Cachamas, Edo. Guárico, Venezuela. En este se tomaron un total de 16 muestras de aguas subterráneas a las cuales se les midieron los parámetros fisicoquímicos pH, Eh, temperatura y conductividad. Además, se determinaron las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  y algunos traza como Fe, Rb, Li, Sr, Cu, Ni, Zn, B, Ba. Este autor concluyó que en la zona de estudio se identificaron 2 grupos de aguas, unas bicarbonatadas magnésicas, y las otras sulfatadas magnésicas. A su vez, el nitrato registrado es producto de las actividades agrícolas practicadas en la zona.

Oropeza (2009), realizó un estudio hidrogeoquímico de las agua subterráneas de la cuenca de los Valles del tuy, en el sector de Charallave-Paracotos, Edo.

Miranda, Venezuela. En esta se recolectaron 22 muestras de agua subterránea y 3 muestras de aguas superficiales, a las que se les midieron los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura, a su vez se determinaron las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  y algunos traza como Cd, Li, Sr, Zn y Mn. En esta zona se identificó 2 tipos de agua a saber, cálcicas/magnésicas y bicarbonatadas cálcicas y/magnésicas, asimismo el 99,75% de las aguas no son aptas para el consumo producto de la elevada concentración de Cd.

Mujica (2011), realizó el estudio de los cuerpos evaporíticos de la costa nor-central del estado Falcón. En este se tomaron 13 muestras de salmueras, 7 muestras de costras salinas y 11 muestras de sedimentos superficiales, a las cuales se les determinó alcalinidad, sólidos disueltos totales (SDT) y densidad, mientras que las especies químicas determinadas fueron,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y algunos traza como Al, Fe, Si, Li, B, Sr, Ba. Este autor concluyó que se encontraron salinas del tipo Na-(Mg)-Cl-(SO<sub>4</sub>), Na-(Ca)-(Mg)-Cl-(SO<sub>4</sub>) y Na-(Ca)-(Mg)-Cl, además de Aguas ricas en Ca+Mg, pobres en HCO<sub>3</sub>. Donde  $\text{Ca} \gg \text{Mg}$  y producto de la precipitación de yeso, se obtiene una salmuera Ca-Na-Mg-Cl.

Kutos (2012) realizó un estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la Laguna de Taigüaigüay, estado Aragua, Venezuela, a través de la captación de 18 muestras a las cuales se les midieron los parámetros fisicoquímicos temperatura, conductividad, pH y Eh; asimismo se determinaron  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  y los elementos traza Li, B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr y Ba. En esta zona se identificaron 2 tipos de aguas a saber, cloruradas bicarbonatadas sódicas y/o cálcicas y cloruradas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, dichas aguas se clasificaron como aguas dulces donde el 67% de las mismas no están disponibles para el uso doméstico.

## **V.- METODOLOGIA**

Posterior a la realización de la recopilación de información bibliográfica que sustente esta investigación, a saber todo lo referente a aguas subterráneas, así como la geología de la zona de estudio y diversos factores que intervienen en ésta, asimismo a partir del inventario otorgado por el INAMEH (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) el cual contiene información como ubicación de los pozos, conductividades de los mismos, se procedió a elaborar la metodología de trabajo que fue seguida, incluyendo el plan de muestro de la zona de estudio.

### **V.1.- Plan de muestreo**

La programación para la asignación de los puntos de toma de muestra está ajustada a la distribución de los pozos actualizados, a los valores de conductividad registrados y a las zonas que faltaron por explorar, todo esto concretado en el pasado trabajo de campo realizado en septiembre del 2012, por el INAMEH.

La distribución de los pozos actualizados en septiembre de 2012 representa una rejilla de muestreo muy densa para la dimensión del área de estudio, por esta razón fueron escogidos pozos que se encuentren a una distancia entre los 500 a 1000 m aprox., espacio suficiente para una buena representación de las muestras en el área de estudio.

De acuerdo a esto se presentan los pozos visitados y de los cuales se tomaron muestras de aguas subterráneas para su posterior análisis. La figura 15 muestra la ubicación de cada uno de los pozos muestreados.

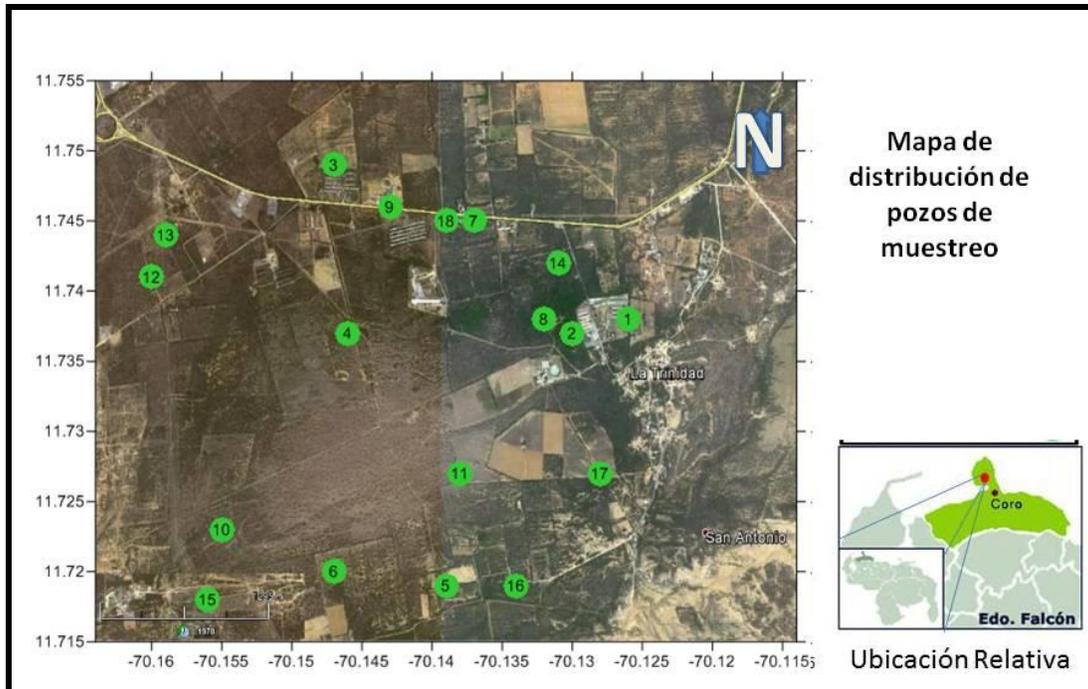


Figura 15.- Ubicación de pozos de muestreo de la zona de estudio

## V.2.- Preparación de recipientes para captación de agua subterránea

En este estudio fueron utilizados un total de 36 envases con una capacidad de 500 mL, distribuidos de la siguiente forma, 18 para análisis de cationes y 18 para aniones.

Los envases utilizados para almacenar las muestras donde se determinarían los cationes y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ), se lavaron con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) al 10% (v/v), con la intención de evitar que los cationes logren adherirse al recipiente a causa de las cargas negativas presentes en el polímero. Este tratamiento se hizo previo a la etapa de campo, a temperatura ambiente por 24 horas (APHA, 1999).

Para el caso de los aniones y alcalinidad, los envases se lavaron con abundante agua destilada y agua deionizada. Ambos tratamientos se realizaron a fin de evitar posibles contaminaciones de las muestras por impurezas presentes en estos envases. Asimismo, esta etapa se caracterizó por el calibrado del equipo para

medir los parámetros pH, conductividad y temperatura con potenciómetro marca Orión 3 Star.

### **V.3.- Etapa de campo**

Esta etapa se caracterizó por la toma de las 18 muestras de agua subterránea además, simultáneamente se realizaron las mediciones in situ de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad eléctrica y temperatura.

Previo a la captación definitiva de las muestras de agua, los envases se curaron con agua de los diversos pozos de interés. Para el caso de las muestras recolectadas para la determinación de aniones y alcalinidad, estas se preservaron a una temperatura no mayor a 5°C para evitar la descomposición del  $\text{NO}_3^-$  y la pérdida o ganancia de  $\text{HCO}_3^-$ .

Por su parte, es importante señalar que las muestras donde se determinaron las especies catiónicas se filtraron con una membrana de 0,45  $\mu\text{m}$  a fin de eliminar los sólidos suspendidos presentes. Luego de la toma de muestras, estas se acidificaron con 2 mL de  $\text{HNO}_3$  concentrado (12M) bidestilado, de manera que el pH se encuentre menor a 2, evitando así la adsorción de los cationes en las paredes de los envases.

Posteriormente, se realizó la medición de la alcalinidad, a través del método de Gran (1952), que consiste en una titulación potenciométrica, donde se toman alícuotas de 25 mL de muestra, y se titula con una solución previamente valorada de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,012 N.

El método de Gran (1952) permite determinar el punto final de la titulación con mayor exactitud que otros métodos tradicionales. Este método consiste en graficar la ecuación de Gran (1952)  $(V+v) 10^{-\text{pH}}$  contra el volumen del titulante, donde V es el volumen del titulante y v es el volumen de la muestra. De esta forma se obtiene una curva, en la cual el tramo recto de mayor pendiente, se extrapola hasta valor cero de la función de Gran (1952), obteniendo con ello, el volumen del punto final

de la titulación. Conceptualmente esto significa que en ese punto comienza un aumento en la concentración de los iones hidronios libres y que las especies alcalinas han pasado a su forma ácida (Kutos, 2012).

#### **V.4.- Etapa de laboratorio**

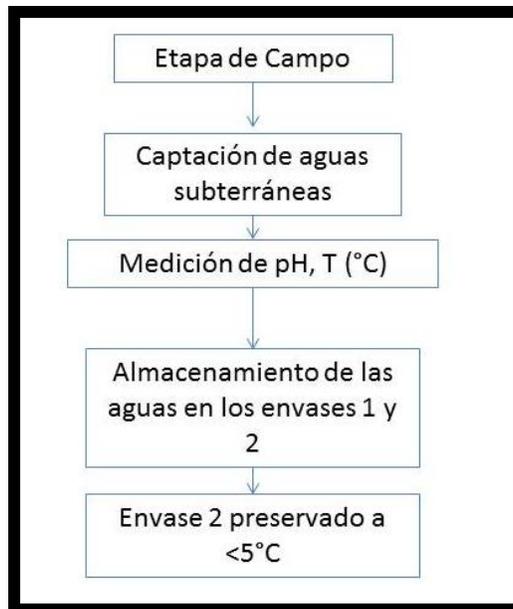
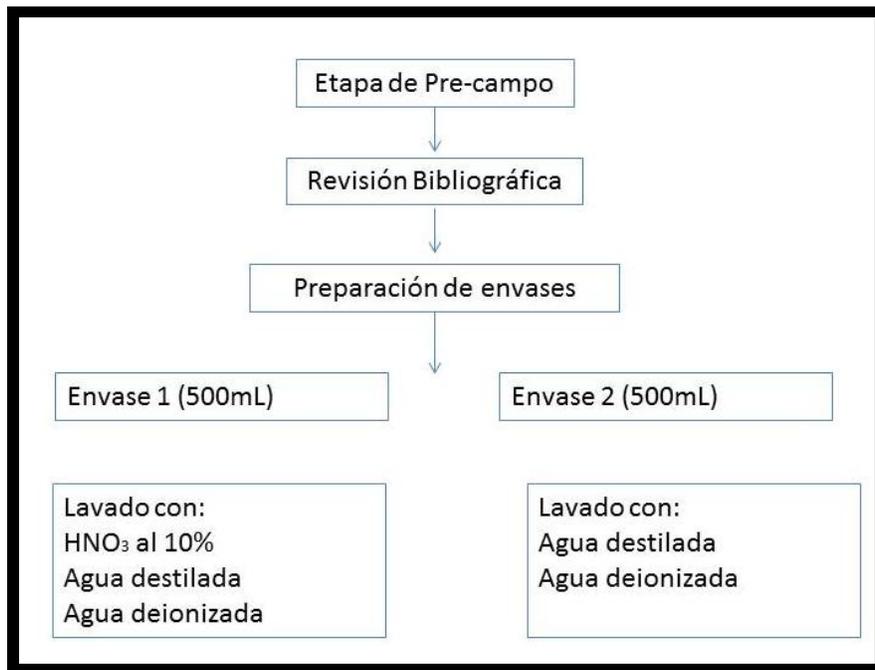
Para la determinación de cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se empleó la técnica de espectroscopia de absorción atómica en llama, mientras que para  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se determinó mediante espectroscopia de emisión atómica en llama. Ambos análisis se midieron en un espectrómetro de absorción y emisión atómica en llama, marca Perkim Elmer Precisely, modelo AAnalyst 200. Para la cuantificación de estos, se construyeron curvas de calibración a partir de patrones, cuyos valores de concentración permitan realizar la misma.

Para el caso de los aniones, sus valores de concentración se conocieron por la técnica de cromatografía iónica, usando para ello un cromatografo iónico marca Thermo Scientific, modelo Dionex ICS-2100. De igual forma se rigió por el método de la curva de calibración a partir de la preparación de patrones de concentraciones conocidas.

En cuanto a la sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) se determinó a partir de la técnica espectroscopia de absorción molecular, mediante el espectrofotómetro de absorción molecular. Esta técnica consistió en tomar una alícuota de la muestra y agregarle 5 mL de una solución de molibdato de amonio al 5%, hasta la formación del complejo amarillo silicomolibdato. Al transcurrir 20 minutos, se le agregó 5 mL de una solución de ácido oxálico al 5% para evitar las interferencias con fósforo, ya que este ácido destruye al ácido molibdofosfórico más no al ácido molibdosilícico. Para concluir, se agregó 3 mL de sal de Mohr o sulfato ferroso para reducir el complejo amarillo silicomolibdato al silicomolibdato azul. Este procedimiento se aplica a las muestras, a los patrones y al blanco, acotando que a este último, no se le agrega solución de silicio (Mojsiewicz – Pienkowska, 2003).

Por último, la prospección geofísica estuvo a cargo del personal del INAMEH, donde se inició con un reconocimiento geológico del área de estudio para ubicar en los sectores los sondeos eléctricos verticales (SEV). La Prospección consistió en la investigación geofísica in situ en los sectores El Táparo Sur y La Trinidad correspondientes a los municipios Carirubana y Los Taques del estado Falcón y en función de sus características y propiedades geoeléctricas, evaluar las posibilidades de almacenamiento de las aguas subterráneas en los sectores El Táparo La Trinidad y Táparo Sur, municipio Los Taques del estado Falcón.

Se utilizó el método de resistividad de sondeos eléctricos verticales (SEV) con la configuración electrónica Schlumberger MN < AB/2. Se indujo corriente continua en forma sucesiva en el subsuelo a través de un par de electrodos llamados A y B (electrodos de emisión), con otro par de electrodos llamados M, N (electrodos de medición) conectados a tierra, se mide la diferencia potencial ( $\Delta V$ ) en voltios generado por el paso de corriente en el subsuelo. El tendido se colocó en superficies planas en línea recta guardando una configuración preestablecida. Luego al obtener dichos valores se contrastó con la información hidrogeoquímica obtenida, hallando la relación entre ambas disciplinas.



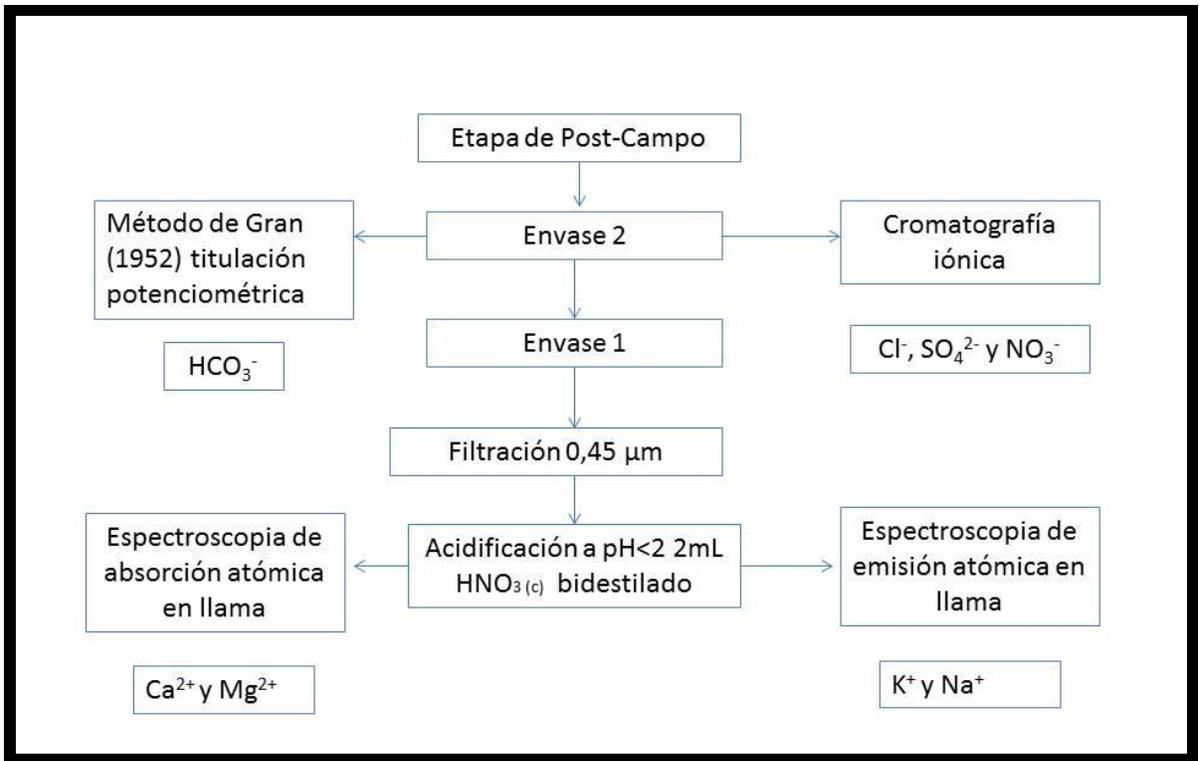


Figura 16.- Diferentes etapas llevadas a cabo durante este trabajo.

## VI.- PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

En esta sección son presentados los resultados obtenidos a partir de los análisis efectuados durante la etapa de laboratorio a las 18 muestras de aguas subterráneas captadas en el área de estudio.

Esta sección está estructurada de la siguiente manera: inicialmente se evalúa la validación y calidad de los resultados generados; mientras que en un segundo apartado, se realiza la caracterización geoquímica, donde se pone de manifiesto el uso de análisis estadísticos, cajas gráficas, mapas de distribución de las diferentes variables consideradas en este estudio, incluyendo una breve noción explicativa de cada uno de ellos.

Los resultados de pH, conductividad y temperatura así como los datos de localidad, coordenadas y profundidad de los pozos se recopilaron en el apéndice A, mientras que las concentraciones de la especies  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  son recopiladas en el apéndice B; por otro lado, los diagramas de Piper y figuras de Stiff sirvieron como ayuda para la clasificación de las aguas captadas.

Seguidamente, el uso de los parámetros estipulados en el Decreto 883 (Gaceta oficial 5021, 1995) permitió clasificar el agua en base a su uso; es decir, señalar cuál es la calidad de las aguas para el acuífero El Taparo.

Por otro lado, se construyeron algunas relaciones iónicas con el propósito de evaluar e identificar los diversos procesos que controlan la composición química de las aguas subterráneas del acuífero El Taparo.

Finalmente, el uso de la prospección geofísica como método complementario hacia esta investigación, permitió realizar la correlación entre los datos hidrogeoquímicos y los aportados por los sondeos realizados en la zona.

## VI.1.- VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La validación de los resultados se realizó a fin de conocer que tan confiables son los datos obtenidos; para ello se calculó el balance iónico y la relación entre la conductividad teórica y la conductividad medida en campo.

En cuanto al balance iónico, el mismo fue obtenido tomando en cuenta las concentraciones de cationes y aniones en meq/L, lo que permitió conocer el % de error asociado a estas mediciones. La figura 17 señala que la totalidad de las muestras presentan un porcentaje de error menor al 10%, lo que indica que desde un punto de vista geoquímicos los resultados son confiables (Hem, 1985).

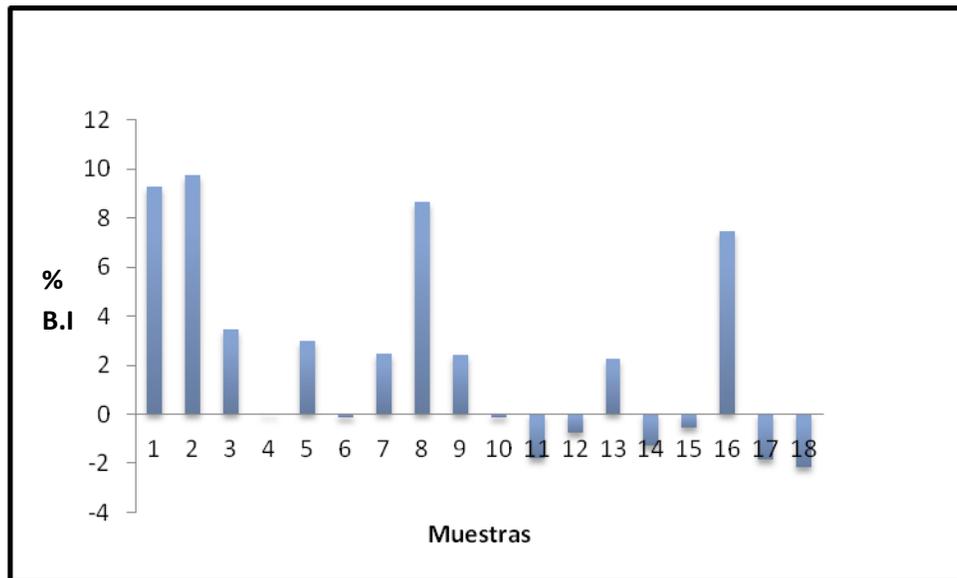


Figura 17.- % Error del balance iónico (%B.I.)

En el mismo orden de ideas, la figura 18 relaciona las concentraciones en meq/L de los cationes y aniones, nótese la existencia de una correlación lineal muy cercana a 1 ( $R^2 = 0.9967$ ); lo que conlleva a decir que la concentración de aniones y cationes son relativamente iguales, lo que permite trazar una alta confiabilidad en los datos obtenidos, indicando que la determinación de dichas concentraciones fue realizada con pocos errores.

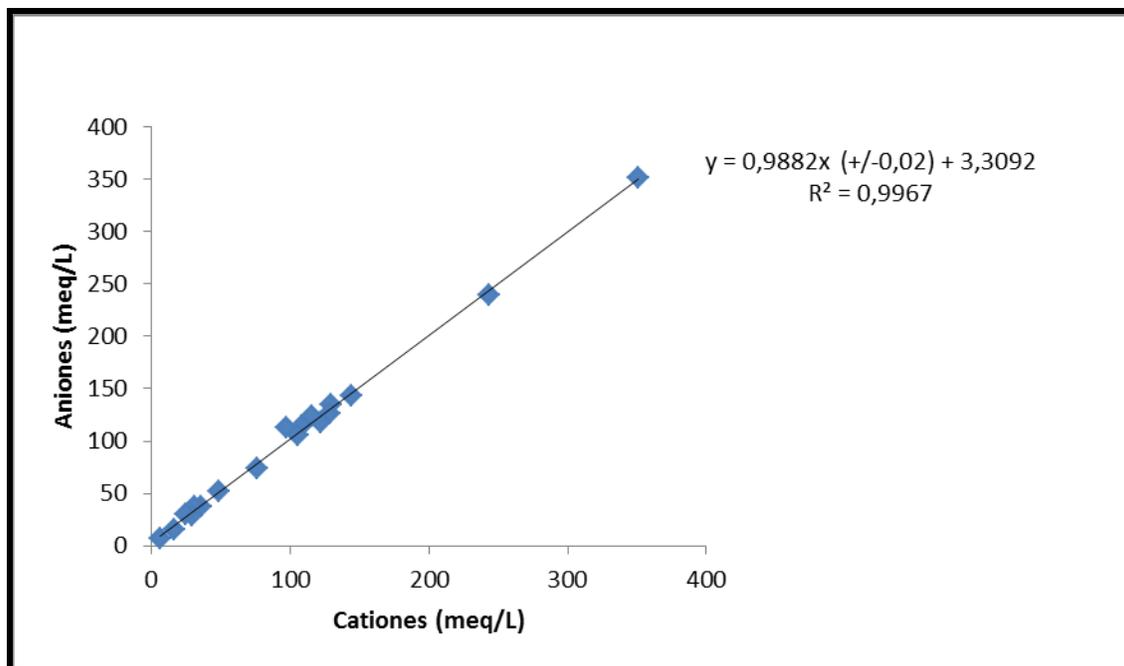


Figura 18.- Relación entre cationes y aniones (meq/L)

Otra manera de corroborar la confiabilidad de los datos es relacionando la conductividad medida en campo y la conductividad teorica, por lo cual se construyó un gráfico mostrado en la figura 19. Notese la existencia de una excelente correlación entre ambos parametros, exceptuando a la muestra 6 quien se aleja de la tendencia general, caracterizada por presenrar la mas alta conductividad de las muestras captadas. Esto conlleva a señalar que para su proceso de medición pudo haber ocurrido un error de cierta importancia.

La relacion obtenida es descrita a través de la ecuacion  $y = 1,88x (\pm 0,01) - 62,23$  con una baja dispersión expresada en su  $R^2$  igual a 0,9949.

Es importante aclarar que la conductividad teorica se obtiene mediante las contribuciones aditivas de los componentes iónicos y las conductividades equivalentes, calculando la sumatoria del producto del ion por su conductividad (Apéndice C).

