

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUIMICA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOQUIMICA



“CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
PERTENECIENTES A LAS ZONAS GUACURIPÍA- EL PALMAR, ESTADO
BOLÍVAR”

Trabajo Especial de Grado presentado ante la
Ilustre Universidad Central de Venezuela,
por la Br. Gloria M. Escalona P., como
requisito para optar al título de Licenciada en
Química Opción Geoquímica.

Caracas, Febrero del 2012

Los abajo firmantes designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: "Caracterización geoquímica de las aguas subterráneas pertenecientes a las zonas Guacuripia-El Palmar, estado Bolívar". Presentado por la Br. Gloria M. Escalona P., certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el título de Licenciado en Química.

Prof. Santiago Marrero
(Tutor)

Prof. Ramón Montero
(Jurado)

Prof. José V. Gutiérrez
(Jurado)

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo el estudio hidrogeoquímico de 17 muestras de aguas subterráneas y 2 corrientes de aguas superficiales captadas en la región noreste del estado Bolívar, a fin de determinar la influencia que ejerce el cuerpo mármol-dolomítico presente en el área sobre las masas de agua, así como también los procesos responsables de la composición química de las mismas a fin de establecer si la calidad del agua es la adecuada para los fines a los que están siendo destinadas.

En busca de cumplir los objetivos, se realizó el muestreo de las aguas de la región, simultáneo a la determinación de los parámetros fisicoquímicos: conductividad, temperatura y pH. Para la determinación de las especies iónicas Na^+ y K^+ fue empleada la técnica analítica de Espectroscopia de Emisión Atómica con llama, el Mg^{+2} se determinó por Espectroscopía de Absorción Atómica con llama, mientras el resto de las especies catiónicas Fe^{+2} , Mn^{+2} , Ba^{+2} , Sr^{+2} , Ca^{+2} , Al^{+3} , SiO_2 , UO_2^{+2} , Zn^{+2} y Cu^{+2} se determinaron por espectroscopía de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado. Por su parte, los iones HCO_3^- y Cl^- fueron determinados por titulaciones potenciométrica y argentométrica, respectivamente, mientras que el SO_4^{-2} y NO_3^- fueron cuantificados por cromatografía iónica.

Los resultados obtenidos fueron validados por medio del cálculo de la conductividad teórica y del balance de masas, para el cual un total de 6 muestras presentaron un valor porcentual ubicado por encima de 10% (máximo permisible), sin embargo para las mismas la relación entre las conductividades (medida en campo y teórica) permite caracterizar a los datos con un amplio margen de confiabilidad.

El orden de variabilidad obtenido para los parámetros determinados resultó el siguiente: $\text{Na}^+ > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Cond.} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{+2} > \text{NO}_3^- > \text{SiO}_2 > \text{pH} > \text{Temp}$, atribuido al control que ejercen las solubilidades relativas de las especies minerales

junto a la influencia de factores antrópicos, meteorización geoquímica de zonas altamente mineralizadas y procesos de evaporación.

A fin de facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, fueron empleadas algunas herramientas entre las cuales destacan las relaciones interelementales, distribución espacial, diagrama de Piper, figuras de Stiff, así como un análisis estadístico no paramétrico mostrado a través de las cajas gráficas.

Por su parte, el diagrama de Piper permitió identificar (4) cuatro tipos principales de agua: cloruradas sódicas, cloruradas magnésicas y/o cálcicas, bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas magnésicas y/o cálcicas; mientras que las figuras de Stiff describe a las aguas según un origen fósil (principalmente asociadas a las aguas cloruradas sódicas) y meteórico.

En la misma línea de ideas, las relaciones interelementales permitieron establecer como procesos responsables de la composición química de las muestras de agua captadas en la zona de estudio, a los procesos de interacción agua-roca, evaporación y precipitación de sales. Adicionalmente, los valores anómalos presentados en la concentración de los elementos traza para la zona de estudio, permiten sugerir zonas altamente mineralizadas las cuales presentan una solubilidad relativa ante condiciones de meteorización.

En cuanto a la calidad del agua de la zona según la norma, un 47,4% de las muestras es considerada aguas **por debajo del límite aceptable**, un 42,1% de las aguas se considera **aceptable o clase 4** y sólo un 10,5% es considerada como **excelente o clase 1** resultando óptima para su consumo.

Agradecimientos

A Dios, por caminar conmigo este largo trecho. Por tomar mi mano cada momento en el que creí no encontrarlo, por permitirme amar, pensar y vivir cada segundo!