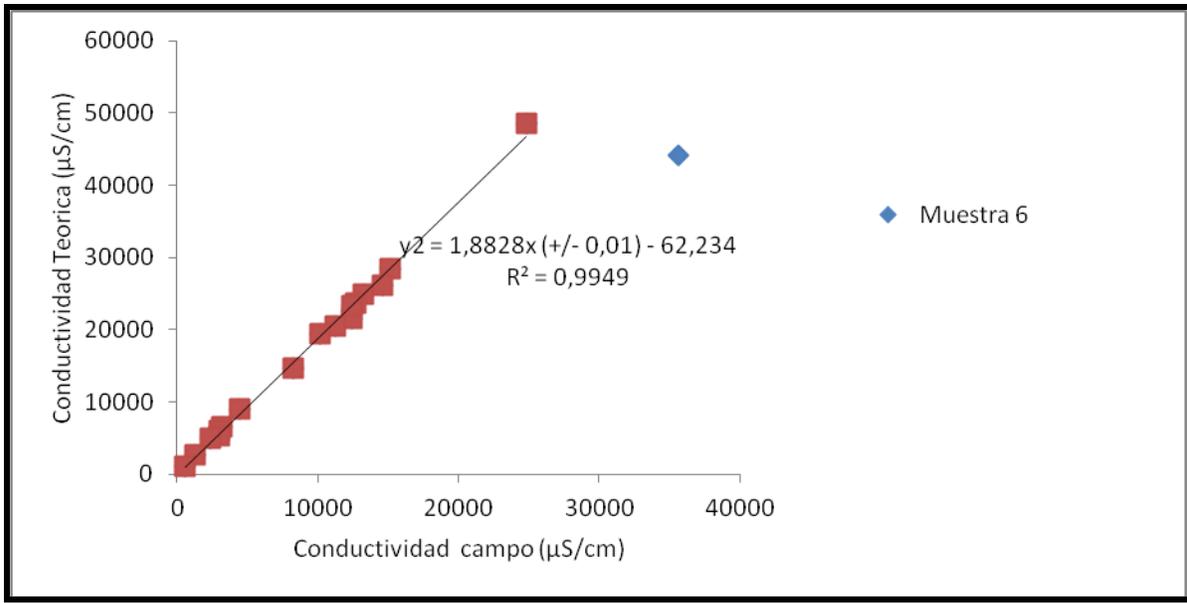


Figura 19.- Relación entre conductividad teorica y de campo (μS/cm).

## VI.2.- HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS

Luego de ser validados los resultados fueron utilizadas una serie de herramientas geoquímicas que apoyan la discusión en el contexto de poder inferir los procesos que influyen sobre la composición química de las aguas subterráneas captadas, las cuales se exponen a continuación.

### IV. 2.1.- Clasificación de las aguas mediante el diagrama de Piper

La caracterización de las aguas subterráneas mediante un diagrama de Piper, permite inferir el o los tipos de aguas están presentes en la zona de estudio. La figura 20 muestra el diagrama de Piper para las 18 muestras de aguas subterráneas colectadas, pertenecientes al acuífero El Taparo, en el mismo se puede evidenciar la presencia de 3 tipos de aguas subterráneas a saber:

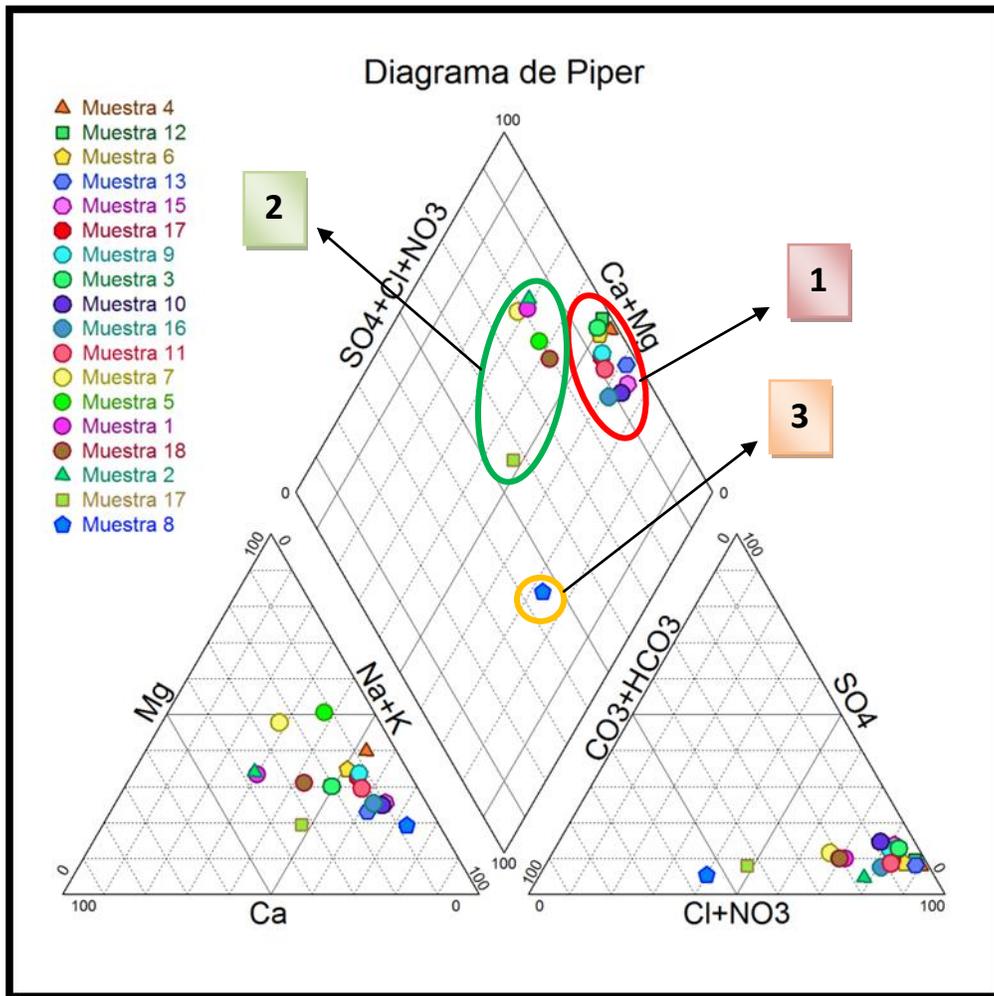


Figura. 20.- Diagrama de Piper para las muestras de aguas subterráneas del acuífero el Taparo.

- 1.- Aguas cloruradas sódicas, correspondientes a las muestras 3, 4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16, representando un 61,11% de la población.
- 2.- Aguas cloruradas cálcicas y/o magnésicas correspondientes a las muestras 1, 2, 5, 7, 17 y 18, representando el 33,33% de la población.
- 3.- Aguas bicarbonatadas sódicas, correspondiente a la muestra 8 que representa el 5.56% de la población.

De acuerdo a estos resultados se puede inferir a partir de las unidades litológicas presentes en la zona de estudio que los iones  $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$  provienen del proceso de interacción agua-roca, específicamente de la disolución de material calcáreo presente en la Formación Paraguaná constituida por las lutitas calcáreas (Codecido et al., 1974), o por las calizas pertenecientes a la Formación Pueblo Nuevo. De igual forma, la disolución de minerales silicatados como el microclino, biotita y hornblenda pertenecientes al plutón granítico de El Amparo, pudiesen también estar aportando cantidades de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  de manera apreciables.

Por otro lado, el aporte de los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  que se encuentran en grandes proporciones en dichas aguas, puede provenir de aportes o intrusión de agua marina dentro del acuífero, así como del agua de lluvia. En ese mismo sentido, la Formación Cantaure (Codecido et al., 1974) presenta lutitas verdosas yesíferas, por lo que la percolación de agua de lluvia que luego es infiltrada hacia el acuífero, podría disolver este mineral y ser un aporte más de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el área. Finalmente, la unidad permeable del acuífero presenta lutitas marinas del Miembro El Hato (INAMEH, 2012), siendo también la interacción de estas aguas con dichas rocas un aporte significativo de estos iones.

#### **IV. 2.2.- Clasificación de las aguas mediante figuras de Stiff.**

Con el propósito de visualizar la distribución espacial de los tipos de aguas presentes en la zona de estudio, así como el origen de las mismas, fueron construidas las figuras de Stiff para cada pozo muestreado (Figura 21). Nótese el marcado predominio de las figuras cuyo origen está asociado a ambientes marinos caracterizadas éstas por ser aguas cloruras sódicas ( $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ ), en el mismo orden de ideas, estas figuras pueden ser detalladas en la figura 22, donde se observa que de las 18 muestras obtenidas en campo, 13 de ellas son catalogadas como cloruradas sódicas.

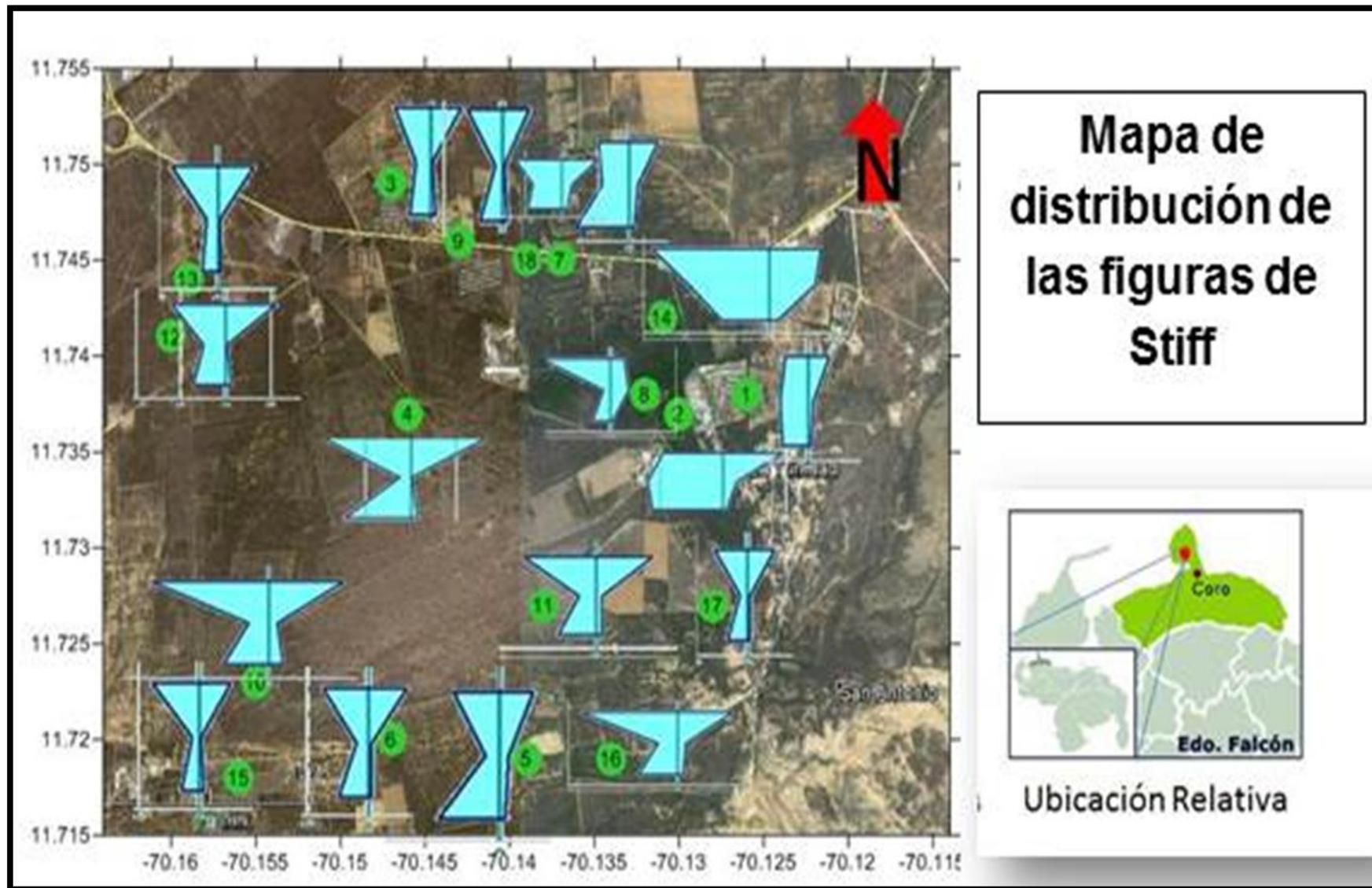


Figura. 21.- Distribución de las figuras de Stiff para la zona de captación

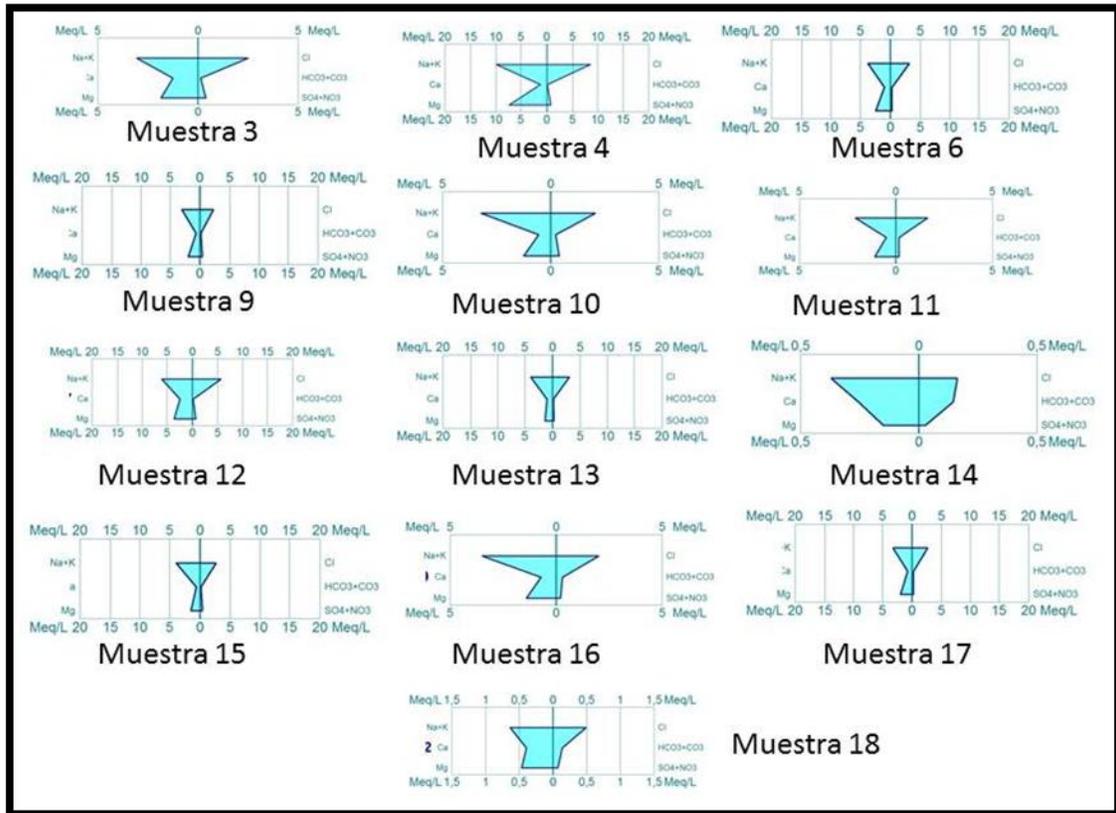


Figura 22.- Figuras de Stiff para aguas cloruradas sódicas

Asimismo, en la figura 23 son observadas las figuras de Stiff para las muestras 1 y 2 que arrojaron patrones que permiten catalogarlas como cloruradas cálcicas ( $\text{Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$ ); por su parte, la figura 24 para las muestras 5 y 7 son características de aguas del tipo cloruradas magnésicas ( $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ ); finalmente, para la muestra 8 se obtuvo la figura de Stiff (Figura 25) que es típica de aguas bicarbonatadas sódicas ( $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ).

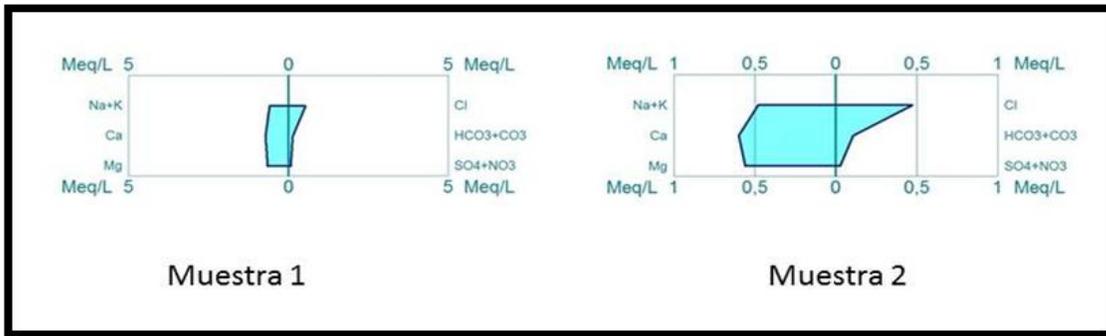


Figura 23.- figuras de Stiff para aguas cloruradas cálcicas

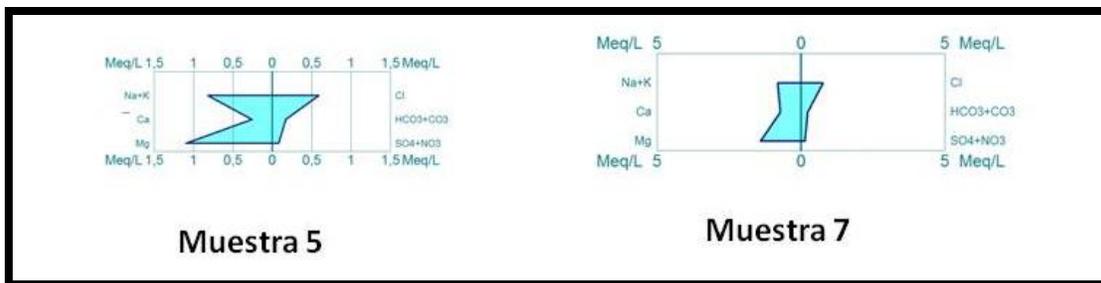


Figura 24.- Figuras de Stiff para aguas cloruradas magnésicas

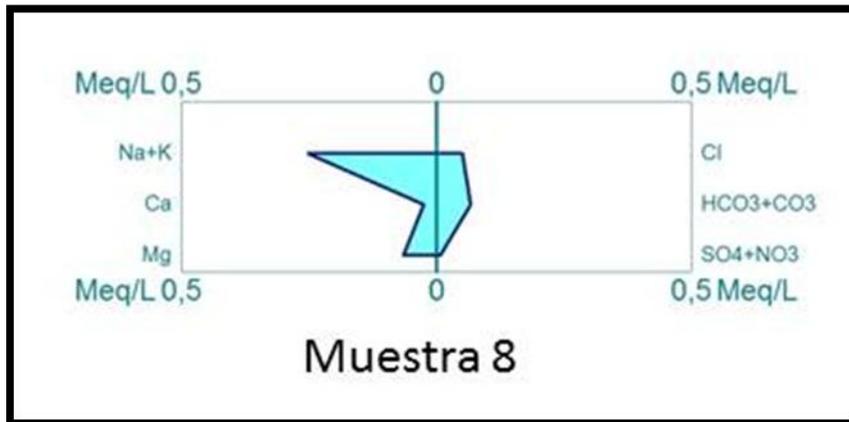


Figura 25.- Figura de Stiff para aguas bicarbonatadas sódicas

En general, se puede señalar que las aguas del tipo  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$  son de origen marino; mientras que del tipo  $\text{Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$  y  $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$  son características de aguas marinas

sometidas a fuertes eventos de evaporación, previo a su infiltración hacia el subsuelo. Por su parte, el agua del tipo  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$  es característico de aguas meteóricas

En la tabla 12, se presenta un cuadro comparativo entre las aguas identificadas mediante el diagrama de Piper y las figuras de Stiff; en ese sentido, mediante Stiff se identificaron 4 tipos de aguas, mientras que por el diagrama de Piper se reconocieron 3, en términos generales ambos sistemas de clasificaciones concuerdan, ya que las aguas cloruradas magnésicas y cálcicas podrían estar dentro de la clasificación de aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas de Piper, lo que conlleva a señalar que existen buenas correlaciones entre ambos métodos para la clasificación de las aguas estudiadas.

Tabla 12.- Cuadro comparativo entre diagrama de Piper y Figuras de Stiff

	Diagrama de Piper	Figuras de Stiff
<b>Tipos de aguas</b>	Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas	Cloruradas sódicas
	Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas	Cloruradas cálcicas
		Cloruradas magnésicas
	Aguas bicarbonatadas sódicas	Bicarbonatadas sódicas

### VI.3.- VARIACION DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS

A continuación se presenta el análisis de cada uno de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo, haciendo uso de cajas graficas a los fines de obtener la mediana, el primer (25%) y tercer cuartil (75%) de la población, así como los valores máximos y mínimos y los extremos, para ello se utilizó el programa SPSS Statistics 17.0. De igual forma, se presenta la distribución espacial de cada uno de los parámetros a fin de observar su comportamiento en la zona de estudio.

#### pH

La figura 26 muestra la distribución de los valores de pH medidos en la zona de estudio, nótese que dicha figura presenta una asimetría positiva; es decir, los valores de pH para estas aguas están dominados por valores mayores de 6,70. El valor máximo obtenido de 7,74 unidades de pH corresponde a la muestra 13.

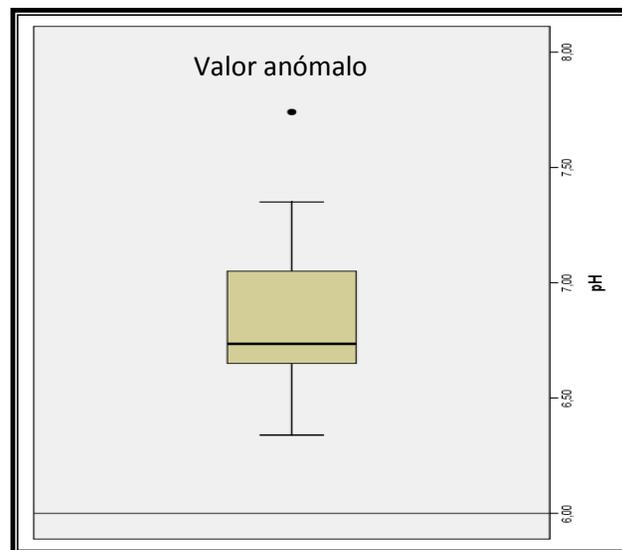


Figura. 26.- Caja Gráfica del pH

Uno de los factores que controlan la acidez de las aguas en los sistemas naturales, es el proceso de interacción con el CO<sub>2</sub> atmosférico, cuyo proceso es descrito a través de las reacciones 1, 2 y 3 por lo que se describen las siguientes reacciones (Custodio y Llamas, 1976).



De acuerdo a las reacciones mostradas, el pH de las aguas subterráneas es ácido, donde el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(ac) es la especie dominante, y el H<sup>+</sup>(ac) juega un papel importante en la disolución de silicatos y aluminosilicatos, resultando en el aporte de especies iónicas como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> a las aguas subterráneas.

A su vez, el agua de las precipitaciones al pasar por la zona del suelo, donde el CO<sub>2</sub> es abundante, adquiere un pH relativamente bajo, del orden de 4,5. Luego por interacción con las rocas carbonatadas, éste tiende a elevarse hasta cerca de 7. Cuando esta interacción se produce durante un tiempo prolongado, el agua incrementa su concentración de iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, adquiriendo además iones CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. En esas condiciones, el pH puede alcanzar un valor cercano a 8,4. Por lo general, en los arroyos y ríos de las regiones húmedas no kársticas el pH varía entre 5 y 6,5; mientras que en las regiones kársticas húmeda, este valor suele estar comprendido entre 7 y 8. Las aguas marinas tienden a poseer un pH cercano a 8 (Fagundo y González, 2005).

En cuanto a la distribución espacial del pH, en la figura 27 se puede observar que los valores más altos se encuentran ubicados hacia el este de la zona de estudio, es decir los que se encuentran más alejados de la costa, lo que permite inferir que para esta zona el factor dominante es la disolución mineral.

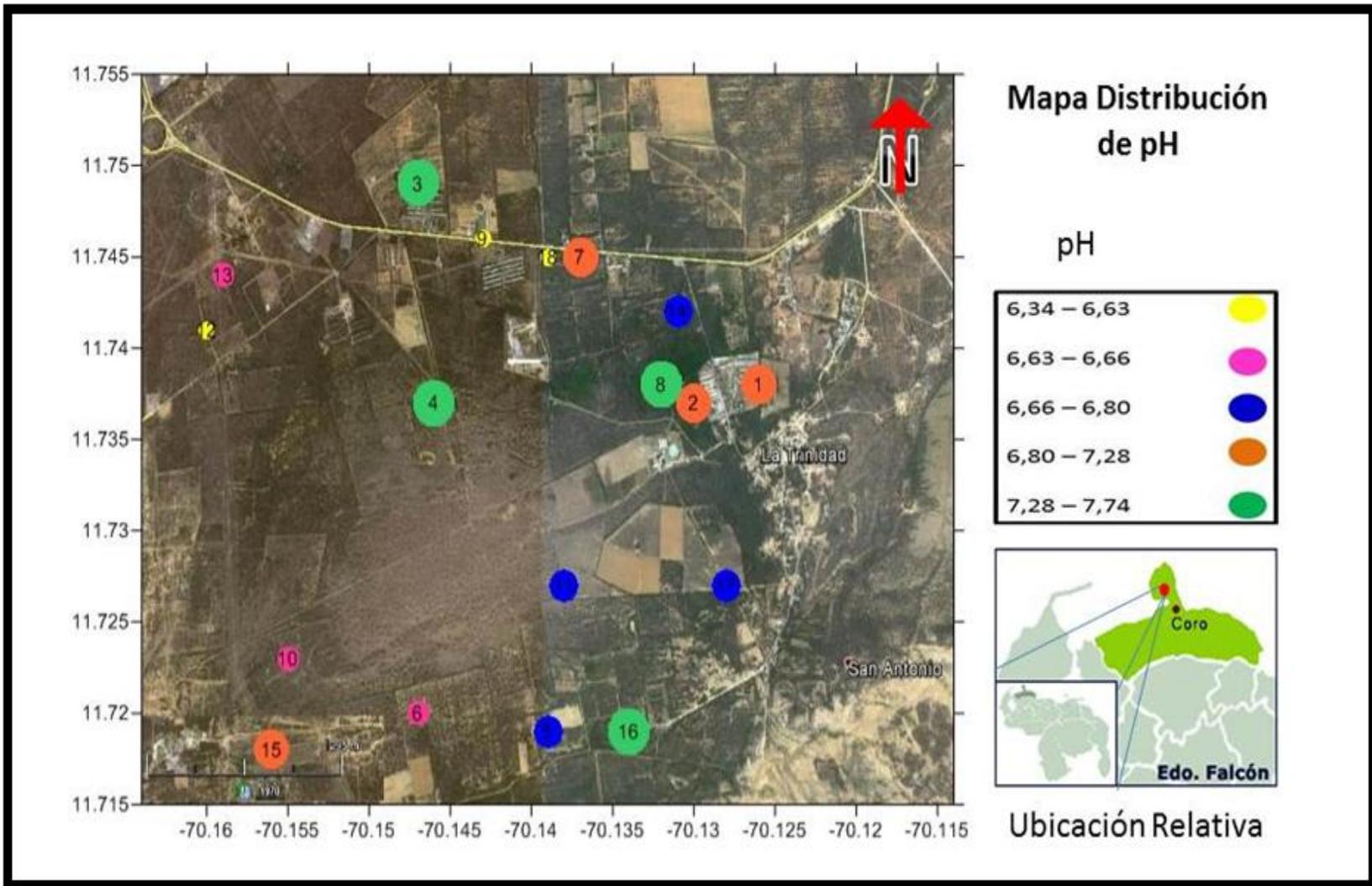


Figura 27.- Distribución espacial del pH.

## Conductividad

La figura 28 presenta la caja grafica obtenida para la conductividad medida de la zona de estudio, reflejando en ella una distribución normal, con asimetría negativa, presentando valores que van desde 588 a los 35600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En esta figura se puede observar que existe un valor extremo correspondiente a la muestra 6 con un valor de 35600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

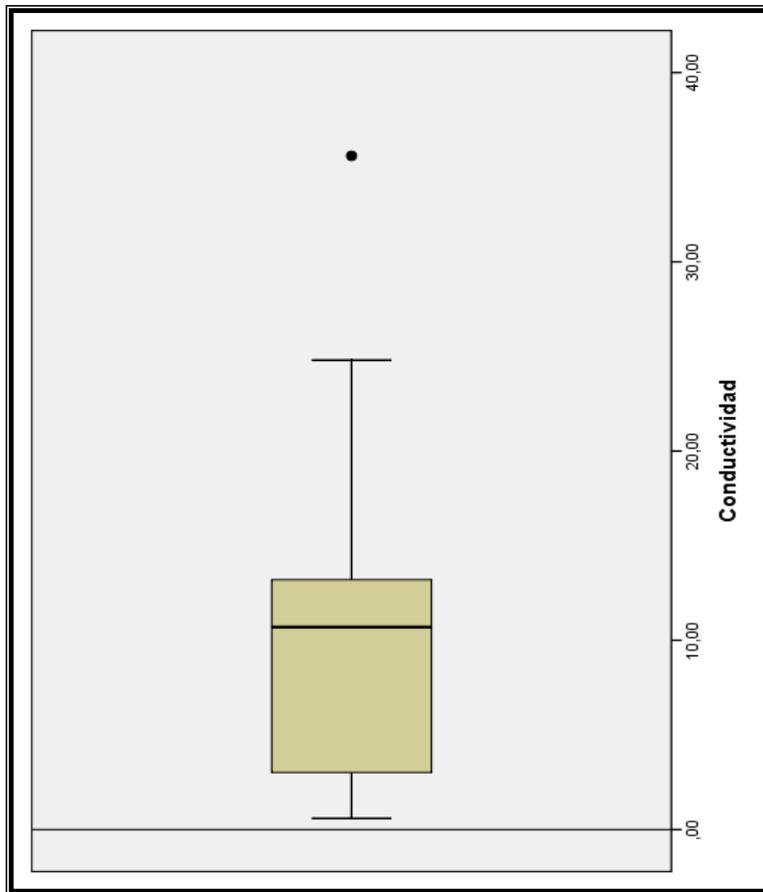


Figura. 28.- Caja grafica para las conductividades medidas en  $\mu\text{S}/\text{cm}$

Especialmente, la figura 29 presenta que los mayores valores de conductividad obtenidos in situ, están ubicadas hacia el oeste de la zona de estudio, lo que está

en correspondencia con los análisis químicos realizados a las muestras. Las zonas con las más altas conductividades, representan a las muestras cuyos valores de cationes y aniones son mayores; es decir contienen mayor cantidad de sales disueltas, por lo que era de esperarse dicha distribución.

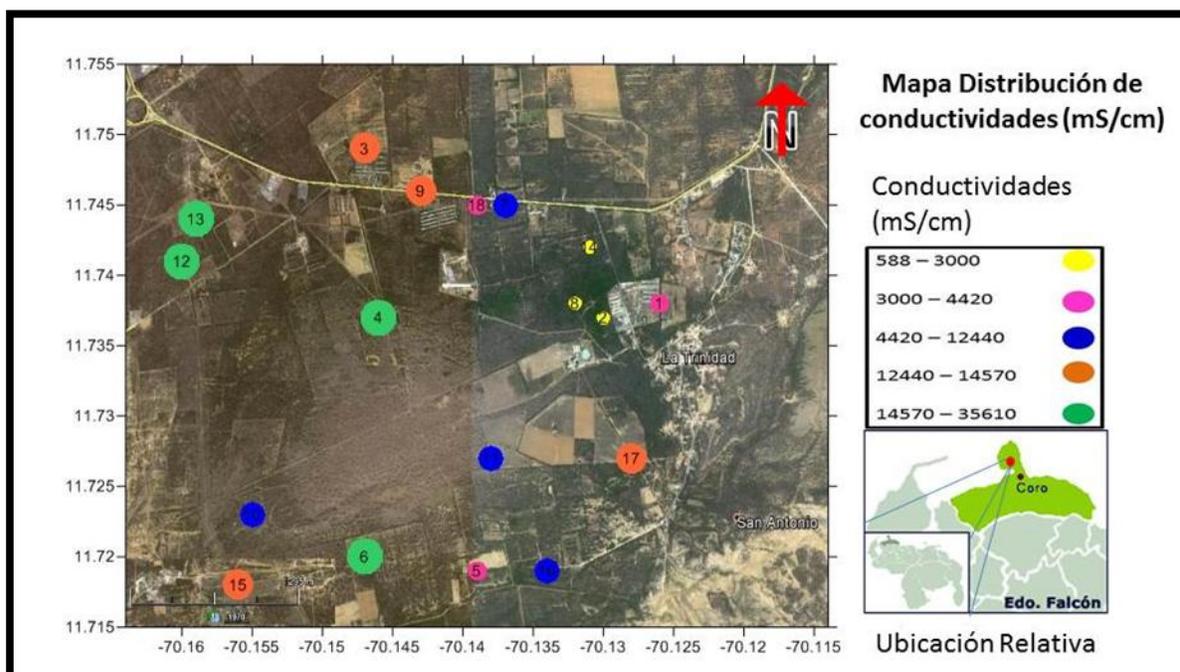


Figura 29.- Distribución espacial de conductividades

#### VI.4.- VARIACION DE LA CONCENTRACION DE LOS CATIONES $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ .

La figura 30 muestra la variación de las concentraciones para los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , se puede observar una marcada abundancia del ion  $\text{Na}^+$  frente a los demás cationes, los cuales presentan un comportamiento casi simétrica entre sí. Los valores de las concentraciones de  $\text{Na}^+$  oscilan entre los 130,9 y 5207,5 mg/L; mientras que la mediana para esta población, corresponde a 1472,0 mg/L. Estas altas concentraciones posiblemente sean producto de la cercanía a la costa de la zona de estudio.

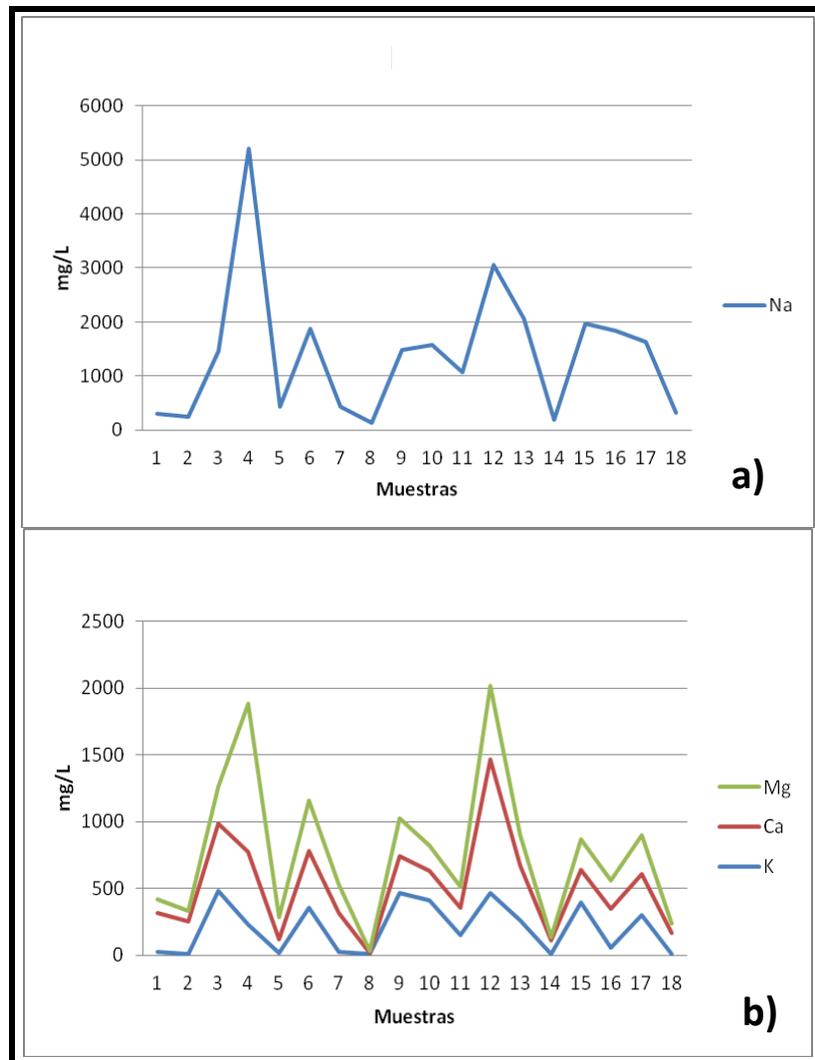


Figura 30.- Representación grafica de las concentraciones de los cationes a)  $\text{Na}^+$  y b)  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , para las muestras colectadas en el acuífero El Taparo.

Por otro lado la figura 31 muestra las cajas graficas obtenidas para los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , donde se puede observar que para el  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  poseen una distribución asimétrica positiva, siendo los máximos valores de concentración para ambas especies de 480,00 y 1002,00 mg/L respectivamente. Del mismo modo, los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  presentan una asimetría negativa con máximos valores de 5207,5 y 1109,60 mg/L.

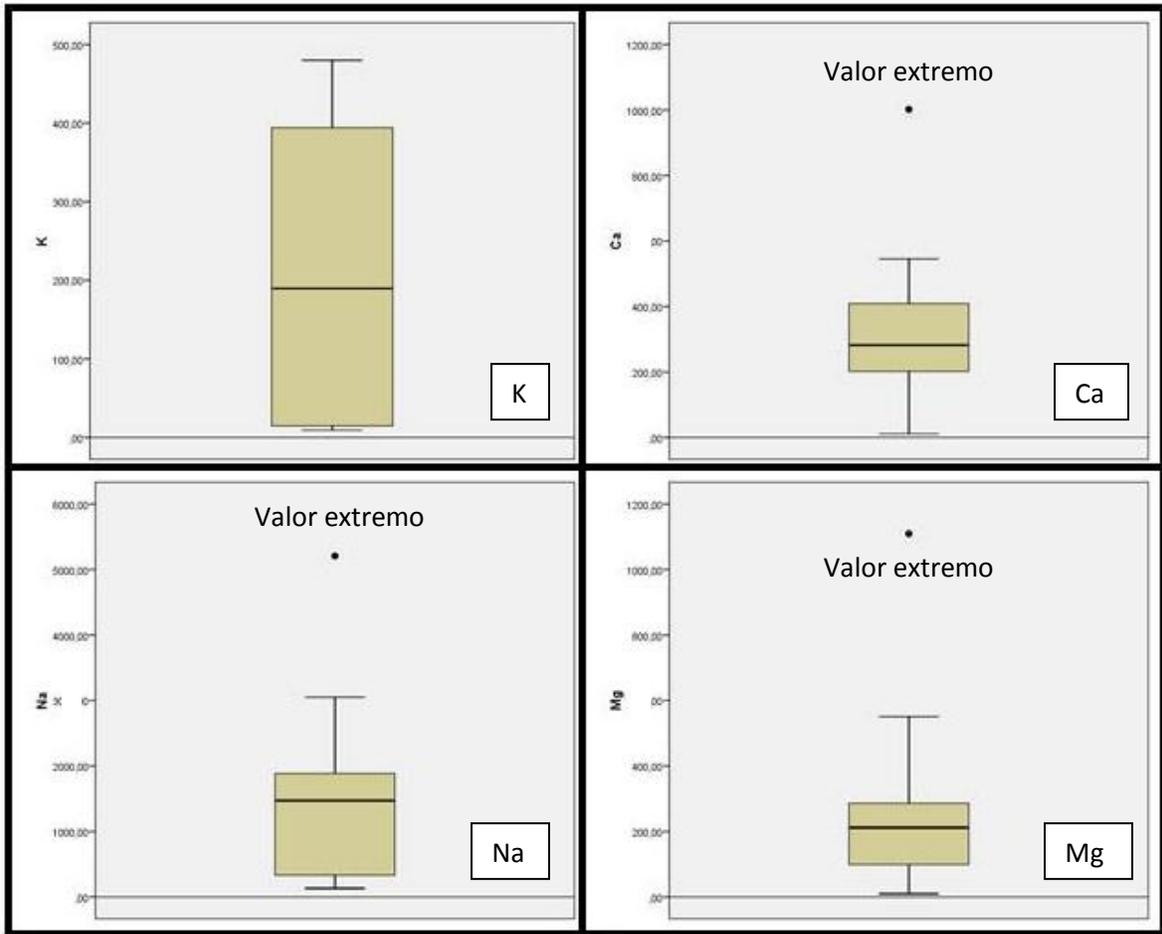


Figura 31.- Cajas gráficas de cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en mg/L

La presencia del ion  $\text{Na}^+$  en las aguas subterráneas frecuentemente está asociado a la meteorización de silicatos tipo albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) así como a la disolución de rocas sedimentarias de origen marino o depósitos evaporíticos (Sánchez, 2012). Para el caso del acuífero El Taparo el  $\text{Na}^+$  puede estar asociado a la penetración de aguas marinas actuales o fósiles.

Los iones  $\text{K}^+$  proceden de la meteorización de feldespatos y silicatos (micas y arcillas) y ocasionalmente de la solubilización de depósitos evaporíticos (Sánchez, 2012). En este estudio los valores de concentración están entre 9,30 – 480,00 mg/L con un valor de fondo o mediana de 189,70 mg/L. A su vez, los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se encuentran en las aguas subterráneas producto de la disolución de

silicatos, carbonatos y sulfatos (Sánchez, 2012). Su valores de concentración para estas aguas están entre 11,10 – 1002,00 mg/L y 9,80-1109,60 mg/L respectivamente, con valores de fondo 282,30 y 211,90 mg/L respetivamente.

### **Sodio (Na<sup>+</sup>)**

La distribución espacial de las concentraciones de ion Na<sup>+</sup> en la zona de muestreo se puede observar en la figura 32.

En el mismo se puede observar como las mayores concentraciones se encuentran ubicadas hacia el oeste de la zona de estudio; es decir, hacia la zona que está cercana a la costa. En ese sentido, se puede señalar que el Na<sup>+</sup> presente en las aguas del acuífero El Taparo probablemente se originen por intrusión marina producto de la sobreexplotación de los pozos presentes en la zona, lo que conlleva al aumento en las concentraciones de este ion. El Na<sup>+</sup> es altamente soluble por lo que tiende a permanecer por largo tiempo en solución, ya que no se producen reacciones de precipitación como es el caso del Ca<sup>2+</sup> (Gómez, 2009).

Custodio y Llamas (1976) señalan que aguas subterráneas con valores de concentración de Na<sup>+</sup> menores a 600 mg/L pueden ser consideradas como aguas dulces. En ese sentido, las muestras 1, 2, 5, 7, 8, 14 y 18 caen en esa categoría, mientras que las muestras restantes son clasificadas como aguas de mar por su elevada concentración (Apéndice B).

Ayala (2006) reporta valores de Na<sup>+</sup> en la zona de Santa Ana en la península de Paraguaná que van desde los 15 a los 3685 mg/L, con un valor de fondo de 417,5 mg/L. Este autor asocia la presencia de Na<sup>+</sup> a la sobreexplotación de los pozos presentes en la región que debido a su cercanía a la costa, conllevó al proceso de intrusión marina. También atribuye estos valores al tiempo de residencia del ion en el acuífero lo que permite tener una mayor interacción con el material rocoso presente en el mismo.

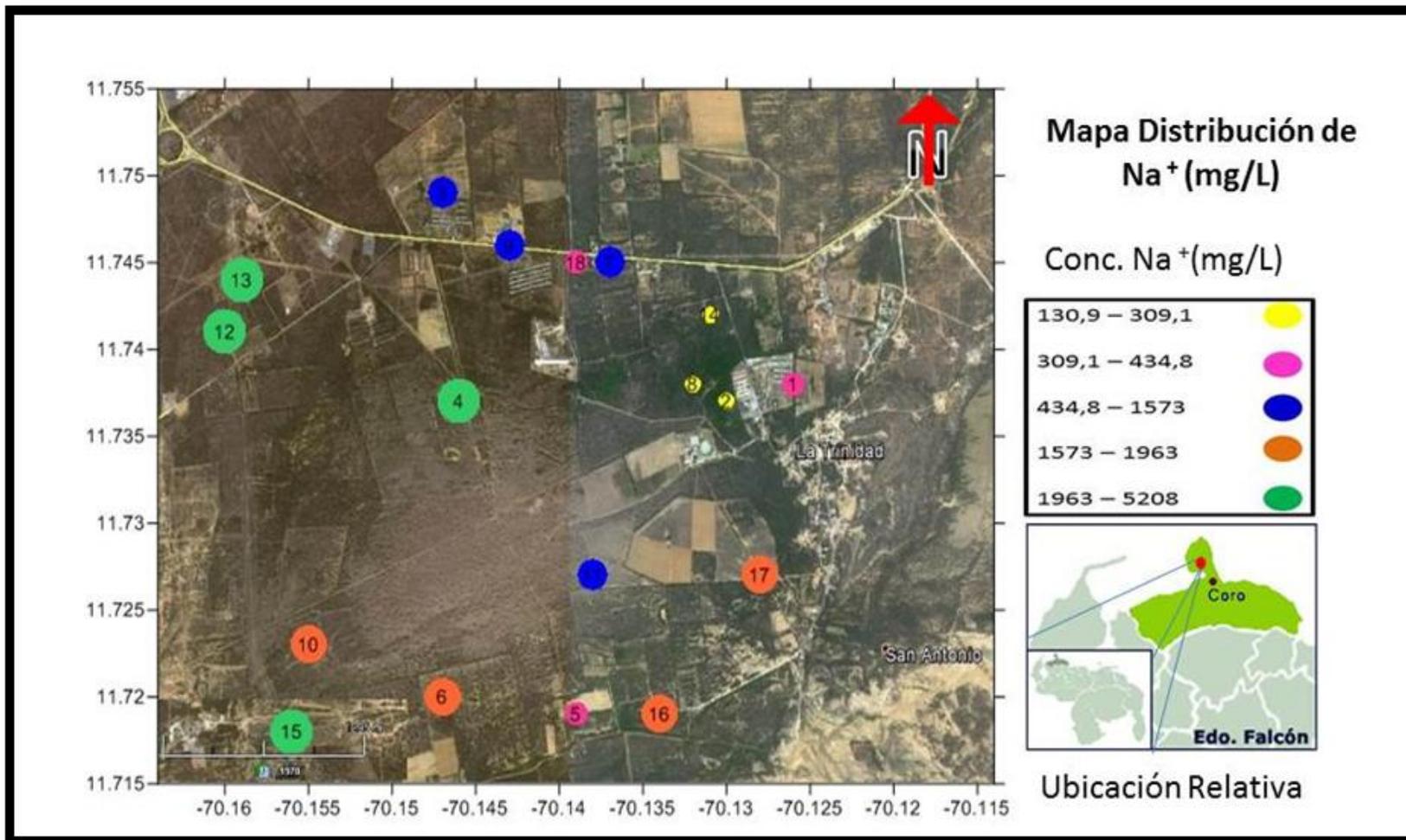


Figura 32.- Distribución espacial de Na<sup>+</sup>

Otra de las posibles formas de aporte de este ion a las aguas subterráneas captadas, es producto del lavado de los terrenos marinos y al intercambio con arcillas del mismo origen. En esta zona ha sido reportada la presencia de lutitas marinas del Miembro El Hato, lo que no descarta que las aguas al infiltrar e interactuar con estas rocas aporte  $\text{Na}^+$  a estas aguas. A su vez, las precipitaciones atmosféricas también constituyen un aporte significativo a la concentración de dicho ion, debido a que dichas precipitaciones llevan consigo núcleos salinos de condensación de la espuma de mar que pueden ser desplazados por los vientos hasta 75 Km costa adentro (Vargas, 1997).

### **Potasio ( $\text{K}^+$ )**

La distribución espacial de los valores de concentración del ion  $\text{K}^+$  en la zona de muestreo se puede observar en la figura 33. Asimismo puede observarse que las mayores concentraciones para este ion fueron detectadas hacia el oeste de la zona de estudio, lugar geográficamente ubicado en la cercanía con la costa de la península de Paraguaná.

En general las aguas subterráneas poseen una concentración de  $\text{K}^+$  por debajo de 10 mg/L; sin embargo Gómez (2009), señala que concentraciones mayores a 10 mg/L pueden ser originados por los vertidos de aguas residuales, siendo esto una característica de la zona, por encontrarse poblada. Por su parte, Michel (2006) relaciona la presencia de altas concentraciones de  $\text{K}^+$  a la intervención antrópica a través del uso de algún tipo de abono (como  $\text{KNO}_3$  por ejemplo), durante prácticas agrícolas. Es importante señalar que para la zona de estudio, no se descarta que las aguas residuales así como las actividades agrícolas contribuyan con la presencia de  $\text{K}^+$  en las aguas subterráneas del sector estudiado.