A mi queridísima Universidad Central de Venezuela, por haberme permitido llegar a formarme como persona y profesional, por permitirme ser parte de su historia y honrarme siendo parte de la mía.

Al MEJOR GRUPO DE GUÍAS del aula que pueda existir 2006-2007! A mi querido centro de estudiantes: Kizz, Javi, Alex, Vanessa, Yolita!. A mi querida familia de la voz! Rickyty, Marchisio (contigo en la distancia mi viejo querido!), Manuel, Mi loca Yol, Miriam, Francés, Al profesor Euro. A los prepa de instrumental MANUEL! Javivi, Jean!, Chuo, Luz, Albani, Rafafa, Mi Clau e Irelui, en especial a mi viejo Dario. A todos los profesores que me permitieron aprender enseñando. Mi querida Rosa, el profe Golding ☺, la profesora María, Henry y Luis Gómez.

A los profesores Grony, German y Lo Mónaco por enseñar con excelencia!. A los profesores William y Ramón por su calidez humana y admirable ejemplo. Al Profe Fernando! Por su disposición y guía durante el desenvolvimiento de este proyecto. A Luis! Por fabricar paciencia! Y explicarme con amor!!!!, gracias por tu disposición mi luis ☺ te adoro!.

A mis profesores de campo José Vicente y Manuel!!!! Por enseñarme a ver las cosas con otros ojos! Porque con cada charla, cada explicación! Discovery Channel no tenía nada que envidiarles!!!. Por enseñar con cariño lo que saben! y hacerme sentir orgullosa y enamorada de mi opción!!!!

A mi Ale limón! Porque por mas que las situaciones nos han dificultado estar juntos, EL PUENTE AUN NO SE HA CAIDO! ☺ GRACIAS por estar! ☺ OSO EXTRAVIADOSOOO! gracias por ser uno más en mi familia! ☺ LOVE YOU!!!! Valerion! Gracias por estar en los momentos más divertidos y más duros de la carrera!. MARI! gracias por tu confianza, cariño y lealtad!. ZAZA!!! Gracias por compartir conmigo tantas cosas bellas!!! Confianza y respeto es nuestra base!!!. INDI!!!! Amiga, hermana, compinche, cómplice!, confidente! Gracias por ser de todo un poco! Por saber escuchar y confiar!. Mi Cristo! Porque si estas conmigo! QUIEN CONTRA MI!!!!? TE AMO CON LA VIDA!!!

A mi Tutor querido y hermoso! Por una espectacular y sin duda alguna ORIGINAL salida de campo! ☺ por luchar junto a mi a favor de esta NUESTRA investigación! Por guiarme! Y establecer conmigo las mas cálidas charlas.☺ LO ADORO!!!. Mi Kame... gracias porque durante toda esta trayectoria, fuiste tu mi compañero de guerra!. A tu lado estudié, canté, reí, lloré, EXISTI!, me molesté... contigo fui! soy! Y estoy!. Gracias por tu confianza! por tu sencillez y tu voz!. Vales mucho para mi!... Siempre aposté y apostaré a ti! Te quiero con toda mi alma y mucho mas allá de ella!

Carlos... no me alcanzan palabras para agradecer tanto!!! Gracias! gracias de todo corazón por estar para mi, por permitirme caminar a tu lado, reír a tu lado, llorar a tu lado. Eres mi luz y mi paz! Mi apoyo, mi fuerza!. Gracias por compartir un poco de ti, tu carisma, tu fe, tus palabras y silencios. Te amo con la vida! y nuevamente GRACIAS!!!!.

Madre! eres todo en mi vida! Te amo!. Mis hermanos José, Vito y Luis... LOS AMO CON TODO MI SER!. A mi Tia Yadira! por toda la ayuda personal y académica que me ha dado, por su paciencia, comprensión y guía. Este logro también es suyo la amo!!!. A mi Tia Yessica!, mi Tia Nieves, A mi tío Licho, Mi tío Jose Raúl!, Mi Tia Elba!, Yuya! Nelly! Lily! GRACIAAAAAAAAAAAS!!!!!

A Todos Muchísimas gracias!!! No soy nada sin ustedes.