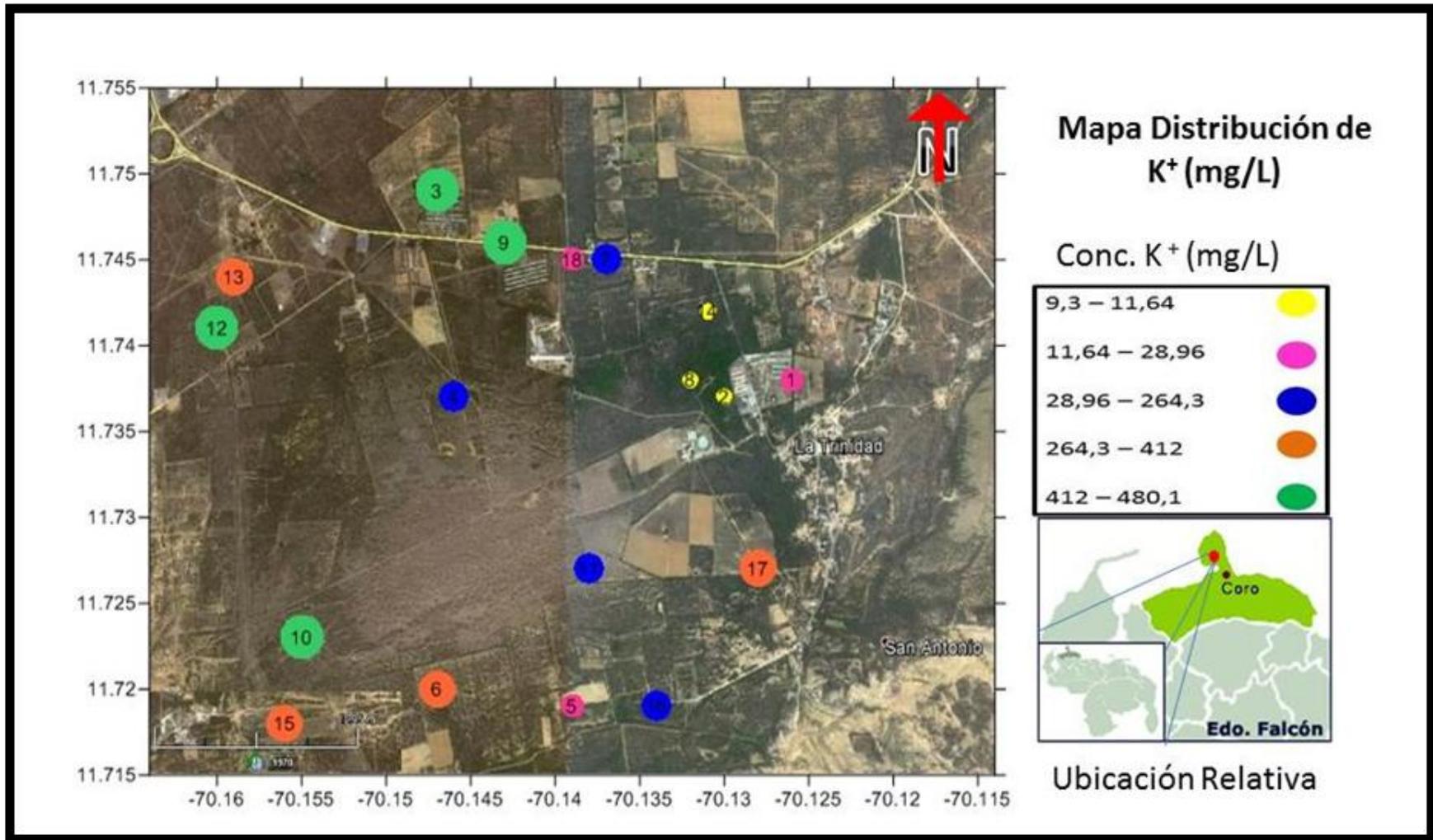


Figura 33.- Distribución espacial de K

En el mismo orden de ideas Ayala (2006) reporta una concentración mínima de 2 mg/L y una máxima de 36 mg/L para  $K^+$ , así como una mediana de 10 mg/L para la zona de Santa Ana de la península de Paraguaná, asociándolo a la absorción de los minerales de arcilla y a la participación por parte de este ion en la formación de minerales secundarios.

En el caso de la zona de estudio, se descarta el intercambio catiónico por parte de las arcillas con este elemento y que el mismo puede estar quedando en solución, ya que el  $K^+$  fue detectado en un amplio intervalo y con altas concentraciones que varían entre 28,97 y 480,00 mg/L. Custodio y Llamas (1976) señala que valores entre 100- 100.000 mg/L para este ion están asociadas a salmueras, mientras que las que poseen concentraciones cercanas a los 400 mg/L son aguas de mar. Asimismo, Sánchez (2012) reporta valores de  $K^+$  para agua de mar de 400 mg/L para este catión y para aguas dulces entre 1 y 10 mg/L. Esto permite indicar que las aguas estudiadas podrían estar mezclada producto de la intrusión marina. Por otro lado, las muestras 2, 8 y 14 representan de toda la población de las que poseen características de aguas dulces, mientras que las restantes cumplen con el carácter de agua de mar, por sobrepasar los valores reportando valores mayores a 10 mg/L.

### **Calcio ( $Ca^{2+}$ )**

La figura 34, presenta la distribución espacial del  $Ca^{2+}$  en la zona de estudio, observese ver que el mismo se encuentra distribuido uniformemente, ya que muestras con altos valores de concentración como la 12 y 13, cuyo intervalo es de 291,50 a 1003,00 mg/L están ubicadas espacialmente hacia el oeste de la zona de estudio; mientras que las muestras como 1 y 17 con intervalos de concentración entre 291,50 mg/L y 424,70 mg/L se ubican hacia el este de dicha zona. Los mayores valores de  $Ca^{2+}$  fueron detectados hacia la región costera, lo que apunta

hacia un probable proceso de contaminación por intrusión marina, como producto de la sobreexplotación de los pozos.

No obstante, es bueno resaltar que otra fuente importante de  $\text{Ca}^{2+}$  a la aguas podría estar asociada a la disolución de rocas carbonáticas y de minerales evaporíticos como yeso. En la zona de estudio González de Juana et. al., (1980) han reportado la presencia de formaciones geológicas como la Formación Pueblo Nuevo y Cantaure mineralógicamente constituidas por capas lenticulares de calizas grises recristalizadas y lutitas verdosas yesíferas intercaladas con limos y niveles calcarenosos respectivamente.

Por otra parte, Sánchez (2012) expresa que los valores de  $\text{Ca}^{2+}$  para las aguas dulces esta entre 10 a 250 mg/L; en ese sentido las muestras 2, 8, 10, 11, 14 y 18 tienen valores de concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  que permiten clasificarlas como dulces. Las muestras restantes pueden ser catalogadas como aguas de mar.

En general las bajas concentraciones vienen dadas por disolución de minerales silicatados, donde no existen un aporte significativo de dicho ion a las aguas, mientras que las muestras que contienen una elevada concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ , el aporte puede provenir bien sea de la disolución de material yesífero. La geología local de la zona está dominada por la Formación Cantaure constituida por lutitas verdosas yesíferas que durante el proceso de esorrentía e infiltración ocurre el lavado de dicho terreno conllevando al de aporte de este catión a las aguas subterráneas de la zona

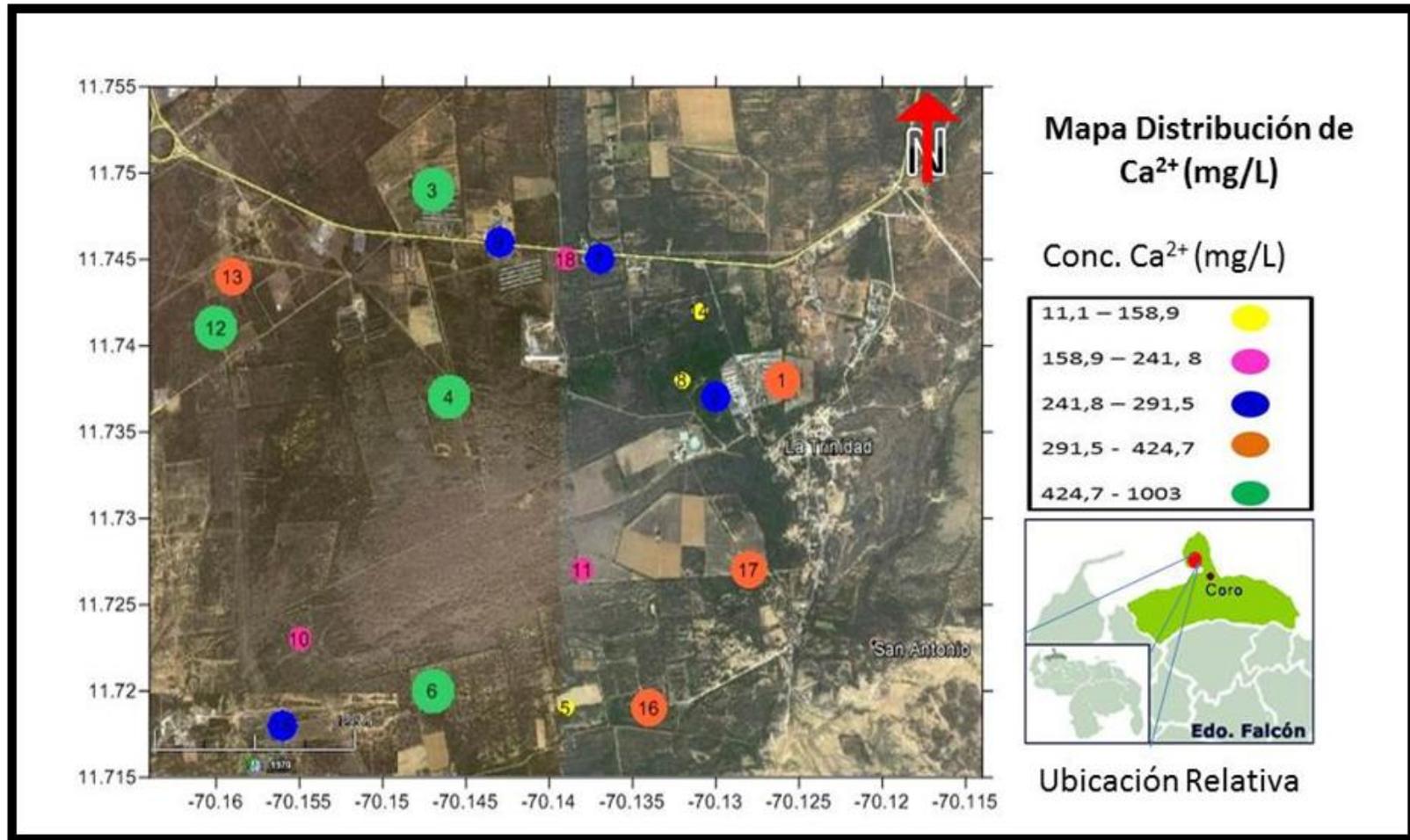


Figura 34.- Distribución espacial de  $\text{Ca}^{2+}$

Otra fuente importante de aporte de  $\text{Ca}^{2+}$  a las aguas subterráneas es la disolución de material carbonático, tal es el caso de las lutitas calcáreas de la Formación Paraguaná, o los limos con depósitos biostromales de bancos de ostras y pectenés del Miembro El Hato (lutitas marinas).

Ayala (2006) reporta intervalos de concentración para  $\text{Ca}^{2+}$  entre 35 y 1088 mg/L y un valor de fondo de 101 mg/L, concentraciones que este autor atribuye a la disolución de material yesífero.

### **Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ )**

En la figura 35 presenta la distribución espacial del  $\text{Mg}^{2+}$  para las muestras de aguas captadas en la zona de estudio, tal como se puede observar las mayores concentraciones están ubicadas hacia el oeste de la zona de estudio, área geográfica cercana a la costa, lo que permite señalar que estos valores son producto del proceso de mezcla entre el agua marina y el agua contenida en el acuífero, que probablemente por la sobreexplotación de pozos produjo una intrusión de la cuña salina, conllevando al aumentando en las concentraciones de este ion.

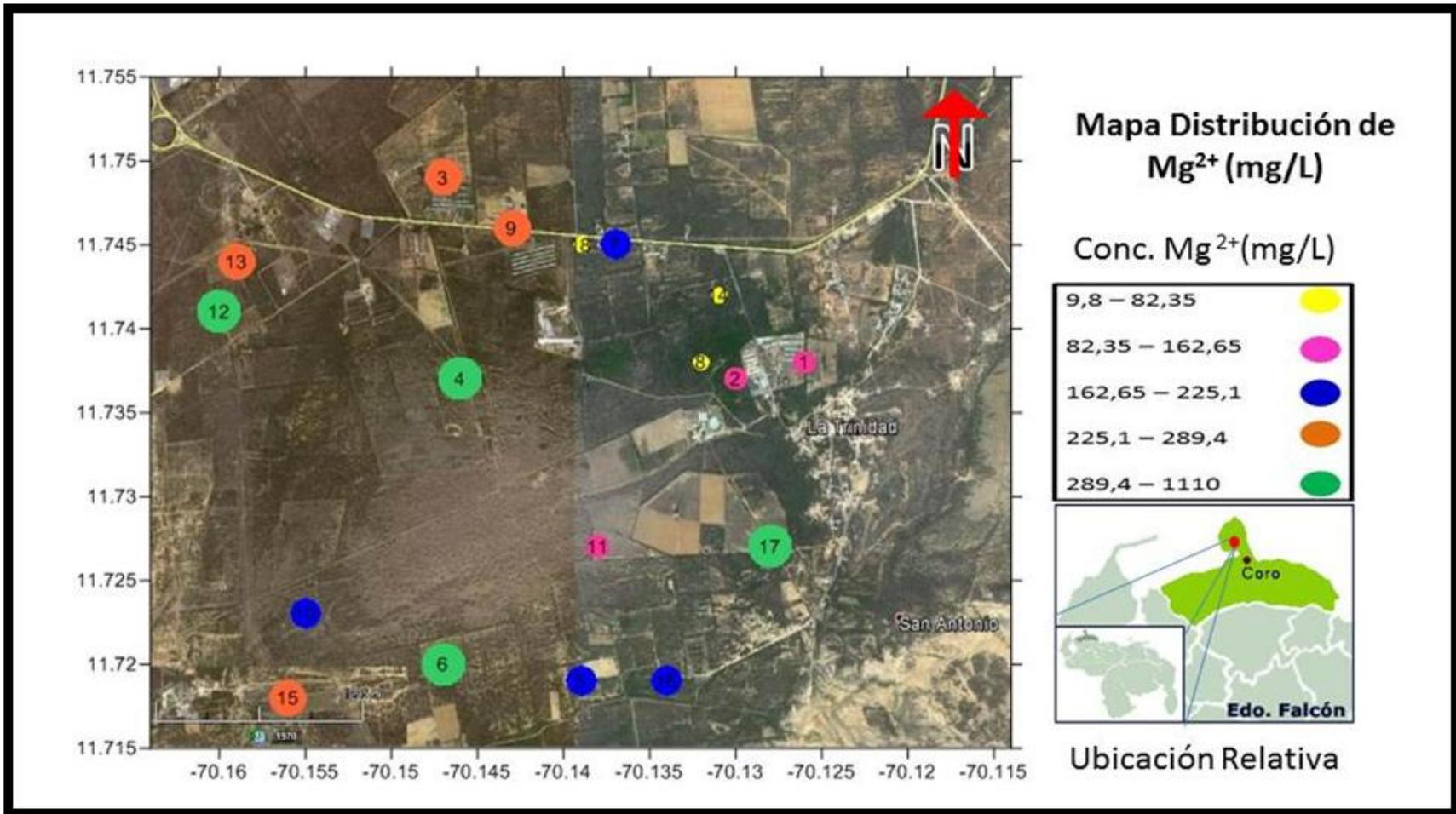


Figura 35.- Distribución espacial de  $Mg^{2+}$

(Custodio y Llamas, 1976) señala que aguas cuyos valores de concentración de  $Mg^{2+}$  son menores a 100 mg/L son consideradas aguas dulces, mientras que aquellas que excedan dicho límite, son consideradas de origen marino. En ese sentido, las muestras 1, 2, 8, 14, 18 tienen valores que están por debajo del valor señalado, por lo que podrían considerarse como aguas dulces; las restantes muestras pueden ser consideradas aguas de mar. En el caso de las aguas dulces, el aporte de este ion puede estar controlado por la disolución de silicatos ferromagnesianos como las biotitas y hornblendas presentes en el granito de Paraguaná (González de Juana et al., 1980).

Ayala (2006) en la región de Santa Ana de la península de Paraguaná reporta valores mínimos para  $Mg^{2+}$  de 14mg/L y máximos de 496 mg/L, y un valor de fondo de 127 mg/L. Este autor asocia las altas concentraciones de  $Mg^{2+}$  con la hidrólisis de minerales como el olivino, piroxeno, la biotita, la hornblenda y serpentina presente en las rocas ígneas y metamórficas de la región. También esta especie puede provenir de la disolución de carbonatos presentes en la zona de estudio.

#### Variación general de la concentración de los cationes $Ca^{2+}$ , $Mg^{2+}$ , $Na^+$ , $K^+$

De acuerdo a lo antes expuesto se puede señalar que solo 4 muestras constituidas por las número 2, 8, 14 y 18 cumplen con los requisitos expuesto por Custodio y Llamas (1976) para ser catalogadas como aguas dulces, ya que para los 4 cationes mencionados sus valores de concentración entran dentro del intervalo señalado por estos autores, sin embargo, existen muestras como la 1, donde los valores de  $Na^+$  y  $Mg^{2+}$  les confieren características de aguas dulces, pero que difieren en los cationes restantes. Mientras que las muestras 5 y 7, son las únicas que reflejan en el caso del  $Na^+$  características de aguas dulces; sin embargo las muestras 10 y 11 poseen lo propio para el caso del  $Ca^{2+}$ . Las diferencias observadas en lo que respecta a que según el ion cambia la clasificación es producto de la variedad de procesos, factores y efectos de

mezclas de aguas presentes en la zona que controlan la composición química de estas aguas.

#### **VI.5.- VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS ANIONES $\text{HCO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{-2}$ y $\text{NO}_3^-$**

La figura 36 muestra la variación de las concentraciones de los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{NO}_3^-$ , obsérvese la marcada abundancia del ion  $\text{Cl}^-$  frente a los restantes aniones, con una distribución casi simétrica entre sí (exceptuando el  $\text{NO}_3^-$ ). Los valores de las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  oscilan entre los 61,271 mg/L y 10769,200 mg/L; mientras que la mediana para esta población corresponde a 2559,430 mg/L. Estas altas concentraciones posiblemente sean producto de la cercanía de la zona de estudio al área costera. A su vez, es importante señalar que esta figura tiene correspondencia con la figura 30 para los cationes, donde evidencia la abundancia del  $\text{Na}^+$ , conllevando a señalar que existe una fuerte influencia de aguas marinas.

Por otro lado, la figura 37 muestra las cajas graficas de los aniones antes señalados, nótese que para  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{-2}$  se obtuvieron distribuciones casi simétricas con máximos valores de concentración para ambas especies de 1074,11 mg/L y 1392,000 mg/L respectivamente. Del mismo modo, el  $\text{NO}_3^-$  generó una caja gráfica de asimetría positiva con valores mínimos de 0,1265 mg/L y máximos de 2,5600 mg/L, con una mediana de 0,4800 mg/L. Por su parte,  $\text{Cl}^-$  posee una distribución asimétrica negativa con valores mínimos de 61,271 mg/L y máximos de 10769,200 mg/L y una mediana de 2559,430 mg/L.

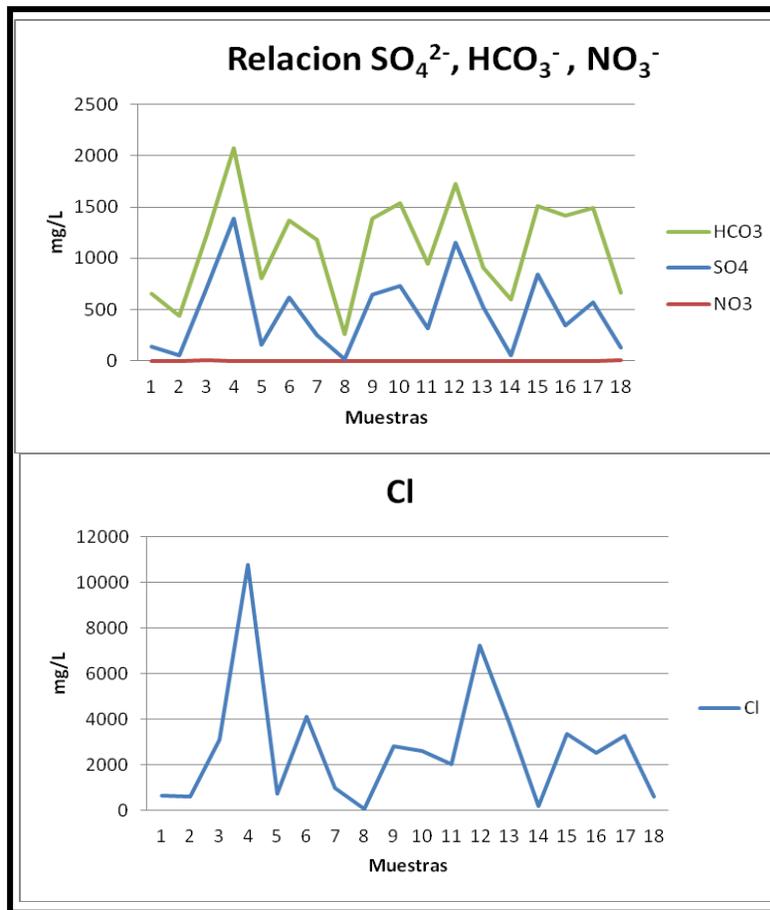


Figura 36.- Representación grafica de los valores de concentración de los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  para las muestras colectadas en el acuífero El Taparo.

El aporte principal del  $\text{Cl}^-$  está asociado al lavado de terrenos marinos, aguas congénitas y fósiles, a su vez el agua de lluvia también puede aportar una significativa cantidad de este anión, particularmente en zonas cercanas a la costa (Sánchez, 2012). Por otro lado, el  $\text{SO}_4^{2-}$  también puede ser aportado a los acuíferos a través del lixiviado de formaciones geológicas generadas en ambientes marinos, así como de la oxidación de sulfuros presentes en rocas ígneas y sedimentarias o de la disolución de yeso y anhidrita (Sánchez, 2012). De igual forma el  $\text{HCO}_3^-$ , se presenta en las aguas producto de la disolución del  $\text{CO}_2$

atmosférico, representando así un equilibrio entre estas especies, otro aporte viene dado por la disolución de calizas y dolomías (Sánchez, 2012). Por último el  $\text{NO}_3^-$ , su proviene por la descomposición de la materia orgánica o de la contaminación de vertidos industriales o urbanos así como de abonos agrícolas y ganaderos (Sánchez, 2012). Los bajos valores obtenidos en este estudio, apuntan solo al aporte natural por descomposición del material vegetal o de la materia orgánica en general.

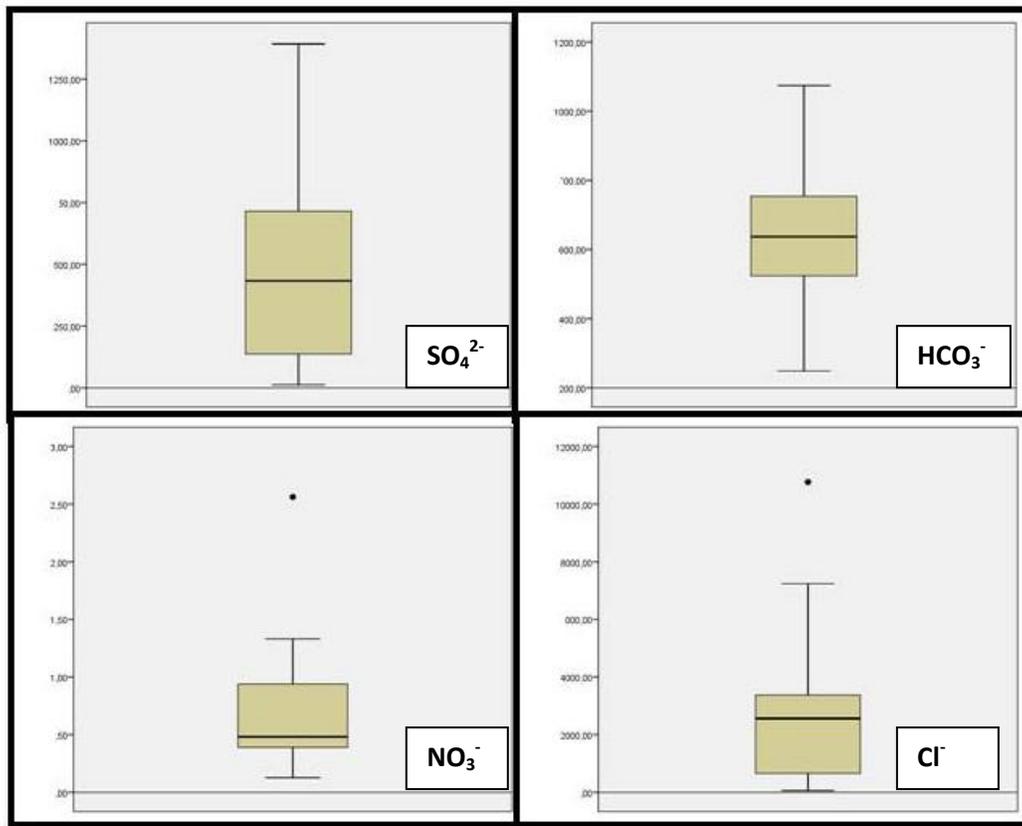


Figura 37.- cajas gráficas de aniones

### Cloruro ( $\text{Cl}^-$ )

La figura 38 muestra la distribución espacial de los valores de concentración del  $\text{Cl}^-$  en la zona de estudio. Como puede ser observado, las mayores concentraciones están hacia el oeste de la zona de estudio, guardando

correspondencia con el aumento para los valores de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  debido a la cercanía con la costa de la zona, posiblemente como respuesta al proceso de intrusión salina hacia este sector de la zona de estudio esto es consecuencia de la sobreexplotación a la que fue sometida dicha zona, lo que trajo como consecuencia un aumento desproporcional en las concentraciones del  $\text{Cl}^-$ , permitiendo la salinización de las aguas producto de la mezcla con agua de mar proveniente de la intrusión marina.

Sánchez (2012), reporta que las aguas dulces poseen un valor de  $\text{Cl}^-$  que esta entre 10-250 mg/L; sin embargo, Custodio y Llamas (1976) señalan que puede ser un poco mayor a los 250 mg/L, por lo que las muestras 1, 2, 5, 7, 8, 14 y 18 con valores menores a los 600 mg/L pudiesen ser catalogadas como aguas dulces, tal como se indicó para los cationes, puesto que estas muestras poseen un comportamiento similar.

No obstante, cabe destacar que el resto de las muestras son catalogadas como aguas marinas, producto de la mezcla con la intrusión proveniente de la costa.

Otra forma de aporte de  $\text{Cl}^-$  a estas aguas son las lluvias cercanas a la costa (Gómez, 2009); así como el material geológico que constituye a la formación permeable, tal es el caso de las lutitas verdes marinas del Miembro El Hato, presente como unidad acuífera.