No te apresures, no te compares, no te impacientes
Descubre tus limitaciones y superalas por medio del análisis
crítico, la meditación y el reconocimiento de tales limitaciones
cuando no sea posible doblegarlas.
Apóyate en el estudio constante y profundo
de todo lo que te rodea,
Las ciencias, la humanística, la tecnología de actualidad.
Quiérete cada nuevo día más que el anterior
Se grande en todo sentido y sueña de manera razonable
Así llegarás a donde te propongas llegar...
Entonces proponte lo mejor y date con mucha furia!

Víctor Escalona

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.- Hidrósfera.....	4
2.1.1.- Distribución de las masas de agua.....	5
2.2.- Aguas Subterráneas.....	6
2.2.1.- Clasificación de las aguas subterráneas.....	9
2.2.1.1.- Sólidos disueltos totales (SDT).....	9
2.2.1.2.- Origen de las aguas subterráneas.....	10
2.2.1.3.- Composición química de las aguas subterráneas...	12
2.2.2.- Distribución y usos de las aguas subterráneas.....	13
2.3.- Comportamiento de los elementos de estudio bajo el ambiente exógeno.....	16
2.3.1.- Cloruro.....	16
2.3.2.- Sulfato.....	17
2.3.3.- Bicarbonato.....	17
2.3.4.- Nitrato.....	18
2.3.5.- Calcio.....	19
2.3.6.- Sodio y Potasio.....	22
2.3.7.- Estroncio.....	23
2.3.8.- Manganeso.....	25

2.3.9.- Hierro.....	26
2.3.10.- Magnesio.....	28
2.4.- Carbonatos.....	33
2.4.1.- Meteorización.....	36
2.4.2.- Factores que afectan al proceso de alteración de las rocas carbonáticas.....	41
2.5.- Metamorfismo.....	42
3.- OBJETIVOS.....	46
3.1.- Objetivo general.....	46
3.2.- Objetivos específicos.....	46
4.- ANTECEDENTES.....	47
4.1.- Internacionales.....	47
4.2.- Nacionales.....	53
4.3.- Locales.....	56
5.- GEOLOGÍA.....	59
5.1.- Geología regional.....	59
5.1.1.- Provincia de Imataca.....	61
5.1.2.- Provincia de Pastora.....	62
5.2.- Geología local.....	63
5.2.1.- Formación Guacuripia.....	63
6.- METODOLOGÍA.....	65
6.1.- Actividad pre-campo.....	65
6.2.- Actividad de campo.....	66
6.3.- Actividad de laboratorio.....	68
6.3.1.- Cationes mayoritarios, minoritarios y traza.....	69
6.3.2.- Bicarbonato.....	70
6.3.3.- Cloruro.....	70

6.3.4.- Sulfato y nitrato.....	70
7.- Presentación y discusión de los resultados.....	71
7.1.- Precisión, límite de detección y coeficiente de variación.....	71
7.2.- Validación de resultados.....	73
7.2.1.- Balance iónico.....	73
7.2.2.- Conductividad teórica.....	76
7.3.- Caracterización química.....	78
7.3.1.- Conductividad y pH.....	81
7.3.2.- Sólidos disueltos totales(SDT).....	84
7.3.3.- Sílice disuelta.....	87
7.3.4.- Sodio.....	89
7.3.5.- Magnesio.....	93
7.3.6.- Potasio.....	96
7.3.7.- Calcio.....	98
7.3.8.- Bicarbonato.....	103
7.3.9.- Cloruro.....	106
7.3.10.- Sulfato.....	110
7.3.11.- Nitrato.....	113
7.3.12.- Cobre, zinc y aluminio.....	115
7.3.13.- Hierro y manganeso.....	116
7.3.14.- Bario y estroncio.....	120
7.3.15.- Uranio.....	123
8.- PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO.....	125
9.- ÁREA DE INFLUENCIA DEL CUERPO MÁRMOL – DOLOMÍTICO...	127
10.- CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	131
10.1.- Diagrama de Piper.....	131
10.2.- Figuras de Stiff.....	133
11.- CALIDAD DEL AGUA PARA USO POTABLE.....	133

12.- USO DEL AGUA SEGÚN SU CALIDAD.....	136
13.- CONCLUSIONES.....	140
14.- RECOMENDACIONES.....	139
15.- BIBLIOGRAFÍA.....	140