Ayala (2006) reporta para la zona de Santa Ana, un mínimo de 23 mg/L y un máximo de 5800 mg/L de concentración para el  $\text{Cl}^-$ , mientras que, su valor de fondo se sitúa en los 902 mg/L. Este autor asocia estos valores con el proceso de intrusión de aguas marinas, posiblemente como consecuencia de la sobreexplotación de pozos. En este estudio también puede ser atribuido al alto tiempo de residencia del agua y la mayor interacción con el material del acuífero al igual que el  $\text{Na}^+$ .

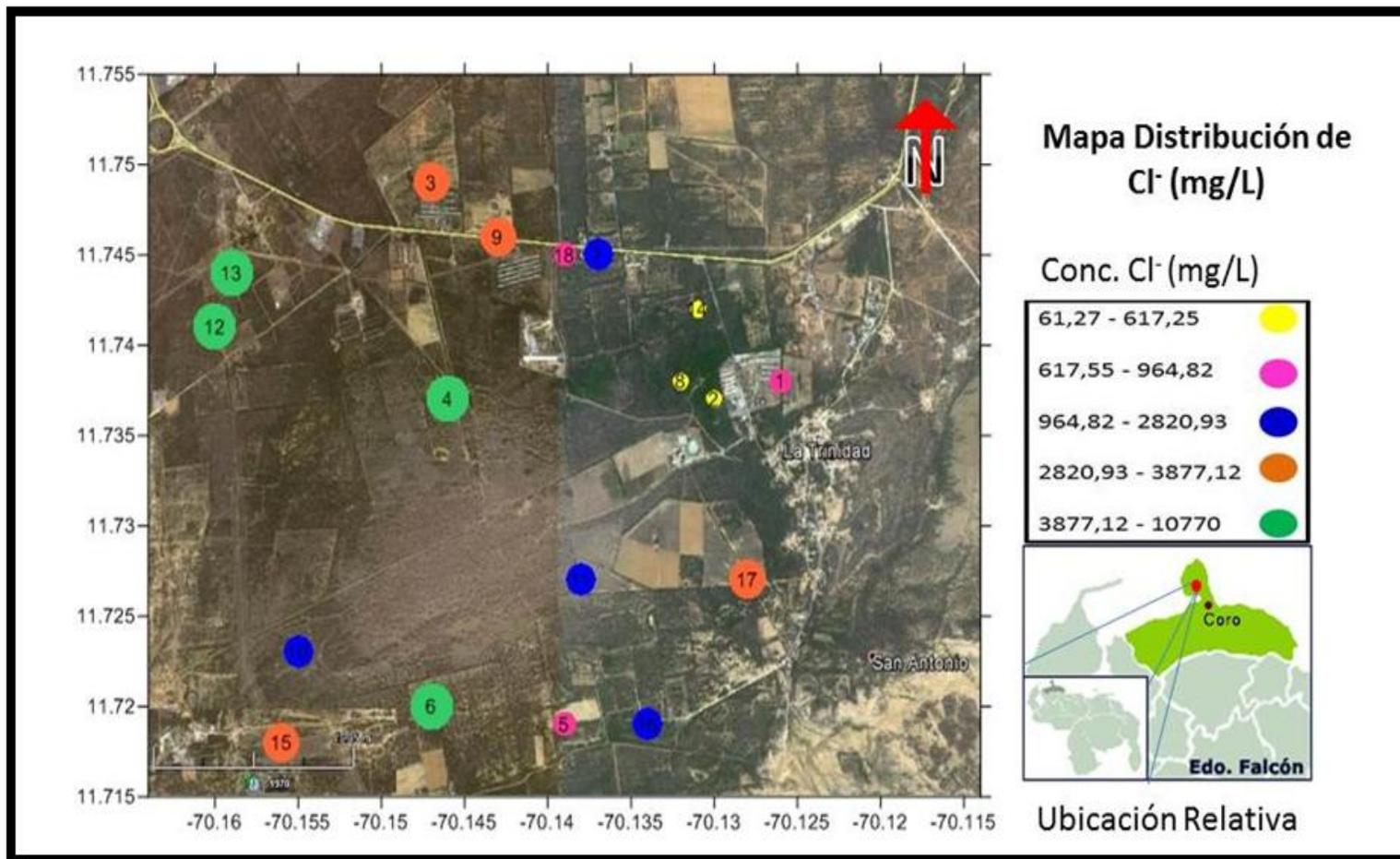


Figura 38.- Distribución espacial de Cl<sup>-</sup>

## **Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ )**

Como fue comentado anteriormente, el  $\text{HCO}_3^-$  proviene de la disolución del  $\text{CO}_2$  atmosférico, generando con ello un equilibrio entre estas especies, donde en las aguas subterráneas la concentración de este anión varía entre 50 y 400 mg/L, pudiendo extenderse dependiendo del proceso asociado hasta 800 mg/L (Porrás et al., 1985). De acuerdo a la distribución observada en la figura 39, el  $\text{HCO}_3^-$  se distribuye de manera un tanto uniforme, ya que tienen altas concentraciones tanto hacia el este como en el oeste de la zona de estudio; en ese sentido, muestras como la 7 y 17 cuyos valores oscilan entre los 800 y 1000 mg/L respectivamente están mezcladas con muestras como la 1, 2 y 8 cuyos valores son más bajos (519,62; 385, 57 y 248,60 mg/L respectivamente).

En general, las aguas estudiadas poseen valores de pH menores a 8,3 lo que permite indicar que en estas aguas predomina el  $\text{HCO}_3^-$  frente al  $\text{CO}_3^{2-}$ , o que su concentración es muy baja (Toro, 2012). Obsérvese en la tabla del apéndice A, que los valores de pH para las aguas del acuífero “El Taparo” son ligeramente ácidos en 13 de las 18 muestras captadas y ligeramente alcalinas para las 5 restantes. Durante el proceso de interacción agua-roca, las aguas ácidas tienden a disolver el material carbonático presente en los materiales que constituyen el acuífero. En la península de Paraguaná están presentes las formaciones Cantaure y Paraguaná, cuyo material calcáreo es una fuente importante de  $\text{HCO}_3^-$  hacia las aguas subterráneas.

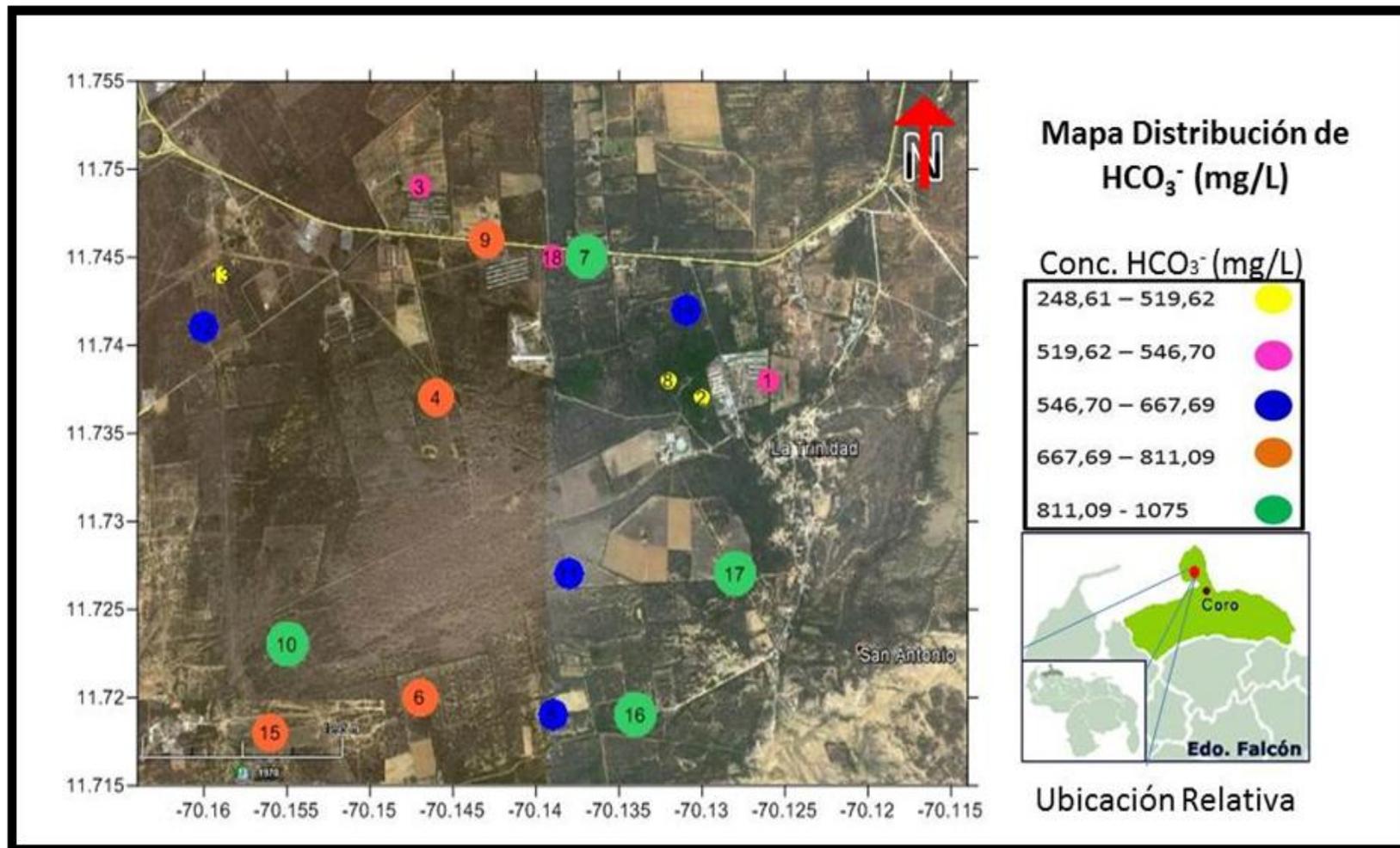


Figura 39.- Distribución espacial de  $\text{HCO}_3^-$

Ayala (2006) reporta para la zona de Santa Ana en la península de Paraguaná, un valor mínimo de 185 mg/L y un máximo de 922 mg/L y una mediana de 443 mg/L, cabe destacar que en este estudio se obtuvieron valores muy similares a los reportados por este autor, lo que permite señalar que el  $\text{HCO}_3^-$  es producto de la disolución de material carbonático.

### **Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )**

De acuerdo a la figura 40 el  $\text{SO}_4^{2-}$  tiene una distribución espacial donde las mayores concentraciones están ubicadas hacia el oeste de la zona de estudio, lugar que se encuentra muy cercano a la costa de la península. Langmuir (1997) reporta un valor promedio para aguas de mar de 2700 mg/L; mientras que para aguas subterráneas el valor es de 30 mg/L, a su vez, Custodio y Llamas (1976) indica que las aguas dulces tienen valores de concentración entre 2 mg/L y 150 mg/L. En ese sentido, las muestras 1, 2, 5, 8, 14 y 18 pueden ser clasificadas como aguas dulces, mientras que el restante puede catalogarse como agua de mar, siendo estas últimas afectadas por el avance de la cuña salina hacia el acuífero.

Otro factor importante de aporte de  $\text{SO}_4^{2-}$  a las aguas estudiadas es el lavado de terrenos con presencia de material yesífero, como las lutitas yesíferas de la Formación Cantaure, la cual según González de Juana et. al. (1980) contiene yeso como uno de sus minerales más abundantes.

Ayala (2006) reporta valores de concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  entre 2 y 2210 mg/L con un valor de fondo de 114 mg/L. Este autor asocia el aporte de este ion a las aguas de la región de Santa Ana de la península de Paraguaná, como producto de la disolución del yeso proveniente de la Formación Cantaure.

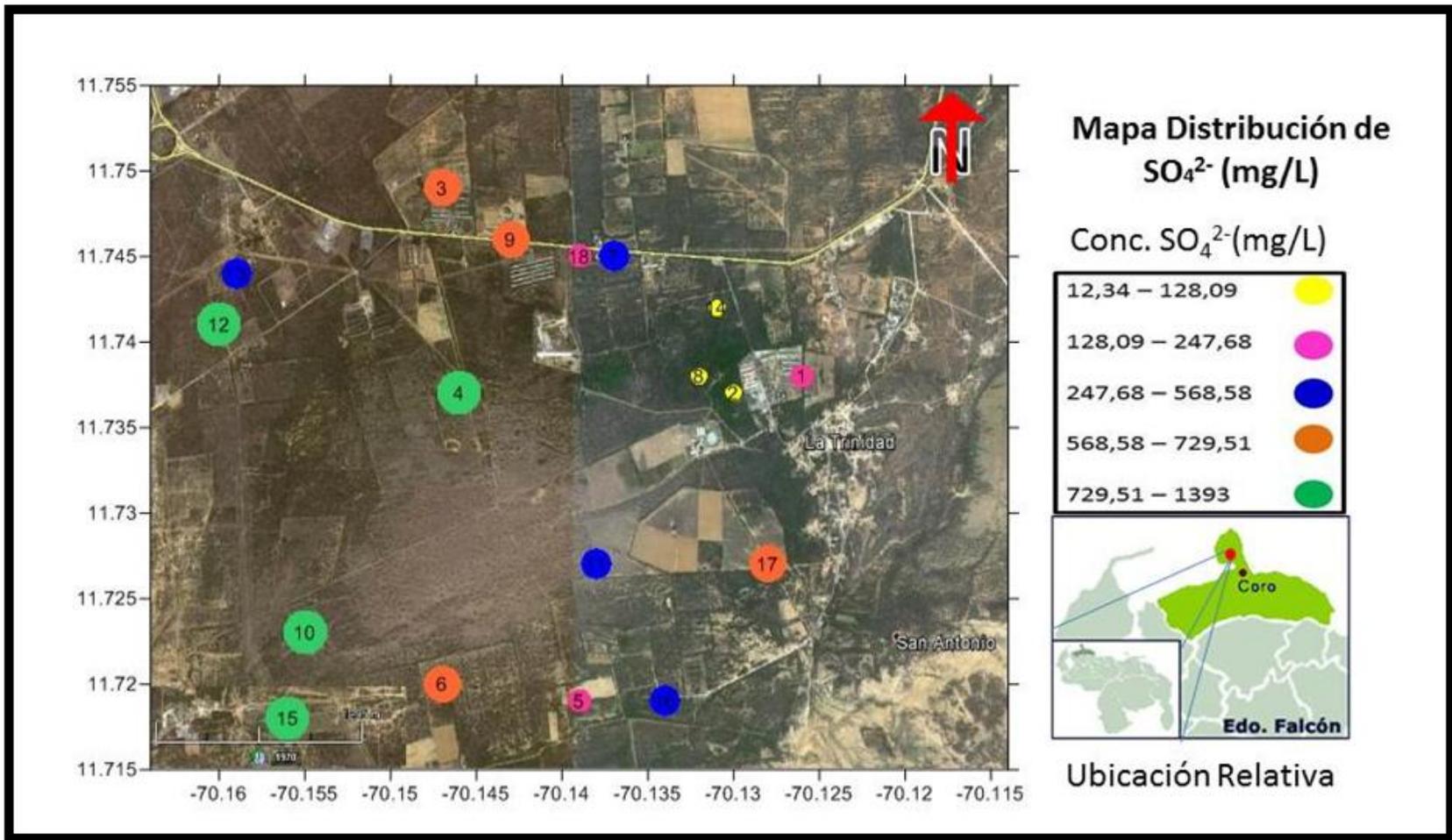


Figura 40.- Distribución espacial de  $\text{SO}_4^{2-}$

## **Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )**

La figura 41 muestra la distribución de las concentraciones del  $\text{NO}_3^-$  en la zona de estudio. Es importante destacar que de las 18 muestras de aguas captadas para la zona de estudio, en solo 11 muestras el  $\text{NO}_3^-$  fue detectado por el equipo usado para la determinación, en un intervalo que osciló entre 0,1265 mg/L y un máximo de 2,5600 mg/L. Se debe señalar que el valor mínimo se corresponde con el asociado al límite de terminación.

Estos valores de concentración pueden ser atribuidos considerados como normales dentro de los aportados al proceso de descomposición de la materia orgánica.

Ayala (2006), reporta valores desde por debajo del límite de detección hasta 200 mg/L asociados a fertilizantes y agroquímicos usados en la zona.

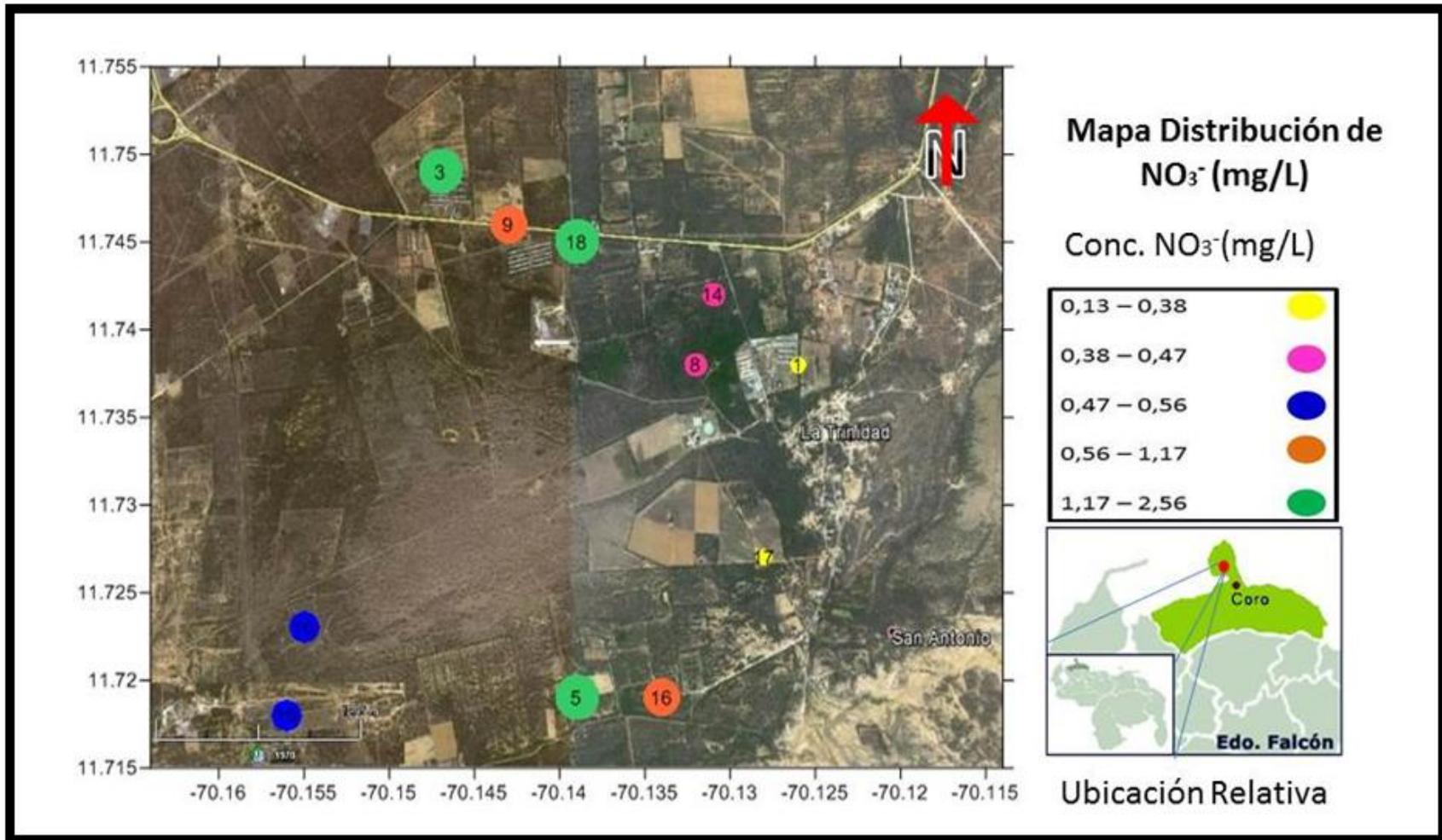


Figura 41.- Distribución espacial de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

### Variación general de la concentración de los aniones $\text{Cl}^-$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ y $\text{NO}_3^-$

De acuerdo con los resultados obtenidos para los diversos aniones estudiados, se puede señalar que las muestras 1, 2, 5, 8 14 y 18 pueden ser clasificadas como aguas dulces; mientras que las muestras restantes, se catalogan como aguas de mar, o a su vez, aguas subterráneas contaminadas por intrusión marina.

En ese mismo orden de ideas, el análisis de los aniones anteriormente expuestos concuerdan con el realizado para los cationes; exceptuando las muestras 1 y 5. Para estos casos este comportamiento puede ser atribuido a la misma mezcla que esta entre el agua dulce del acuífero y la cuña salina confiriéndole así concentraciones tales que pueden ser catalogadas como aguas dulces o como agua de mar.

### **VI.6.- VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÍLICE DISUELTA ( $\text{SiO}_2$ )**

La caja grafica de la sílice disuelta mostrada en la figura 42, muestra una distribución asimétrica positiva, cuyo valor mínimo es de 17,99 mg/L y un valor máximo de 42,05 mg/L, la mediana de la población es de 23,69 mg/L. Prando, 1996 señala que el valor estipulado de la  $\text{SiO}_2$  para las aguas subterráneas es de 16 mg/L; por su parte Porra et al. (1985) reporta valores que están entre 3 y 8 mg/L, pero que pueden extenderse hasta los 100 mg/L; de acuerdo a ello, se puede indicar que los resultados obtenidos en este estudio para  $\text{SiO}_2$  están dentro del intervalo aceptable.

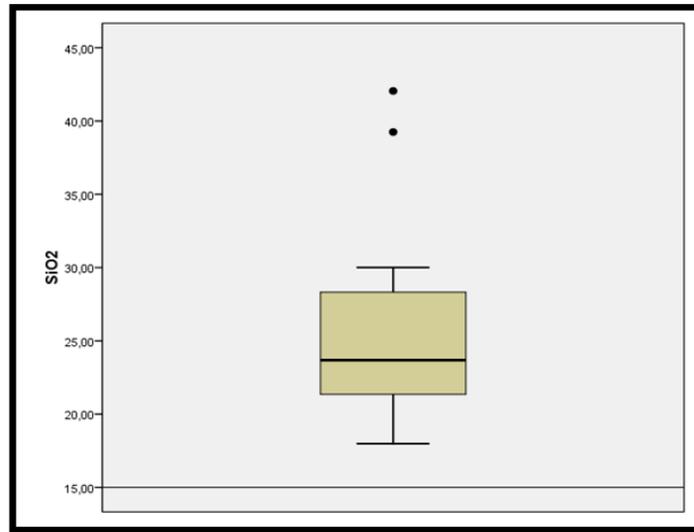


Figura 42.- Caja gráfica para SiO<sub>2</sub>

Por otro lado, espacialmente no existe una distribución de los valores de concentración para SiO<sub>2</sub> en la zona de estudio (figura 43), variando desde muestras con altas concentraciones mezcladas con muestras cuyos valores son más bajos.

En general, las concentraciones de sílice (SiO<sub>2</sub>) provienen de la alteración de los silicatos y aluminosilicatos. Estas aguas están en contacto con minerales como cuarzo, plagioclasas, microclinos, entre otros que están distribuidos a lo largo de las formaciones que conforman la península de Paraguaná y por el cual estas aguas tienen contacto.

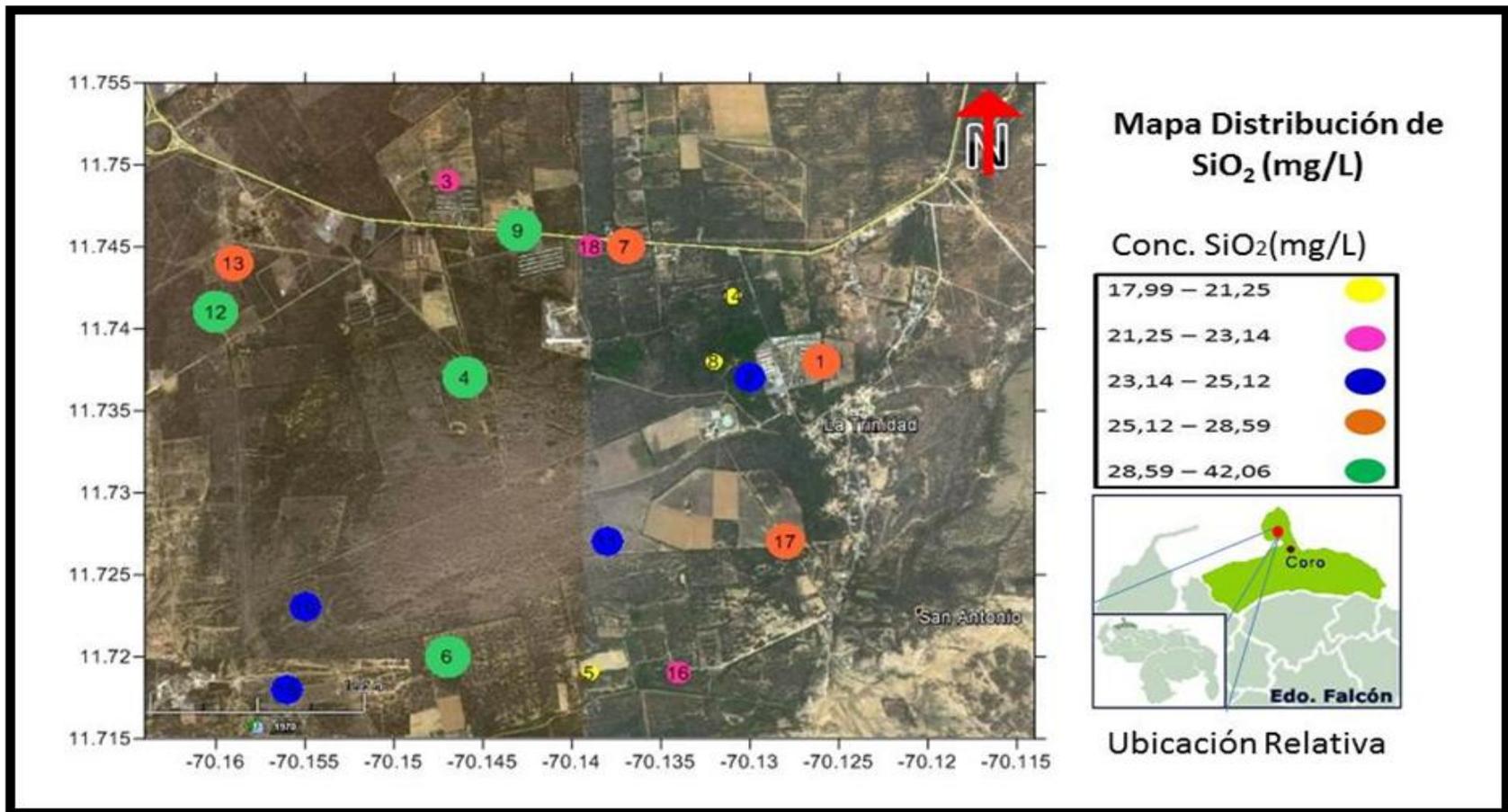


Figura 43.- Distribución espacial de SiO<sub>2</sub>

Ayala (2006), reporta valores de SiO<sub>2</sub> entre 13 y 77 mg/L, cuya mediana es de 37,5 asociando dichos valores a disolución de material siliciclástico.

## **VI.7.- CALIDAD DE LAS AGUAS DE ACUERDO AL DECRETO 883**

### **(GACETA 5.021, 1995)**

La evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del acuífero “El Taparo” y con ello el posible aporte de las mismas, fue realizada atendiendo a la normativa nacional a través del Decreto 883 (Gaceta oficial 5.021, 1995). En ese sentido, del total de las aguas captadas solo la muestra 8 cumple con el decreto 883 para las clases de aguas tipo 1 y 2, es decir las aguas de uso doméstico y agrícola, esto en función de los valores de concentración de Na<sup>+</sup> determinado, representando solo el 5,56%.

En cuanto al K<sup>+</sup>, el 27,78% de la población de muestras representado por las muestras 2, 5, 8, 14 y 18 cumplen con el Decreto 883, catalogándolas como aguas clase 3, las cuales pueden ser usadas para la cría y explotación de organismos marinos.

Por su parte, el Ca<sup>2+</sup> solo el 22,22% cumple con el Decreto 883 para las aguas tipo 1, 2 y 3.

Para el Mg<sup>2+</sup> ninguna muestra cumple con el límite permisible para las clases 1 y 2; mientras que para la clase 3, solo 3 muestras correspondientes a las números 8, 14 y 18 que representan el 16,7% cumplen con el Decreto 883 para dichas aguas.

Para el caso del Cl<sup>-</sup>, 2 muestras cumplen con el límite permisible para tipo 1,2 y 3, correspondientes a las muestras 8 y 14 representando el 11,11% de la población.

Por otro lado, el  $\text{SO}_4^{2-}$  posee un límite para las aguas clase 1, 2 y 3 que solo lo cumplen 7 muestras que representan el 38,9% de la población.

En cuanto al  $\text{HCO}_3^-$ , solo la muestra 8 representa la población que cumple con el requisito, lo que representa el 5,56% de la población. No obstante, para el  $\text{NO}_3^-$ , todas las muestras cumplen el requisito del Decreto 883.

Podría señalarse que de toda la población de muestras de aguas captadas solo una de ellas puede ser considerada como de uso doméstico y agrícolas representando el 5.56% del total, correspondiente a la muestra 8 mientras que las restantes no cumplen con los requisitos expuestos en este Decreto, por lo que se pueden catalogar como no aptas para el consumo humano, bien sea en el ámbito doméstico o agrícola.

En la tabla 13 se resume cada una de los tipos de aguas y las muestras que cumplen con sus requisitos.

Tabla 13.- Límites permisibles para las especies según Decreto 883 (Gaceta oficial 5.021, 1995)

<b>Especie</b>	<b>Concentración en mg/L acuífero El Taparo</b>	<b>Límite permisible decreto 883 (mg/L)</b>
<b>Na<sup>+</sup></b>	130,9-5207,5	140 (clases 1 y 2)
<b>K<sup>+</sup></b>	9,3-480	20 (clase 3)
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	11,1-1002	200 (clases 1,2 y 3)
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	9,8-1109,6	0,2 (clases 1 y 2), 70 (clase 3)
<b>Cl<sup>-</sup></b>	61,27-10769,2	300 (clase 1) 250 (clases 2 y 3)
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	12,34-1392	340 (clases 1, 2 y 3)
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,12-2,56	10 (clases 1 y 2)
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	248,60-1074,11	370 (clases 2 y 3)

## VI.8.- RELACIONES INTERELEMENTALES

Seguidamente se presentan una serie de relaciones iónicas que permiten apoyar las diferentes interpretaciones realizadas a los fines de verificar los diversos orígenes y procesos de las aguas captadas para el sector El Taparo de la península de Paraguaná en el estado Falcón.

### Relación $\text{Na}^+/\text{K}^+$

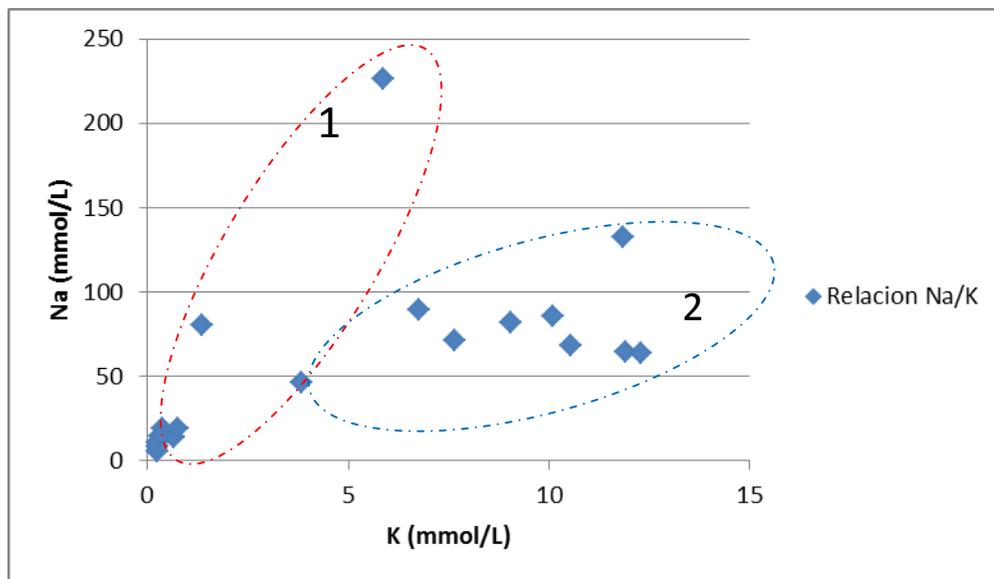


Figura. 44.- Relación iónica Na/K en mmol/L

La figura 44 presenta la relación entre el  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  nótese que no existe una buena correlación entre sí; no obstante, pueden observarse 2 grupos de muestras que podrían estar asociadas a la existencia de al menos 2 fuentes de  $\text{K}^+$  a las aguas estudiadas. En ese sentido, la relación  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  en mmol/L propuesta por IGME

(2003) (tabla 16) permite que las muestras 2, 4, 5, 14, 16 y 18 cuya relación está entre 30 y 60, sean clasificadas como aguas que han sufrido intrusiones marinas.

De igual forma, Custodio y Llamas (1976) plantean que para la relación K/Na, valores entre 0,02 y 0,025 representan aguas marinas, apoyando con esto la conclusión planteada anteriormente.

Tabla 14.- Relaciones iónicas Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> para las muestras captadas en mmol/L

Muestras	rNa/rK (IGME, 2003)	rK/rNa (Custodio y Llamas, 1976)
1	20,19	0,05
2*	41,39	0,02
3	5,16	0,19
4*	38,69	0,02
5*	49,50	0,02
6	9,06	0,11
7	25,53	0,04
8	23,94	0,04
9	5,44	0,18
10	6,49	0,15
11	12,05	0,08
12	11,20	0,08
13	13,24	0,07
14*	32,60	0,02
15	8,47	0,12
16*	59,22	0,02
17	9,28	0,11
18*	48,51	0,02

\*muestras que corresponde a aporte por parte de disolución mineral, las restantes son producto de intrusiones marinas.

Obsérvese la figura 45 que compara la distribución espacial de la concentración de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  la existencia de una buena correlación entre estos, donde la muestra 2, quien representa de esta distribución (tabla 16) la muestra que más baja concentración posee para estos cationes, de acuerdo a lo planteado en el Decreto 883 (Gaceta oficial 5.021, 1995), esta muestra no cumple con los requisitos para el uso doméstico o agrícola producto de la elevada concentración de  $\text{Na}^+$  (248,7 mg/L), esto permite señalar que la ubicación geográfica de esta muestra podría representar la zona de transición de la cuña salina, ya que esta levemente contaminada con dichas agua.

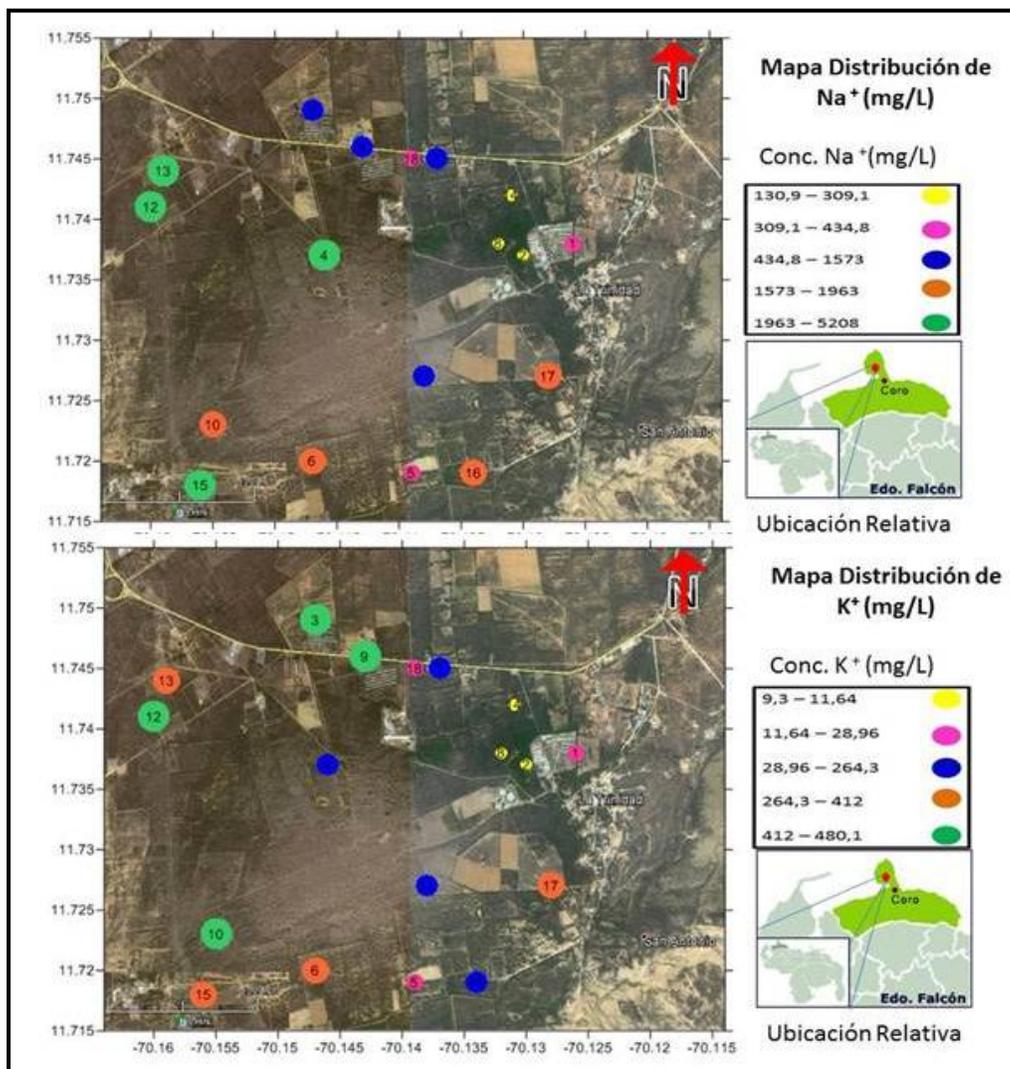


Figura 45.- Mapa comparativo entre los valores de concentración de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en mg/L.

### Relación $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$

La figura 46 muestra la relación existente en mmol/L entre el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{HCO}_3^-$ , obsérvese que en general no existe una buena correlación entre las muestras captadas, sin embargo, esta figura permite proponer la existencia de al menos 3 grupos de muestras, que concuerdan con los resultados de acuerdo al diagrama de Piper. Esto permite señalar la existencia de fuentes diversas de aporte de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  a las aguas del acuífero “El Taparo”. Custodio y Llamas (1976), señala que la relación entre estos iones para el agua de mar varía entre 20 y 50, mientras que para aguas de dulces, están entre 0,1 y 5.

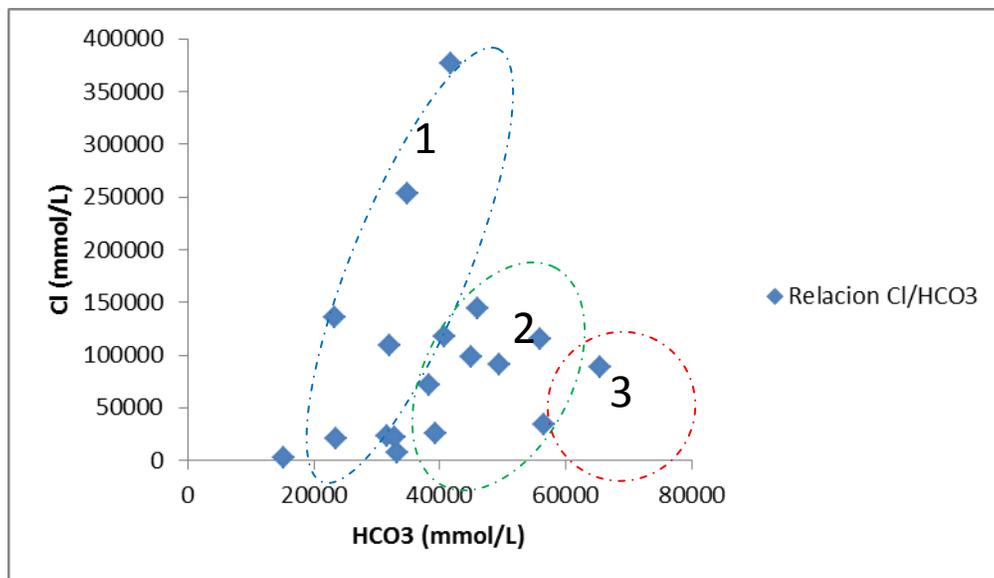


Figura 46.- Relación iónica entre  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  en mmol/L.

La tabla 15 presenta los valores obtenidos para dicha relación para las muestras de aguas estudiadas, donde las muestras 4, 12 y 13 representan el grupo catalogado como aguas de origen marino, correspondiendo estas con las muestras de agua captada mas hacia el Oeste de la zona de estudio, es decir las

muestras que están más cercanas a la costa. Por otro lado, las muestras 3, 6, 9, 10, 11, 15 y 17 presentan una relación mayor a 5 que escapan de lo propuesto por el mencionado autor para las aguas dulces (0,1 y 5) lo que podría considerarse estas muestras como aguas que están en proceso de mezcla con el agua de mar que están intrusionando la zona, o si se quiere aguas ya contaminadas con la marina, ya que por ejemplo las muestras 15 y 17 presentan valores de mg/L entre 2820 y 3877.

Tabla 15.- Relaciones iónicas  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  para las muestras captadas

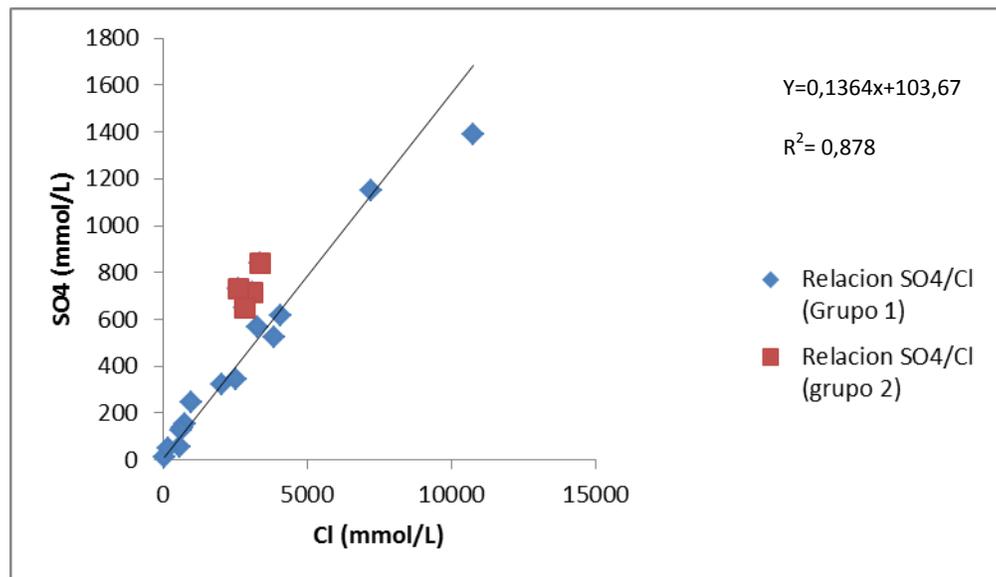
Muestras	$\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ (Custodio y Llamas, 1976)
1	2,18
2	2,67
3x	10,27
4*	27,02
5	1,97
6x	9,37
7	1,77
8	0,42
9x	6,58
10x	5,51
11x	5,59
12*	21,74
13*	17,50
14	0,65
15x	8,69
16	4,04
17x	6,15
18	1,98

\*muestras que correspondientes a contaminación por producto de intrusiones marinas.

xmuestras relacionadas a proceso de mezcla de agua dulce/agua salada.

## Relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$

La figura 47 muestra la relación de las especies químicas  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  en mmol/L. En dicha figura se aprecia la presencia de 2 grupos: para el primer grupo, se puede observar la excelente relación entre ambas especies, demostrado por su  $R^2 = 0,878$  obteniendo una pendiente de 0,1364; mientras que el segundo grupo no guarda relación directa entre las especies indicadas. La relación obtenida para el primer grupo apunta hacia una fuente de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  en las aguas subterráneas del acuífero "El Taparo" no siendo este el caso para el grupo 2. En el mismo orden de ideas, de acuerdo al IGME (2003) relaciones entre 0,2 y 0,4 representan aguas dulces; por su parte para aguas marinas esta relación es de 0,11 valor muy similar al obtenido para la pendiente del primer grupo.



## Relación Na<sup>+</sup>/ Cl<sup>-</sup>

La relación Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> en mmol/L presentada en la figura 48 muestra la existencia de una alta correlación descrita a través del  $R^2 = 0,9726$  y de una pendiente igual a 0,3042. El valor de la pendiente obtenido apunta hacia el origen marino de las aguas contenidas en el acuífero "El Taparo", por su parte la tabla 16 resume la relación de Sulin, observándose la existencia de valores muy cercanos a 0,8 y un valor de 2,14 correspondiente a la muestra 8.

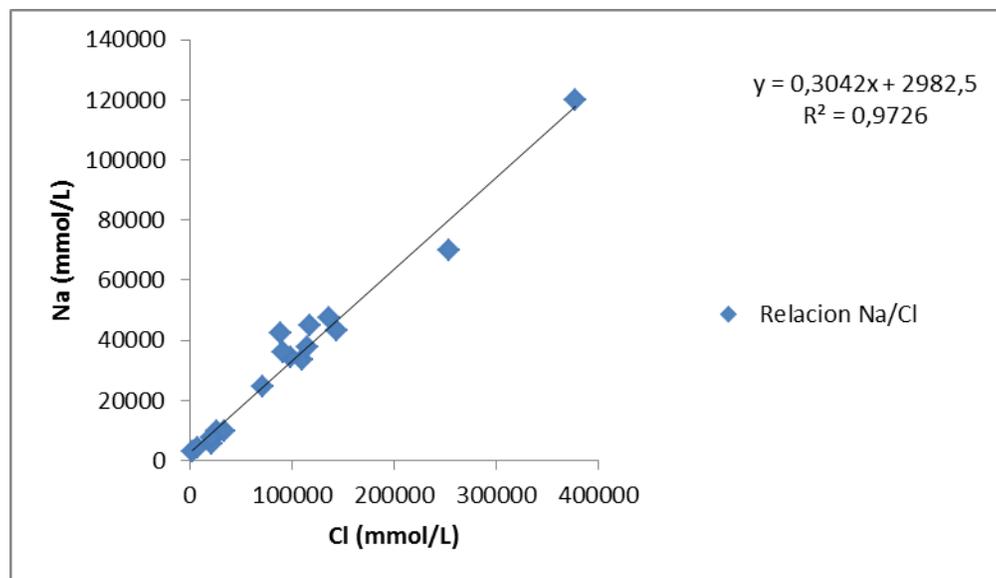


Figura 48.- Relación Na<sup>+</sup>/rCl<sup>-</sup>

Custodio y Llamas (1976) indican que una relación mayor a 1, está representando la meteorización de silicatos en la zona, mientras que la relación menor a 1 corresponde a la disolución de halita, es decir, muestras que poseen un origen marino.

Los resultados obtenidos para la relación de Sulin mostrados en la tabla 16, concuerdan con los arrojados por el diagrama de Piper y por las figuras de Stiff,

confirmando la presencia de aguas asociadas a intrusión marina y con aguas dulces representadas por ser del tipo bicarbonatadas sódicas.

Tabla 16.- Relaciones iónicas Na<sup>+</sup>/ Cl<sup>-</sup> para las muestras captadas en mmol/L

Muestras	Na/Cl
1	0,47
2	0,42
3	0,47
4	0,48
5	0,58
6	0,46
7	0,45
8*	2,14
9	0,53
10	0,61
11	0,52
12	0,42
13	0,53
14	0,94
15	0,58
16	0,73
17	0,50
18	0,54

\*muestra catalogada como agua dulce, producto de interacción agua roca y disolución mineral

Relación  $Ca^{2+}+Mg^{2+}/HCO_3^-+SO_4^{2-}$

Datta y Tyagi (1996), señalan que una manera de verificar si la presencia de especies minerales sulfatadas y carbonáticas contribuyen con la composición química es a través de la relación  $Ca^{2+}+Mg^{2+}/ SO_4^{2-}+HCO_3^-$ . En este trabajo se construyó esta relación (Figura 49) para las aguas subterráneas contenidas en el acuífero “El Taparo”. En ese sentido, las muestras de aguas donde el proceso de

disolución de minerales sulfatados y carbonáticos toman preponderancia, representados estos en la calcita, dolomita y yeso. Este proceso de disolución se puede llevar a cabo por la adición del agua que es aportada mediante la irrigación, la infiltración del agua de lluvia y el movimiento del agua subterránea (Sánchez, 2012).

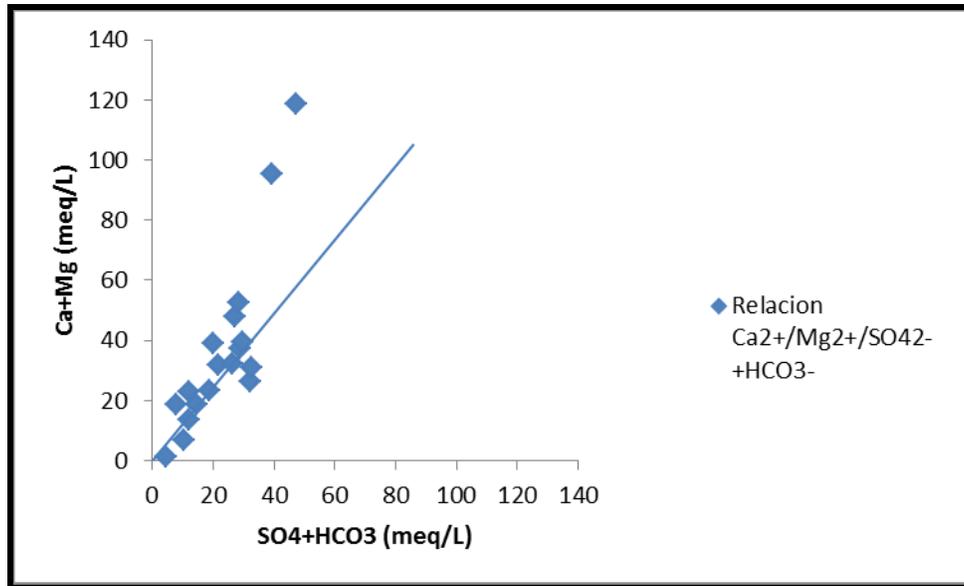


Figura 49.- Relación  $Ca^{2+}+Mg^{2+}/HCO_3^-+SO_4^{2-}$

Asimismo, en dicha figura puede ser observadas muestras que están por encima o debajo de la línea 1:1 esto según el autor representa la existencia de procesos de aporte de iones distintos al antes mencionado, destacando el asociado al intercambio iónico. Para apoyar esta premisa, se presenta la relación  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ , propuesta por Mayo y Loucks (1995) presentados en la tabla 17, quienes señalan que relaciones superiores a 2 están asociadas a la disolución de minerales silicatados y aluminosilicatos; mientras que los valores menores, indican que domina la disolución de calcita. En atención al valor de esta relación, en la tabla 20 se puede observar que las muestras 4 y 5 son las que están asociadas a disolución de minerales silicatados y aluminosilicatos; por su parte, las muestras restantes corresponden a las muestras de aguas cuya composición está controlada

por la disolución de calcita, que constituye otro aporte de  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  a las muestras de aguas captadas en la zona, a diferencia de aquellas cuyos iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  provienen de la intrusión marina.