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Contenido	Página
Gráfico 1: Distribución nacional del agua según su uso.....	13
Gráfico 2: Distribución mundial del agua según su uso.....	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1: Ciclo hidrológico.....	4
Figura 2: Esquema del diagrama de Piper.....	12
Figura 3: Distribución de la precipitación promedio anual en Venezuela.....	60
Figura 4: Ubicación geográfica de la zona de muestreo.....	65
Figura 5: Distribución de los puntos de muestreo en el área de estudio.....	67
Figura 6: Esquema de trabajo experimental a seguir para la determinación de cationes.....	68
Figura 7: Esquema de trabajo experimental a seguir para la determinación de aniones.....	68
Figura 8: Representación gráfica del error porcentual del balance iónico.....	73
Figura 9: Cromatograma obtenido para la muestra N° 9 (Santa Teresita Aljibe) en la determinación de los iones sulfato y nitrato.....	74
Figura 10: Relación dada entre la sumatoria de las especies catiónicas y aniónicas	76
Figura 11: Relación entre la conductividad teórica y la conductividad obtenida en campo.....	77
Figura 12: Caja gráfica de la conductividad medida en campo.....	81
Figura 13: Caja gráfica del pH.....	82
Figura 14: Distribución espacial de la conductividad medida en campo.....	83
Figura 15: Distribución espacial del pH.....	83
Figura 16: Caja gráfica de los sólidos disueltos totales (SDT).....	84
Figura 17: Distribución espacial de los sólidos disueltos totales (SDT).....	86
Figura 18: Relación entre la conductividad medida en campo y los sólidos disueltos totales (SDT).....	87
Figura 19: Caja gráfica de la sílice disuelta.....	88
Figura 20: Distribución espacial de la sílice disuelta.....	86
Figura 21: a) Relación entre la conductividad medida en campo y la cantidad de sílice disuelta. B) Relación lineal presentada por el grupo I.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 22: Caja gráfica del sodio.....	90
Figura 23: Distribución espacial del sodio.....	92
Figura 24: Relación de dependencia entre la conductividad medida en campo y la concentración de sodio.....	91
Figura 25: a) Relación entre la concentración de las especies bicarbonato y sodio. B) Relación lineal existente entre ambas especies, presentada para el 79% de las muestras.....	92
Figura 26: Caja gráfica del magnesio.....	94
Figura 27: Distribución espacial del magnesio.....	92
Figura 28: a) Relación de dependencia entre las especies sodio y magnesio. B) Relación de dependencia entre las especies sodio y magnesio para el 79% de las muestras.....	95
Figura 29: Relación de dependencia entre la concentración de magnesio y los valores de conductividad medida en campo.....	96
Figura 30: Caja gráfica del potasio.....	97
Figura 31: Distribución espacial del potasio.....	99
Figura 32: Caja gráfica del calcio.....	100
Figura 33: Difracción de rayos X obtenido para la muestra 2 captada en el pozo El Manguito, ubicado en el sector El Manganeso.....	101
Figura 34: Difracción de rayos X obtenido para la muestra 3 captada en el pozo El Manguito, ubicado en el sector El Manganeso.....	102
Figura 35: Distribución espacial del calcio.....	99
Figura 36: Caja gráfica del bicarbonato.....	103
Figura 37: Relación entre la conductividad medida en campo y la concentración de bicarbonato obtenida.....	104
Figura 38: Distribución espacial del bicarbonato	105
Figura 39: Relación entre el pH y la concentración de bicarbonato.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 40: Caja gráfica del cloruro.....	107
Figura 41: Distribución espacial del cloruro.....	105
Figura 42: Relación entre la concentración de cloruro y la conductividad medida en campo.....	108
Figura 43: Relación entre el ión cloruro y el ión bicarbonato.....	109
Figura 44: Caja gráfica del sulfato.....	110
Figura 45: Distribución espacial del sulfato.....	111
Figura 46: Relación entre las especies calcio y sulfato.....	112
Figura 47: Caja gráfica del nitrato.....	114
Figura 48: Distribución espacial del nitrato.....	111
Figura 49: Diagrama pH-Eh obtenido para el sistema acuoso ferroso-férrico en las aguas captadas en la zona de estudio.....	117
Figura 50: Distribución espacial del hierro y el manganeso.....	119
Figura 51: Caja gráfica del bario.....	120
Figura 52: Distribución espacial del bario.....	118
Figura 53: Relación entre las especies bario y potasio.....	121
Figura 54: Grupo I obtenido en la relación bario-potasio.....	121
Figura 55: Caja gráfica del estroncio.....	122
Figura 56: Distribución espacial del estroncio.....	124
Figura 57: Caja gráfica del uranio.....	123
Figura 58: Distribución espacial del uranio.....	124
Figura 59: Proceso de Intercambio Iónico.....	125
Figura 60: Relación entre el calcio y el estroncio.....	127
Figura 61: Relación entre el uranio y el magnesio.....	129
Figura 62: Diagrama de Piper.....	131

ÍNDICE DE IMÁGENES

Contenido	Página
Imagen 1: Esquisto micáceo.....	44
Imagen 2: Gneis cuarzo feldespático potásico biotítico presente en el Complejo Imataca.....	44
Imagen 3: Mármol.....	45
Imagen 4: Espectrofotómetro de absorción y emisión atómica con llama Perkin Elmer AAnalyst200.....	69
Imagen 5: a) Cuarcita b) cuarcita ferruginosa.....	93
Imagen 6: Aljibe El Edén.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Página
Tabla 1: Distribución de aguas en la tierra.....	5
Tabla 2: Elementos mayoritarios constituyentes de las aguas subterráneas.....	7
Tabla 3: Elementos minoritarios constituyentes de las aguas subterráneas.....	8
Tabla 4: Reservas principales de agua en el estado Bolívar.....	14
Tabla 5: Silicatos complejos de Calcio.....	19
Tabla 6: Minerales no silicatados más importantes del calcio.....	19
Tabla 7: Radios iónicos de los iones de interés a la presente investigación.....	23
Tabla 8: Óxidos e hidróxidos de manganeso más importantes, según el porcentaje de abundancia.....	25
Tabla 9: Minerales silicatados de Magnesio.....	29
Tabla 10: Minerales no silicatados más importantes de magnesio.....	30
Tabla 11: Principales causas de muerte en Venezuela para el año 2004.....	31
Tabla 12: Porcentajes de decesos según la causa, por estado, ordenado en forma ascendente, para Venezuela en el año 2004.....	32
Tabla 13: Minerales carbonáticos más importantes.....	34
Tabla 14: Parámetros estadísticos.....	72
Tabla 15: Escala arbitraria de comparación de variabilidades en las muestras, según el valor obtenido para el coeficiente de variación porcentual	79
Tabla 16: Datos estadísticos determinados para los parámetros químicos y fisicoquímicos de estudio.....	80
Tabla 17: Clasificación de las aguas superficiales y subterráneas pertenecientes a la zona de estudio, según la cantidad de sólidos disueltos totales.....	85
Tabla 18: Clasificación de las aguas del área de estudio según el diagrama de Piper.....	132
Tabla 19: Características del agua del área de estudio, para fines domésticos....	135
Tabla 20: Clasificación de las aguas captadas en la zona de estudio según su calidad.....	139

1.- INTRODUCCIÓN

Muchas razones permiten argumentar que el agua es una sustancia única y sin la cual la vida sobre el planeta tierra, tal como se conoce, no existiría.

El agua es una sustancia mineral líquida indispensable para el desenvolvimiento geológico y biológico del planeta. La misma representa en biología un agente único para la proliferación, alimentación y energía para la vida, capaz de asistir e iniciar muchos procesos enzimáticos y metabólicos que posibilitan la replicación de la molécula de ADN. ^{(1) (2)}

En ambientes geológicos, el agua representa el principal agente erosivo responsable de la morfología y relieve de la superficie, así como también colabora con el enriquecimiento mineralógico de los suelos debido al transporte de iones en solución así como de sedimentos suspendidos ⁽³⁾. De igual forma, constituye uno de los principales agentes involucrados en la formación de depósitos minerales.

El agua constituye 1/3 de la superficie terrestre y 2/3 de la hidrósfera ⁽⁴⁾, siendo expresado un 97% de su volumen como aguas oceánicas y sólo un 3% constituido en forma de reservas de agua dulce, distribuidas en glaciares, ríos y lagos (aguas superficiales) y aguas subterráneas ⁽⁵⁾, siendo estas últimas de mayor importancia para la presente investigación.

Las aguas subterráneas están constituidas principalmente por *aguas meteóricas*. Estas deben su origen a la infiltración o percolación del agua de lluvia, principalmente, en suelos e intersticios de estratos geológicos que poseen una porosidad y permeabilidad adecuada para permitir el movimiento y almacenaje del fluido a través de la roca. Representan 21% del total de aguas dulces o frescas no contenidas en los océanos ⁽⁵⁾.