Tabla 17.- Relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$

Muestras	Mg/rCa
1	0,56
2	0,56
3	0,89
4	3,35
5	2,54
6	1,48
7	1,20
8	1,45
9	1,70
10	1,37
11	1,31
12	0,90
13	0,90
14	0,35
15	1,56
16	1,20
17	1,54
18	0,71

\*muestras relacionadas a la disolución de aluminosilicatos

## VI.9.- PROSPECCION GEOFISICA

De acuerdo a los datos suministrados por el INAMEH en sus reporte geofísico 2013, se pudo contrastar con los datos hidrogeoquímicos presentados en este trabajo de investigación, donde se puede notar una marcada correlación entre ambos análisis. El uso de sondeos eléctricos verticales (SEV) como método complementario a esta investigación arrojó la presencia en la zona de 3 unidades geoelectricas (Apéndice E), estos SEV fueron tomados en la zona de la Trinidad y

El Taparo Sur. En la figura 50, se pueden observar los 7 SEV realizados en la zona de estudio.

Para el caso de los SEV correspondientes a los puntos 13, 14, 15 y 19 los valores de resistividades obtenidas en la zona se permiten identificar 3 unidades geoelectricas, caracterizadas por la presencia de arenas de grano medio, fino y calizas compactas de tope a base. Por otro lado, los SEV correspondientes a los puntos 16, 17 y 18 se caracterizan por poseer 4 unidades litológicas, constituidas por estas arenas de grano medio a grueso, arenas de grano fino, arcillas limosas y arenas calcáreas compactas.

Estos resultados obtenidos permiten correlacionar las unidades litológicas identificadas con los datos hidrogeoquímicos. La figura 51 señala que los SEV se corresponden con las muestras 1, 2, 3, 7, 8, 9, 14, 17 y 18 estas muestras representando estas un reflejo de los 3 tipos de aguas identificados mediante el diagrama de Piper y figuras de Stiff.

En atención a lo planteado anteriormente, se puede indicar que las unidades litológicas identificadas tienen una alta correlación puesto que en esta zona se encuentran las aguas con más baja conductividad y salinidad, correspondientes a como las aguas bicarbonatadas, cálcicas y/o magnésicas, esto conlleva a señalar que existe correspondencia con respecto a la fuente de estos iones en dichas aguas; es decir al existir por ejemplo las calizas compactas en la zona, al estar en contacto con el agua, permite la lixiviación y transporte en solución de los iones hasta las aguas subterráneas de la zona.

Figura Nº 9.

Ubicación Sondeos Eléctricos Verticales Sector Táparo- La Trinidad y Táparo Sur.  
Municipio Los Taques. Estado Falcón.



Figura 50.- Distribución de los SEV.

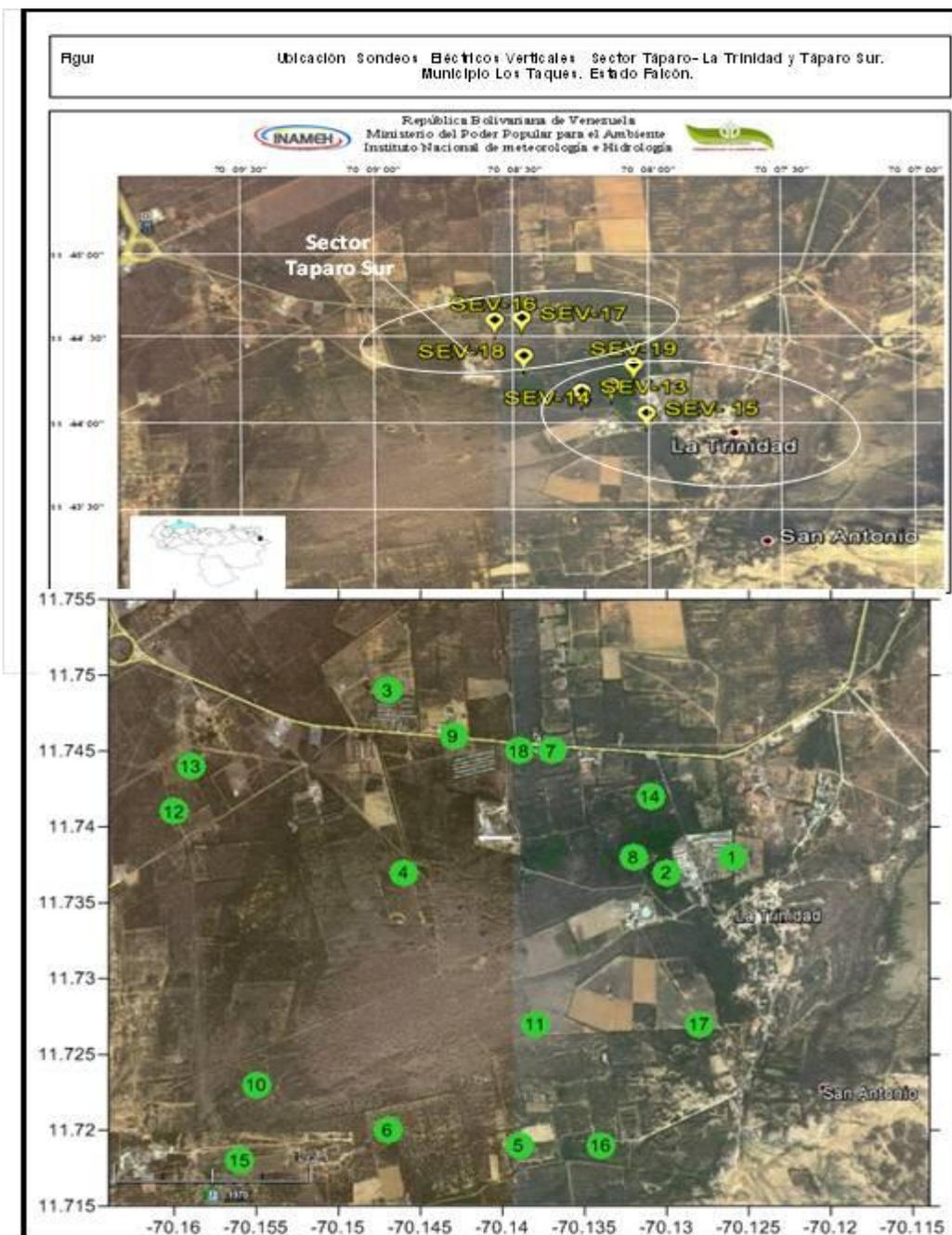


Figura 51.- Ubicación de los SEV y muestras captadas.

De igual forma en esta zona se identificó la presencia de aguas cloruradas sódicas, lo que permitió a su vez a través de este método complementario trazar una posible ubicación de la zona de interfase agua dulce-agua salada que constituye el principal aporte de la salinidad de estas aguas, esta ubicación aproximada se presenta en la figura 52.

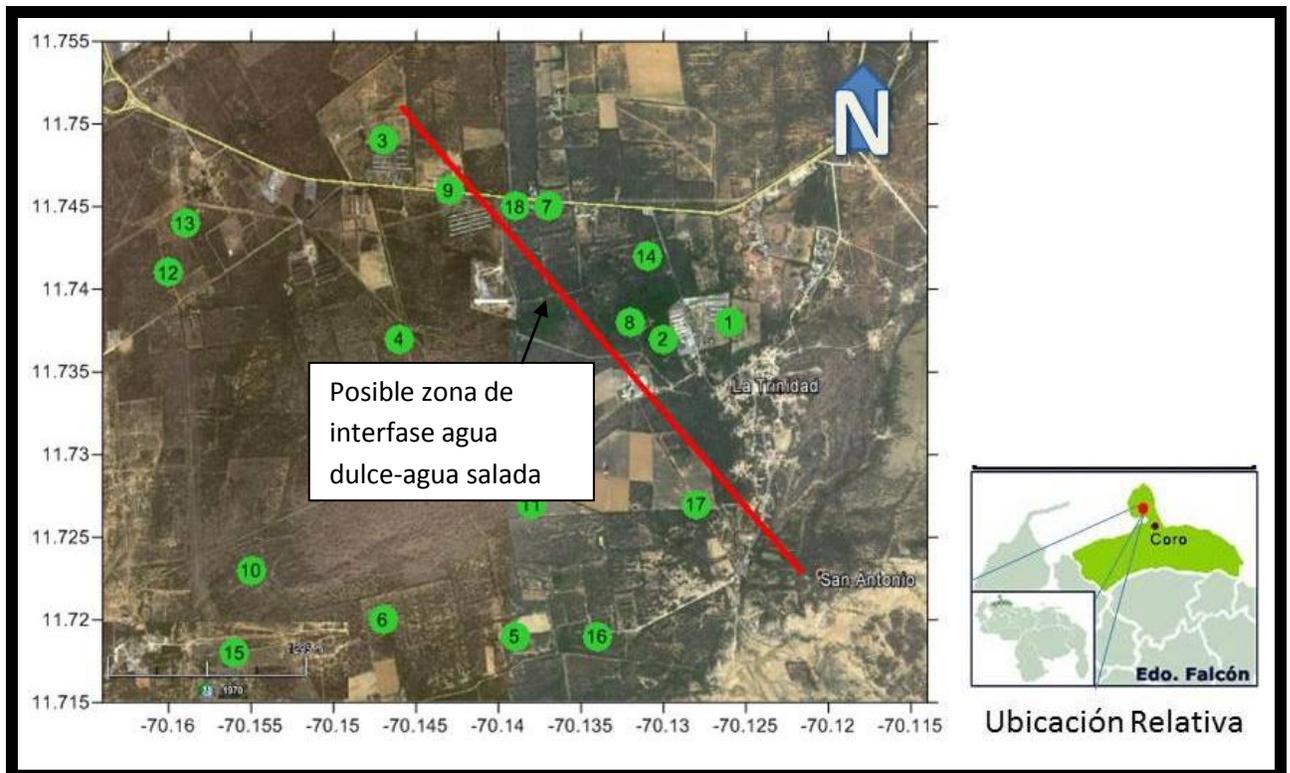


Figura 52.- Ubicación aproximada de la cuña salina.

Esta cuña se ubica en la siguiente zona (Figura 52), ya que allí desde el punto de vista hidrogeológico es donde se produce un cambio en las conductividades y salinidad de las aguas captadas; mientras que de acuerdo a los SEV realizados en El Taparo Sur se encontró zonas o unidades geoelectricas que presentan valores bajos de resistividad entre 1,10 – 2,97 Ohm/m integradas por arenas limosas que determinan la presencia de la zona de interfase agua dulce/salada ó intrusión salina el cual puede ser generada por la miscibilidad entre las aguas superficiales y subterráneas o sobre explotación intensiva de los pozos de agua en el sector. La salinización de las aguas

empieza a manifestarse una vez que se ha excedido la capacidad de recarga del acuífero que facilitan el desplazamiento de la zona de interfase hacia el continente, mientras que en dicha zona se identificaron muestras de aguas con conductividades bajas lo que concuerda con el análisis geofísico con respecto a la existencia de la cuña salina.

Por último, los SEV donde se realizaron los sondeos 16, 17 y 18 permitió señalar que la profundidad de la cuña salina está entre los 6 y 9 m, siendo esto contrastable con los niveles piezométricos de estos pozos reportados en el apéndice A, donde estos representan las zonas de más baja altitud, y por ende la cuña penetra con mayor facilidad estas aguas, mientras que en los otros sondeos se reportan profundidades de 29-30 m de la cuña salina siendo allí donde los pozos reportan mayores niveles piezométricos, es decir los que se encuentran a mayores alturas. Cabe destacar que toda la información geofísica aportada por el INAMEH está ubicada en el apéndice (E y F).

## VII.- CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos y a las discusiones realizadas en este trabajo de investigación, se concluye que:

- Los datos obtenidos presentan alta confiabilidad producto de un % error del balance iónico <10% y de la alta correlación entre las conductividades de campo y teórica.
- Fueron identificadas de acuerdo al diagrama de Piper 3 tipos de aguas a saber: aguas  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$  (61,11%), aguas  $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$  (33,33%) y aguas  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$  (5,56%).
- Las figuras de Stiff permitió identificar 4 tipos de aguas a saber: aguas  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ , aguas  $\text{Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$ , aguas  $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$  y aguas  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ .
- Los procesos predominantes en la zona están determinados por la interacción agua-roca, disolución mineral e intrusión marina.
- Los factores que toman predominancia en la zona es la sobreexplotación de pozos, siendo este el factor contaminante principal en estas aguas. A su vez, el factor litológico y ubicación geográfica también predominan en la zona.
- El proceso que aporta la mayor cantidad de iones a las aguas captadas, corresponde a la intrusión marina que ocurre al oeste de la zona de estudio.
- De acuerdo al artículo 883, el 5,56% de las aguas captadas son de uso doméstico y agrícola, siendo esta la muestra 8, mientras el restante no son de consumo humano.
- La prospección geofísica como método complementario a este trabajo de investigación arrojó que la cuña salina tiene una profundidad de oeste a este de 6 a 30 m.
- A partir de la prospección geofísica se pudo identificar que en la zona están ubicadas unidades litológicas del tipo calizas compactadas, así como arenas de grano medio a grueso.

## VIII.- RECOMENDACIONES

- Debido a la presencia de aguas no aptas para el consumo humano en la zona, se recomienda hacer una campaña que especifique esta connotación, a fin de que las mismas no sigan siendo usadas por la población de la península para su consumo.
- Realizar un estudio más amplio en la zona, así como en las zonas adyacentes a fin de complementar los datos para así tener una mayor relación del origen de las aguas subterráneas del estado Falcón.
- Realizar un estudio isotópico en la zona de estudio que pueda complementar los datos aquí presentados, a fin de tener mayores conocimientos de las aguas subterráneas de la zona.
- Realizar SEV en las zonas que no fueron captadas con el propósito de tener información acerca de la posibilidad de aguas subterráneas y la litología presente en esta.
- Realizar un estudio orientado a la contaminación ambiental producto de la sobreexplotación de pozos en la zona, con el propósito de evitar mayores contaminaciones por intrusión marina.
- Realizar un estudio más detallado tanto desde el punto de vista hidrogeoquímico como geofísico que pudiese dar información acerca de la ubicación exacta de la zona de interfase agua dulce-agua salada.

## VIII.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Public Health Association (APHA). (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington DC. 19th edition. pp. 932-938.
- Atwia, M.; Abu-Heleika, M.; El-Horiny, M. (2012). "Hydrogeochemical and Vertical Electrical Soundings for Groundwater Investigations, Burg El-Arab Area, Northwestern Coast of Egypt" African Earth Sciences, in press.
- Astier, J.L. (1975). "Geofísica aplicada a la hidrogeología" Paraninfo. Primera edición. Madrid, España. 341 p.
- Ayala, L. (2006). "Procesos, factores y calidad química de las aguas subterráneas de la región de Santa Ana, Península de Paraguaná, estado Falcón". Universidad Central de Venezuela, trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 142p.
- Baghvand, A; Nasrabadi, T; Bidhendi, G; Vosoogh, A; Karbassi, A y Mehrdadi, N. (2010) "Groundwater quality degradation of an aquifer in Iran central desert". Desalination, volume 260, 264-275.
- Barreto, M (2006). Estudio hidrogeoquímico de las aguas superficiales de la zona costera comprendida entre las bocas de los ríos Yaracuy y Tocuyo, Estado Falcón, Venezuela. Universidad Central de Venezuela, trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 119p
- Codecido, G.; Martín, C.; Bartok, P. (1974). "Excursion geológica a la Península de Paraguaná. Disponible: <http://www.pdv.com/lexico/excursio/exc-n74.htm> [Consulta: 2012, Diciembre]
- Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela (CECPV). (2011). PDVSA. Disponible: [www.pdv.com/lexico](http://www.pdv.com/lexico) [Consulta: 2012, Diciembre]
- Custodio, E. y Llamas, M. (1976). Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, S.A. Casanova. Barcelona, España. 2359p.
- Datta, P. and Tyagi, S. (1996). Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater regime. Journal of the Geological Society of India, 47,179–188
- Decreto 883. Gaceta oficial extraordinaria: 5.021. 11 de Octubre de 1995

- Fagundo, C. Juan R. (2007). "Contribuciones al desarrollo de la hidrogeoquímica". Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional. La Habana, Cuba.
- Fagundo, J. y González, P. (2005). "Hidrogeoquímica". Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional. La Habana, Cuba. 314p.
- Faublack, A. (2008). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de los sectores Barbacoas, edo. Aragua y Cachamas, edo. Guárico, Venezuela. Universidad Central de Venezuela, trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 109p.
- Freeze, R. y Cherry, J. (1979). "Groundwater" Prentice Hall. 344p.
- Gamboa, Naily (2007). "Estudio hidrogeoquímico y geofísico en el sector La Cabrera, carretera vieja Ocumare- Charallave, estado Miranda, Venezuela. Universidad Central de Venezuela, trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 142p.
- Gil, J. (2008). Recursos Hidrogeológicos. Disponible: <http://jugimo.blogspot.com/search/label/Hidrogeolog%C3%ADa%204.2.%20%20LOS%20ACU%C3%8DFEROS> [Consulta: 2012, Noviembre]
- Gómez, J. (2009). "Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero del municipio de turbo" Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de Grado. Medellín, Colombia. 77p.
- González de Juana, C.; Iturralde de Arozena, J. y Picard, X. (1980). Geología de Venezuela y desus Cuencas Petrolíferas. Ediciones Foninves. Primera Edición. Tomo I y II. 1031p.
- Gran, G. (1952). Determination of the Equivalence Point in Potentiometric Titrations. Part II, Analyst, Vol. 77, pp.661-671.
- Guerra L., Mervis y Morón P., Nayleth I. (2007) "Propuesta de un organismo a nivel nacional encargado de aplicar un programa de prevención y Control en la contaminación de las aguas subterránea en Venezuela". Universidad de Oriente, Trabajo de Grado. Barcelona, Venezuela. 87 p.
- Guzmán C., Daiana G. y Pereira T., Katy Y. (2009). "Estudio de gestión de las aguas subterráneas en Venezuela, caso especial: acuífero de la mesa de Guanipa". Universidad de Oriente, Trabajo de Grado. Barcelona, Venezuela. 93p.
- Hem, J. (1985). "Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. USGS. 3era. Edición. 263 p.

- Hiscock, K (2006). "Hydrogeology, principle and practice" 1era. Edición. Editotial Blackwell publishing. Reino Unido. 377p.
- Instituto Geológico y Minero de España I.G.M.E. (2007) "Aguas Subterráneas, ¿la solución para un planeta sediento?" [En línea]. Disponible en: [http://aiplanetatierra.igme.es/pdf\\_proCien/es/Aguas%20subterr%C3%A1neas-AIPT.pdf](http://aiplanetatierra.igme.es/pdf_proCien/es/Aguas%20subterr%C3%A1neas-AIPT.pdf). Consulta: 15/10/2012.
- Instituto Geológico y Minero de España I.G.M.E. (2003) "Estudio hidrogeológico para la definición de áreas sobreexplotadas o en riesgo de sobreexplotación en la zona baja del Este de gran canaria. 67p
- INAMEH (2012). "Evaluación preliminar del potencial y calidad de las aguas subterráneas en el sector San Antonio y El Taparo, estado Falcón". 35p. Informe no publicado.
- INAMEH (2013) "Prospección geofísica en la zona de El Taparo Sur y la Trinidad, Estado Falcón. 67 p. Informe no publicado.
- Jamshidzadeh, Z. y Mirbagheri, S.A. (2011). "Evaluation of groundwater quantity and quality in the Kashan Basin, Central Iran". Desalination, volume 270, 23-30.
- Kassabi, E (2002). "Estudio hidrogeoquímico y remediación de aguas subterráneas de la cuenca del Lago de Valencia. Universidad Central de Venezuela, trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 63p.
- Keith, D. (1973). Hidrología. Agua subterránea. Edición Paraninfo, Madrid – España, 371p.
- Ketata, M; Hamzaoui, F; Gueddari, M; Bouhlila, R y Ribeiro, L (2011). "Hydrochemical and statistical study of groundwaters in Gabes-south deep aquifer (south-eastern Tunisia)" Physics and chemistry of the Earth. Volume 36, 187-196.
- Kutos, O. (2012). "Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, estado Aragua" Universidad Central de Venezuela, trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 130p.
- Langmuir, D. (1997) "Aqueos enviromental geochemistry. Prentice Halla. Colorado School of Mines. USA. 294p.
- López, J. y Gómez, J. (2007). "La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles" Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 15.3. 266-273.

- López G., Juan.; Fornés A., Juan M.; Ramos G. Gerardo.; Villarroya G. Fermín. (2009). “Las aguas subterráneas: Un recurso natural del subsuelo” 4<sup>o</sup> Edición. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.100p.
- Mayo, A. y Loucks, M. (1995). “Solute and isotope geochemistry and groundwater flow in the central Wasatch range, UTAH. Journal of hydrology, Amsterdam. Vol 172. 31-39p
- Michel, J (2006) “Estudio de la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la cuenca La Fuente-Paraguachí, isla de Margarita, Edo. Nueva Esparta. Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias.
- Mojsiewicz y Pienkowska (2003). Analytical fractionation of silicon compounds in foodstuffs. Food Control 14. 153-162 p.
- Mondal, N.C.; Singh, V.P.; Singh, V.S. y Saxena, V.K. (2010) “Determining the interaction between groundwater and saline water through groundwater major ions chemistry”. Journal of Hydrology. Volume 388, 100-111.
- Monjerezi, M; Vogt, R; Aagaard, P y Saka, J. (2011) “Hydro-geochemical processes in an area with saline groundwater in lower Shire River valley, Malawi: An integrated application of hierarchical cluster and principal component analyses” Applied Geochemistry. Volume 26, 1399-1413
- Montero, R. (1996) “Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas asociadas a zonas de explotación de hidrocarburos. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. Instituto de Ciencias de la Tierra. 203 p.
- Oropeza, J (2009). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la cuenca de los Valles del Tuy, en el sector de Charallave-Paracotos, edo. Miranda, Venezuela. Universidad Central de Venezuela, trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 120p.
- Porras, J.; Nieto, P.; Alvarez-Fernández, C.; Fernández, A. y Gimeno, M. (IGME) (1985). Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Disponible: <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/lib43.htm> [Consulta: 2012, Noviembre]
- Prando, R. (1996) “Manual de gestión de la calidad ambiental. Editorial Piedra Santa S.A. Guatemala. 184p.
- Pulido A. y Rodríguez, T. (2007). “Los acuíferos costeros y el suministro de agua de mar a las plantas desaladoras” Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 15.3. 274-279.