La importancia de las aguas subterráneas, desde el punto de vista de su aprovechamiento para consumo y otros usos, reside en su abundancia, fácil explotación y alta pureza, aún en épocas de sequía o escaso régimen de precipitación, debido a la protección que le confiere la capa de suelo y roca donde se encuentra ⁽⁶⁾, además son estudiadas para caracterizar física y químicamente los acuíferos ⁽⁷⁾.

La composición química de las masas de agua va a depender de la interacción con la litología (determinada por el contacto agua-roca) ⁽⁸⁾ y otros factores como la topografía, relieve, régimen de precipitación, temperatura y procesos de meteorización ⁽⁹⁾. A su vez, la composición química determina el posible uso que puede dársele a este recurso.

La interacción agua-roca puede darse por medio de procesos complejos como hidrólisis, hidratación, oxido-reducción y disolución de las especies mineralógicas ⁽³⁾, incorporando así una serie de especies disueltas y suspendidas al agua ⁽¹⁰⁾ que según la tasa de contribución o aporte pueden llegar a contaminar las aguas ⁽¹¹⁾ haciéndolas no aptas para el consumo doméstico.

Sobre esta base, el objetivo principal de esta investigación es determinar, cualitativa y cuantitativamente, la abundancia y distribución geoquímica de elementos y especies químicas como sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), hierro (Fe^{+2}), manganeso (Mn^{+2}), estroncio (Sr^{+2}), nitrato (NO_3^-), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}) y bicarbonato (HCO_3^-) para llegar a establecer las características composicionales y los procesos que la controlan en las aguas subterráneas presentes en la región Guacuripia - El Palmar, estado Bolívar.

La importancia de este proyecto reside en que en esta región las aguas se hallan asociadas a un cuerpo mármol-dolomítico de espesor desconocido que podría estar modificando la composición química de las mismas, haciéndolas no consumibles, función principal de estos acuíferos.

Las aguas subterráneas de la zona en estudio podrían estar presentando concentraciones elevadas de elementos como calcio y magnesio debido a la meteorización del cuerpo carbonático ⁽¹²⁾. Dicha alteración, podría estar generando un aumento en la alcalinidad de las aguas, produciendo a su vez un cambio en el pH de las mismas ⁽¹³⁾, lo que se halla asociado, de forma aun no bien definida, a enfermedades cerebro y cardiovasculares ^{(14) (15) (16)}.

El estado Bolívar representa a nivel nacional un porcentaje bajo de decesos causados por enfermedades del corazón; sin embargo un 40% de la tasa de mortalidad dada en esta región por esta causa, está representada por personas con edades por debajo de los 65 años ⁽¹⁶⁾, haciendo de esto un tema importante para el desarrollo de esta investigación.

Los datos obtenidos permitirían establecer el área de influencia del cuerpo dolomítico emplazado en roca precámbrica, sobre las aguas, así como los posibles usos de las mismas.

2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1.- Hidrósfera

La Hidrósfera representa una de las (4) cuatro geósferas que conforman al planeta. Se expresa de forma discontinua ⁽¹⁷⁾ y dinámica ⁽³⁾, en estado líquido o sólido principalmente, como un manto que recubre la litósfera ⁽¹⁸⁾ y realiza un proceso cíclico de alto interés geoquímico (ver fig.1) ⁽¹⁸⁾ y biológico ⁽¹⁾, donde eventos de evaporación, condensación, precipitación, escorrentía y percolación ⁽³⁾ toman un papel protagónico en los procesos de meteorización, erosión y transporte de las rocas ⁽¹⁸⁾, así como también en los procesos biológicos que permiten la proliferación de la vida en el planeta ⁽¹⁾.