- Rodríguez, D (2000). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la zona La Fuente-Paraguachí, Isla de Margarita, Venezuela. Universidad Central de Venezuela, trabajo especial de grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 163p.
- Sánchez, F. (2011). "Medidas puntuales de permeabilidad". Universidad de Salamanca, 13 pp. (En: <http://hidrologia.usal.es> Consulta: noviembre 2012).
- Toro, D. (2012) "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. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias. Caracas.
- UNESCO (2007). Water in a changing world. The United Nations World Water Development. Report 3. World Water Assessment Programme, 318 pp
- Vargas, J. (1997) "Estudio preliminar de las características hidrogeológicas de las isla de Margarita, Edo. Nueva Esparta, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

## APENDICE A

### Datos de los pozos captados

MUESTRAS	CONDUCTIVIDAD ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	pH	NIVEL PIEZOMETRICO	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
1	3020	6,87	21,0	11,738	70,126	21
2	2370	6,80	11,8	11,737	70,13	20
3	12440	7,33	12,0	11,749	70,147	20
4	35600	7,35	10,9	11,737	70,146	19
5	3200	6,74	11,4	11,719	70,139	20
6	15180	6,63	12,0	11,72	70,147	19
7	4420	7,05	9,5	11,745	70,137	17
8	588	7,74	11,5	11,738	70,132	----
9	12470	6,60	11,1	11,746	70,143	20
10	11240	6,65	12,2	11,723	70,155	23
11	8280	6,66	12,3	11,727	70,138	24
12	24800	6,34	12,7	11,741	70,16	21
13	14570	6,65	12,9	11,744	70,159	16
14	1290	6,70	13,0	11,742	70,131	20
15	13200	6,82	14,0	11,718	70,156	22
16	10660	7,28	20,0	11,719	70,134	20
17	12700	6,73	11,2	11,727	70,128	22
18	3000	6,58	9,9	11,745	70,139	40

## APENDICE B

### Concentraciones de las especies determinadas

MUESTRAS	Na <sup>+</sup> (mg/L) +/- 0,1	K <sup>+</sup> (mg/L) +/-0,01	Ca <sup>2+</sup> (mg/L) +/-0,01	Mg <sup>2+</sup> (mg/L) +/-0,01	Cl <sup>-</sup> (mg/L) +/-0,001	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L) +/-0,001	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L) +/- 0,0001	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L) +/- 0,01	SiO <sub>2</sub> (mg/L) +/- 0,01	%B.I. (meq/L)
1	309,1	26,04	293,85	99,00	658,495	137,255	0,1742	519,62	25,66	9,25
2	248,7	10,22	241,80	82,35	598,835	53,595	ND	385,57	23,19	9,74
3	1457,0	480,00	508,70	275,20	3125,810	714,990	2,5624	523,90	22,05	3,46
4	5207,5	228,90	545,20	1109,60	10769,200	1392,000	ND	685,81	42,05	-0,04
5	429,0	14,74	105,48	162,65	739,870	155,470	1,1700	645,48	20,19	2,96
6	1886,0	354,20	424,70	383,00	4104,130	615,270	ND	754,00	28,59	-0,10
7	434,8	28,97	288,05	210,85	964,820	247,675	ND	929,16	25,98	2,48
8	130,9	9,30	11,10	9,80	61,271	12,340	0,3800	248,60	18,98	8,65
9	1487,0	465,20	276,60	286,00	2820,930	648,850	0,5566	737,63	30,01	2,41
10	1573,0	412,00	223,00	185,30	2599,720	729,510	0,4816	811,09	24,18	-0,12
11	1066,6	150,50	201,80	161,30	2042,510	320,420	ND	628,72	23,18	-1,77
12	3050,0	463,20	1002,00	550,80	7238,840	1150,080	ND	572,81	39,25	-0,75
13	2057,0	264,30	408,80	225,10	3877,120	523,980	ND	381,09	28,32	2,24
14	193,1	10,07	103,70	22,27	205,780	49,877	0,4000	546,70	17,99	-1,28
15	1963,0	394,20	243,50	231,30	3374,060	841,300	0,4663	667,69	23,14	-0,52
16	1838,0	52,78	291,50	212,85	2519,150	342,530	0,7100	1074,11	21,35	7,47
17	1633,0	299,20	309,80	289,40	3281,720	568,580	0,1265	918,44	25,12	-1,85
18	332,0	11,64	158,90	68,68	617,255	128,090	1,3300	537,15	21,25	-2,16

ND= no detectado

## APENDICE C

### Calculo de la conductividad teórica y balance iónico

Calculo 1.- Balance iónico

$$\text{Balance iónico} = \frac{\sum[\text{cationes}] - \sum[\text{aniones}]}{\sum[\text{cationes}] + \sum[\text{aniones}]} \times 100$$

Calculo 2.- Conductividad teórica

*Conductividad ideal 25°C = Cond ideal aniónica + Cond ideal catiónica*

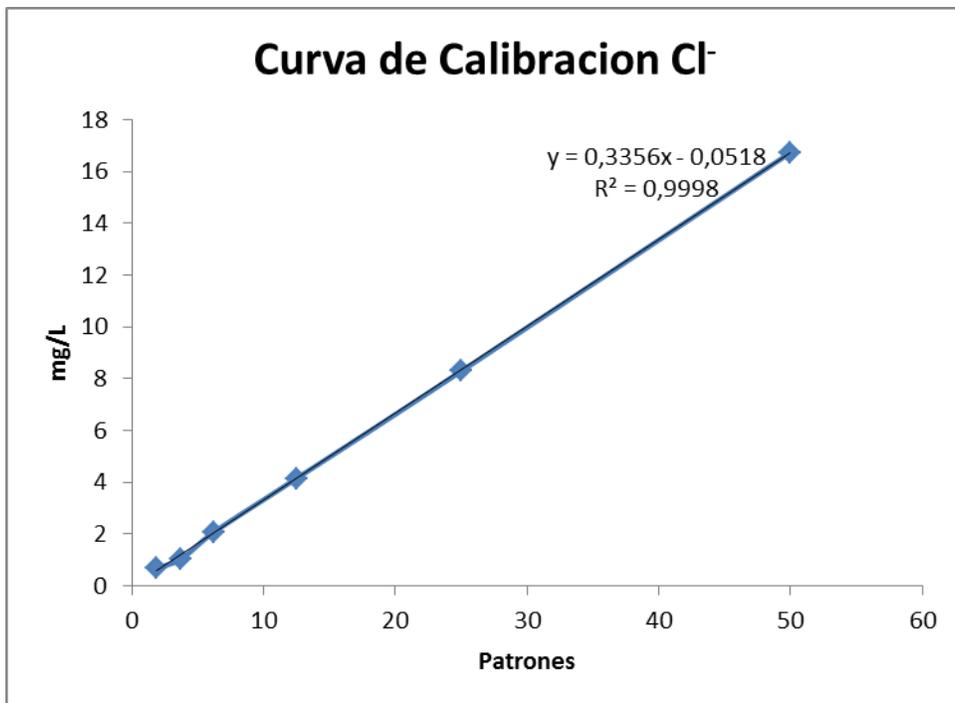
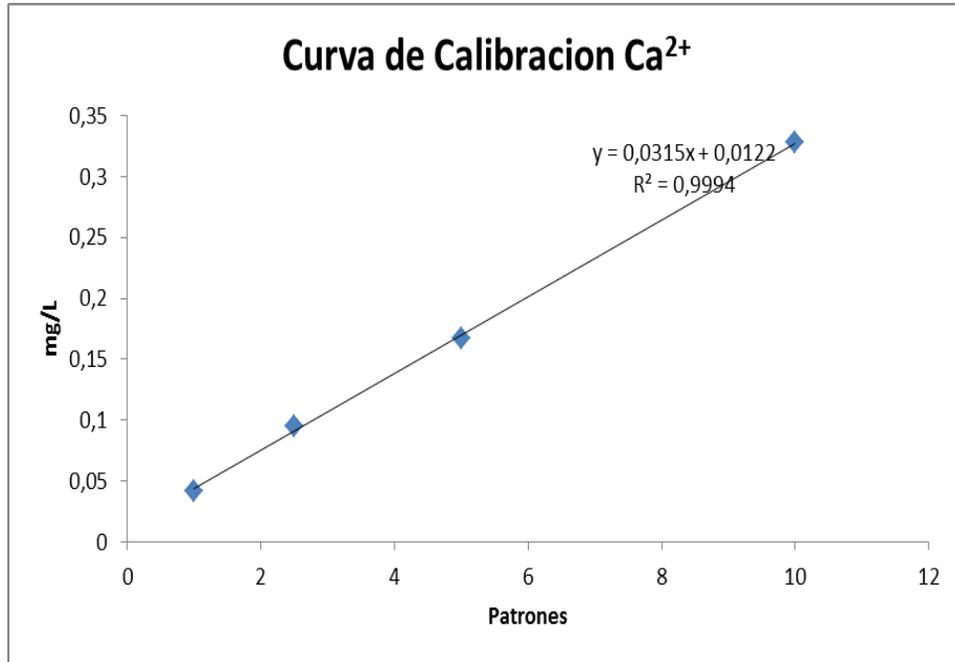
$$\text{Cond ideal catiónica} = \sum (\text{cationes} \times \mu\text{o}) + [((e^{-\text{pH}}) \times 100) \times 349,8]$$

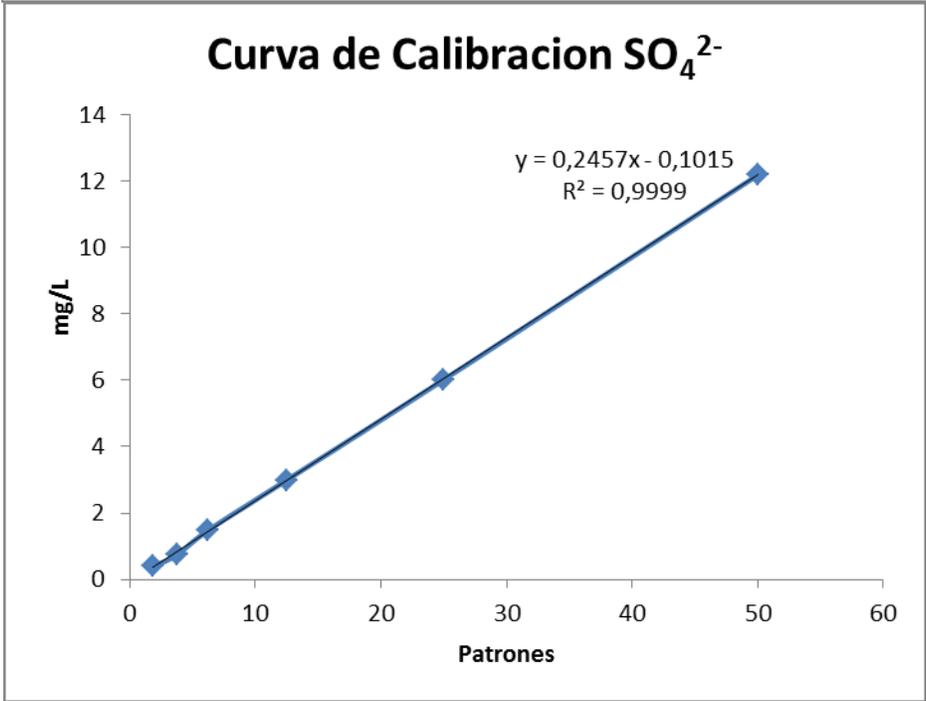
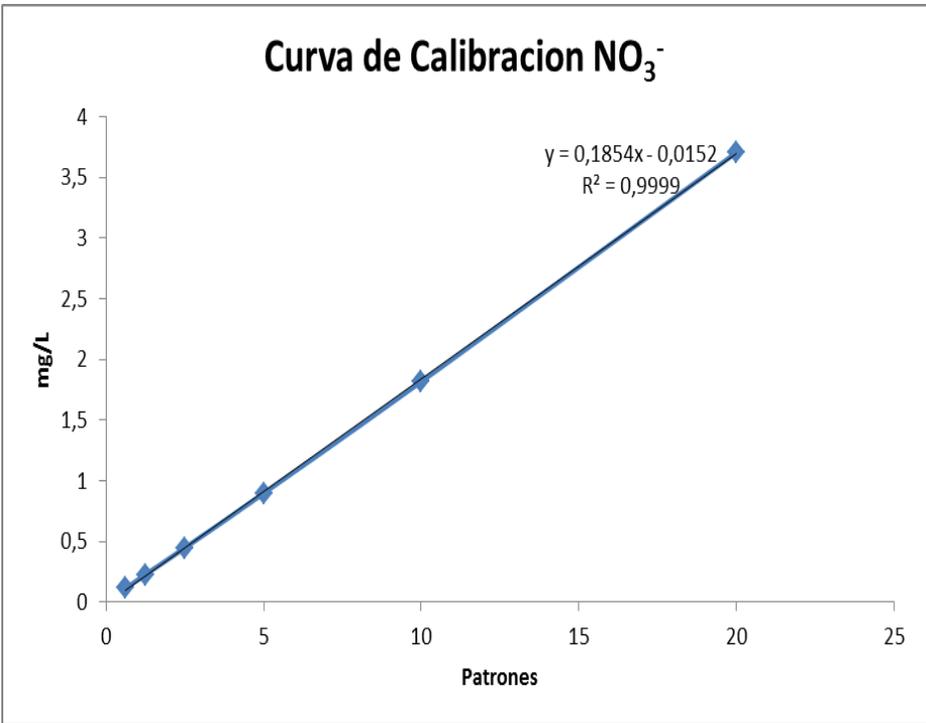
$$\text{Cond ideal aniónica} = \sum (\text{aniones} \times \mu\text{o})$$

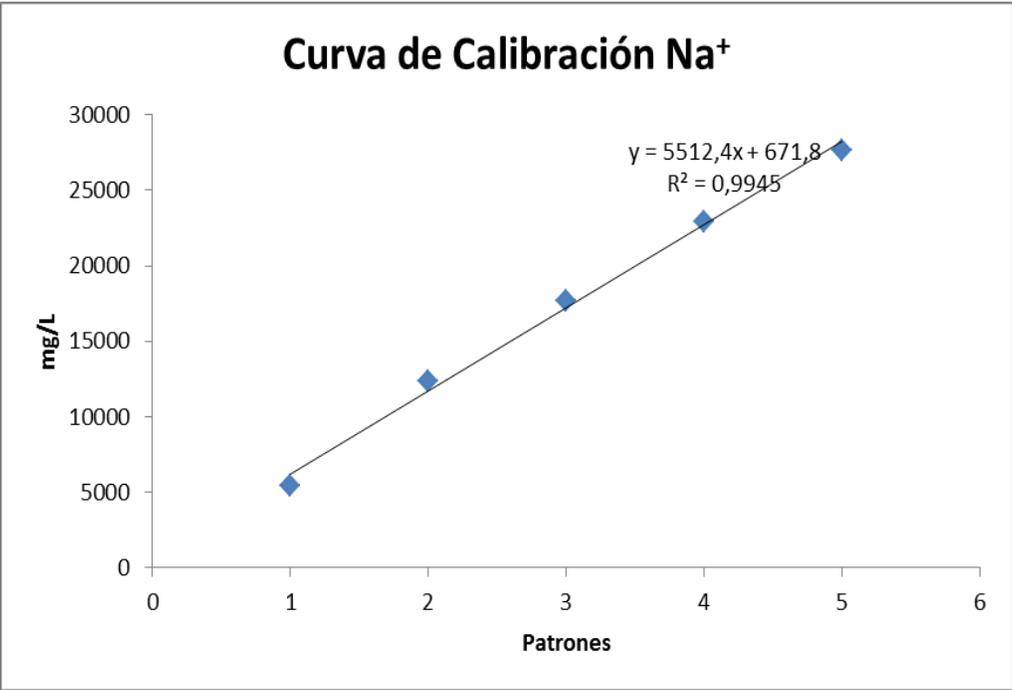
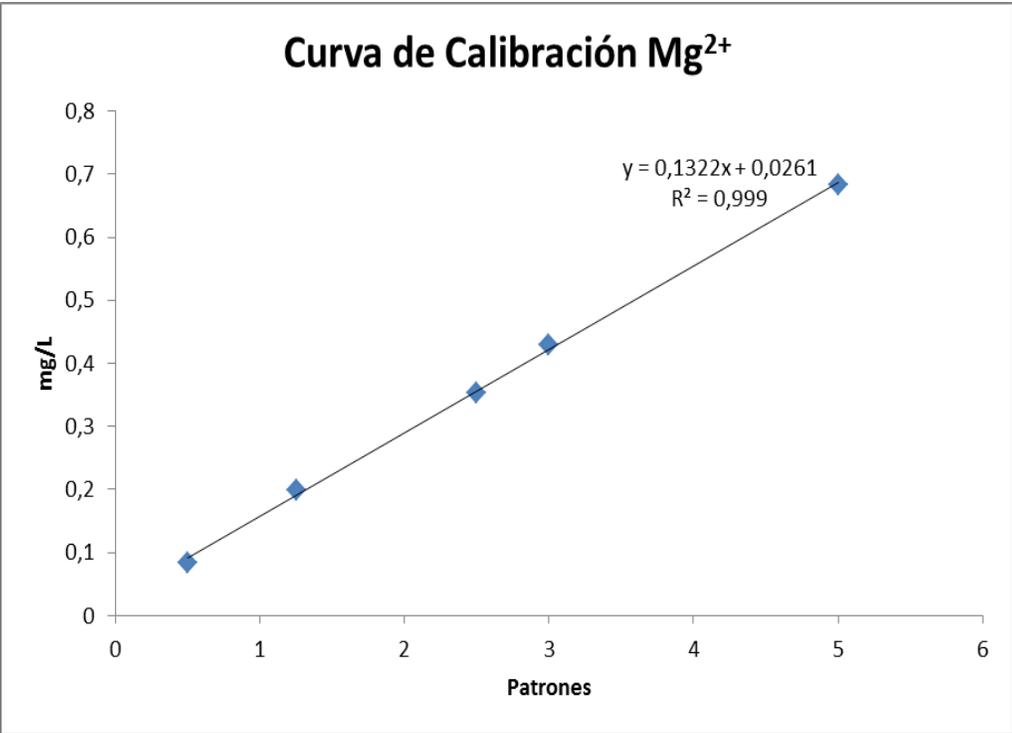
<b>Especie iónica</b>	<b>Conductividad a 25°C (μS.L/cm.mg)</b>
Ca <sup>2+</sup>	3,00
Mg <sup>2+</sup>	4,34
Na <sup>+</sup>	2,17
K <sup>+</sup>	1,89
Cl <sup>-</sup>	2,14
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,74
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,67
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,15

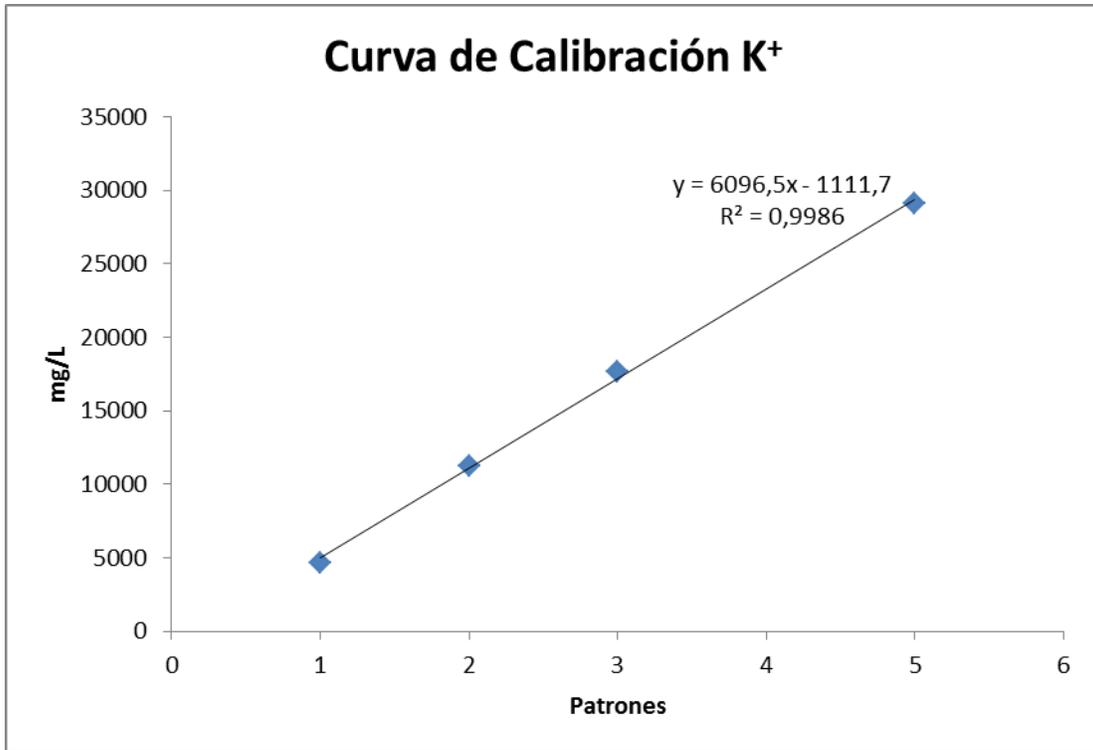
## APENDICE D

### Curvas de calibración









## APENDICE E

### Prospección geofísica

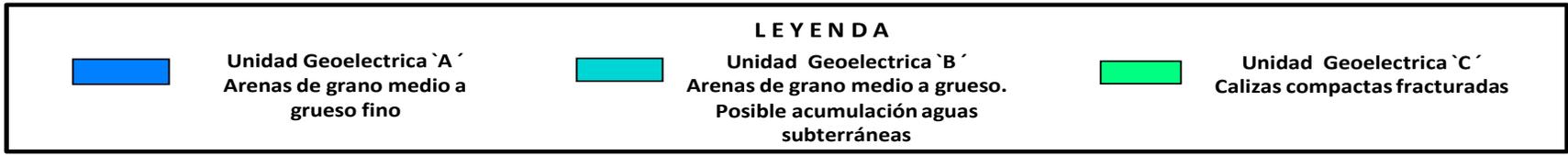
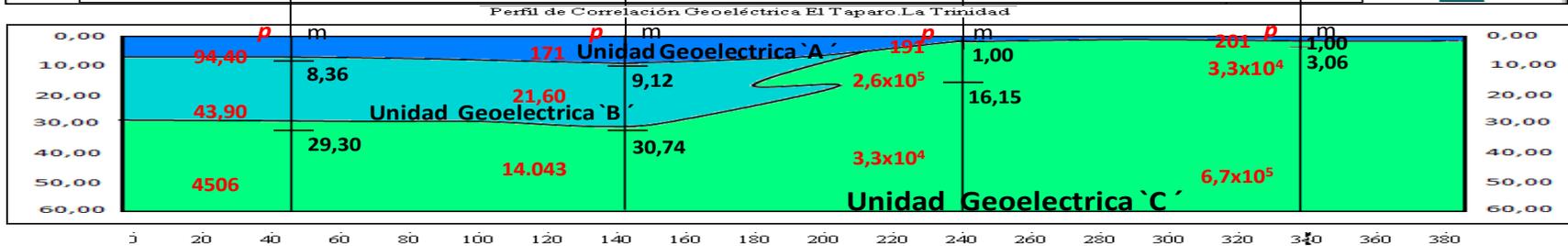
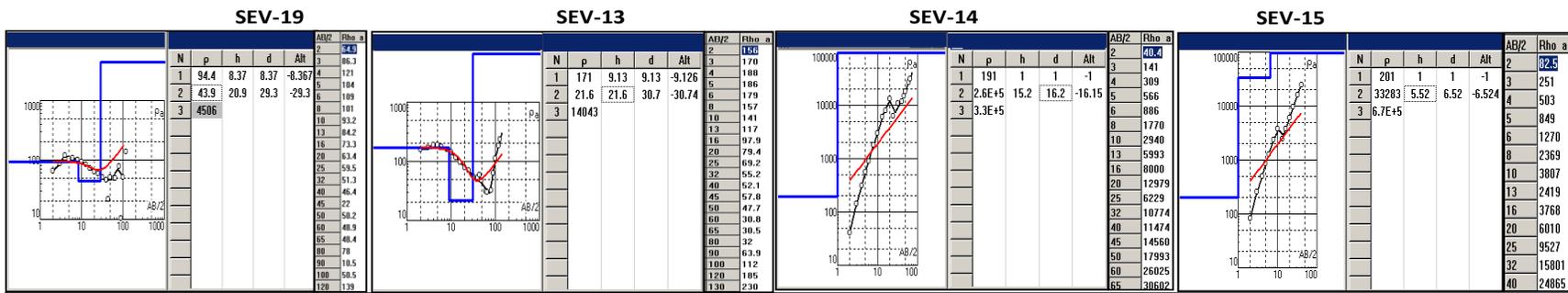
#### Criterios de Resistividades Establecidas en los Sedimentos en los Sectores La Trinidad y Táparo Sur. Municipio Los Taques Estado Falcón.

Ubicación	Unidad Litológica	Intervalo De Resistividad Ohmxm
La Trinidad	Arenas de grano fino	20,00 – 90,00
	Arenas de grano medio a grueso	90,00 – 500,00
	Calizas compactas fracturadas	2000 – $6,7 \times 10^5$
Táparo Sur	Arenas de grano fino	20,00 – 90,00
	Arenas de grano medio a grueso	90,00 – 500,00
	Arcillas limosas	0,00 – 10,00
	Arenas calcáreas compactas fracturadas	>2.000

#### Correlación SEVs. Unidades Geoeléctricas. Sector Taparo - La Trinidad.

Unidad Geoeléctrica	Resistividad (ohmxm)	Ubicación Prof. (m)	Espesor promed. (m)	Estimación Litológica y acuíferas
<b>A</b>	94,10 – 201	0,00 – 9,13	9,13	Arenas de grano medio a grueso, bajas posibilidades de acumulación aguas subterráneas
<b>B</b>	21,60 – 43,90	9,13 - 30,74	21,00	Arenas de grano fino con posibilidad de acumulación de aguas subterráneas.
<b>C</b>	4.506 – 670.000	>30,74	?	Calizas compactas fracturadas. Se desconoce su espesor. Por la presencia de rocas muy resistivas

**Curvas de Campo. Resistividad Aparente y Verdadera . Pseudo Sección de Resistividad.  
Correlación Geoeléctrica "A - A". SEV- 19, 13 , 14 y 15. Sector Táparo La Trinidad.  
Municipio Los Taques. Estado Falcón.**



**Sector El Táparo Sur. Municipio Los Taques.**

**Sondeo Eléctrico Vertical SEV - 18**

<b>Unidad Geoeléctrica</b>	<b>Resistividad (Ohmxm)</b>	<b>Esp. (m)</b>	<b>Prof. Inv. (m)</b>	<b>Unidad Litológica</b>	<b>Condiciones Acuíferas</b>
<b>A</b>	445	1,63	1,63	Arenas de grano medio a grueso	Bajas
<b>B</b>	36,90	8,33	9,96	Arena de grano fino	Probabilidad de acumulación aguas subterráneas
<b>C</b>	1,41	3,54	13,50	Arcillas limosas	Bajas posibilidades. Posible zona de interfase agua Dulce/Salada
<b>D</b>	38,20	>13,50	Indet.	Arena de grano fino	?

**Curvas de Campo. Resistividad Aparente y Verdadera . Pseudo Sección de Resistividad.  
Correlación Geoeléctrica `B - B´ SEV-16 , 17 y 18. Sector Táparo Sur. Municipio Los Taques.  
Estado Falcón.**

**Curvas de Campo y resistividad Aparente y Verdadera**