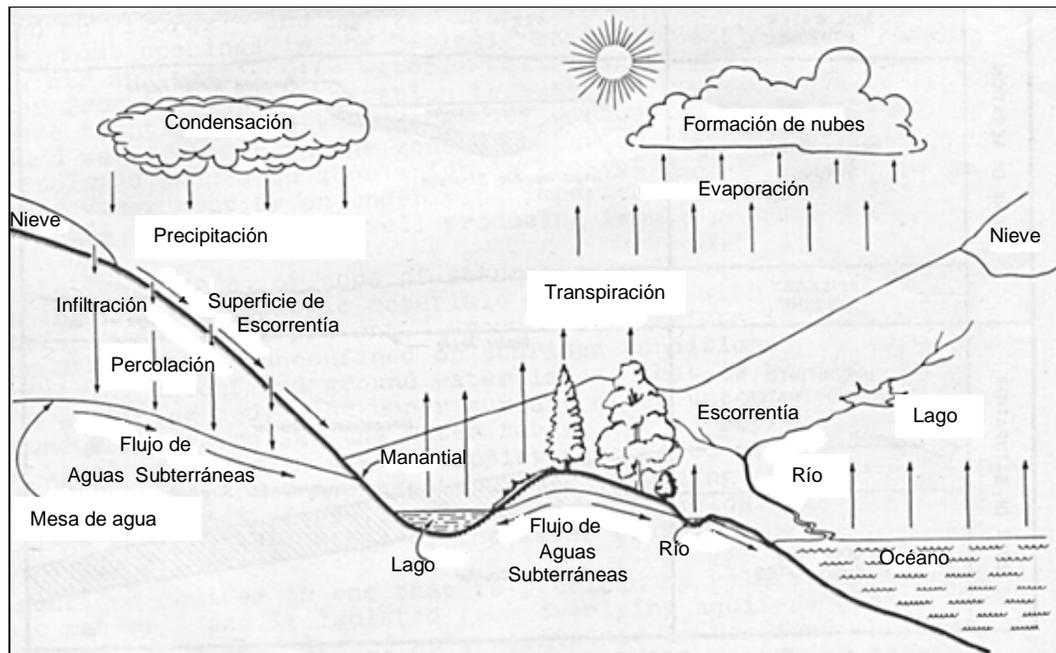


Figura 1: Ciclo hidrológico ⁽²¹⁾.

La circulación del agua en la hidrosfera permite impulsar los procesos geoquímicos necesarios para esculpir y crear muchos de los paisajes existentes en el ambiente exógeno ⁽¹⁹⁾, además de proporcionar el agua dulce que resulta tan vital para la vida en la tierra.

En el campo de la geología, el agua resulta ser el líquido de mayor importancia para iniciar las emanaciones volcánicas, así como para transportar y depositar especies iónicas que luego pasarán a formar menas metálicas ⁽¹⁸⁾.

2.1.1.- Distribución de las masas de agua

La masa de agua que conforma la hidrosfera se halla distribuida de (5) cinco formas principalmente: océanos, lagos, ríos y quebradas, aguas subterráneas y hielo expresado en forma de glaciares y nieve ⁽¹⁹⁾.

A continuación se muestra una clasificación de la hidrosfera según su abundancia:

Tabla 1: Distribución de aguas en la tierra ⁽¹⁹⁾.

	Volumen (Km ³)	Masa (g)	Porcentaje (%)
Agua de mar	1.37*10 ⁹	1.4*10 ²⁴	97.2
Hielo	2.9*10 ⁷	2.9*10 ²²	2.0
Agua subterránea	8.4*10 ²¹	8.4*10 ²¹	0.6
Lagos (A. dulce)	1.3*10 ⁵	1.3*10 ²⁰	0.009
Lagos (A. Salada)	1.0*10 ⁵	1.0*10 ²⁰	0.007
Vapor de agua	1.3*10 ⁴	1.3*10 ¹⁹	0.0009
Ríos	1.3*10 ³	1.3*10 ¹⁸	0.00009

Los océanos representan un 71% de la superficie del planeta ⁽³⁾ y, como puede observarse en la tabla 1, conforman el 97% del volumen total de la hidrósfera ⁽¹⁹⁾, dejando un 3% del volumen asignado a las aguas dulces, las cuales se subdividen en glaciares, superficiales (constituida por ríos, lagos, escorrentías, arroyos, entre otras fuentes) y subterráneas ⁽¹⁸⁾.

Las aguas dulces se hallan presentes en los suelos en forma de agua subterránea y en los poros de las rocas en forma de agua higroscópica ⁽¹⁸⁾. Esto se debe a la percolación del agua de origen atmosférico, conocida también como *agua meteórica* ⁽⁵⁾ a través de las masas de roca.

Del volumen total de agua que se infiltra, una fracción queda retenida en los suelos debido a interacciones moleculares, y parte regresa a la atmósfera por evaporación. Parte del agua retenida es aprovechada por los organismos vivos, en especial las plantas. Otra porción de agua meteórica se infiltrará hasta entrar en contacto con una roca sello, llamada así por su carácter impermeable debido a que posee todos los poros e intersticios completamente ocupados por agua. Esto último permitirá el almacenamiento de esta porción en forma de *aguas subterráneas*. ⁽³⁾

2.2.- Aguas Subterráneas

Las *aguas subterráneas* son referidas a las masas de agua que ocupan todos los intersticios vacíos presentes en los estratos o capas geológicas ⁽²⁰⁾. Constituyen un 14% del volumen total de aguas dulces y representan el mayor depósito de estas, asequible al ser humano ⁽³⁾.

Las especies disueltas en las aguas subterráneas están representadas principalmente por iones bicarbonato, sulfatos y cloruros de metales alcalinos y alcalinotérreos ⁽¹⁸⁾. Sin embargo, debido a la interacción agua-roca ⁽⁸⁾ y la penetración del agua a través de los suelos, la composición química de las mismas varía.

Adicionalmente, es posible la incorporación de otros iones o sustancias que se presentan en concentraciones mucho más bajas (por debajo del 1% del contenido iónico total). Estas especies reciben el nombre de *iones menores o minoritarios*. Entre los elementos minoritarios destacan los nitratos, carbonatos, nitritos, fluoruros, amonio, potasio y estroncio, y suelen encontrarse en concentraciones que van desde los 0.01ppm a 10 ppm. ⁽²¹⁾

Por su parte, los *elementos traza* son especies que presentan concentraciones menores al 0,1% del contenido iónico total ⁽²²⁾. Entre los compuestos mas importantes se tienen los iones bromuro, ioduro, sulfuro, nitrito, borato e iones hidroxilo, pertenecientes al grupo de aniones. Por su parte el grupo catiónico está conformado por manganeso, amonio, hidronio, aluminio y cobre, zinc, arsénico, antimonio, cromo, plomo, bario, vanadio, mercurio y uranio, entre otros. ⁽²¹⁾

A continuación se presenta una propuesta de la composición química general de las aguas subterráneas según los cationes y aniones mayoritarios y minoritarios presentes en las mismas:

Tabla 2: Elementos mayoritarios constituyentes de las aguas subterráneas ⁽²³⁾.

Constituyentes Mayoritarios		
Constituyente o parámetro	Agua superficial (ppm)	Aguas subterráneas (ppm)
HCO ₃ ⁻	58	200
Ca ⁺²	15	50
Cl ⁻	7,8	20
K ⁺	2,3	3
Mg ⁺²	4,1	7
Na ⁺	6,3	30
SO ₄ ⁻²	3,7	30
SiO ₂ (ac)	14	16

Tabla 3: Elementos minoritarios constituyentes de las aguas subterráneas ⁽²³⁾.

Constituyente Minoritario o traza	
Constituyente o parámetro	Aguas superficiales y subterráneas (ppb)
Fe ⁺²	100
Mn ⁺²	15
Sr ⁺²	400

Si el agua meteórica se halla cargada de dióxido de carbono (CO₂), ésta adquiere un pH ligeramente ácido y en consecuencia, un alto poder como agente meteorizante, siendo capaz de disgregar, reaccionar y disolver muchos de los minerales constituyentes de la masa de roca e incorporarlos a la composición química de las aguas ⁽³⁾.

El grado de percolación o infiltración del agua a través de los suelos o roca, se halla altamente relacionado con el relieve ⁽¹⁹⁾. En superficies inclinadas, normalmente las aguas se presentan en forma de escorrentías y no está favorecida la posible infiltración y almacenaje, mientras que en superficies estables de menor inclinación, para las mismas condiciones de porosidad y permeabilidad, la infiltración del agua será mucho más favorecida ⁽³⁾.

2.2.1.- Clasificación de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas se clasifican según su composición química, origen y la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT).⁽²¹⁾

2.2.1.1.- Sólidos disueltos totales (SDT)

Una propuesta de la clasificación de las aguas subterráneas según la cantidad de sólidos disueltos totales es planteada por Hem (1970)⁽⁸⁾, quien agrupa a las mismas en (3) tres grandes grupos, los cuales serán descritos a continuación.

a) Aguas dulces

Corresponden a aquellos cuerpos de agua que contienen un máximo de 1000 ppm de sustancias y sales disueltas.

b) Aguas Salobres

Corresponden a aquellos cuerpos de agua que contienen entre 1000 ppm y 10000 ppm de sales disueltas.

c) Aguas salinas o saladas:

Comprenden a aquellos cuerpos de agua que presentan concentraciones entre 10000 y 35000 ppm de sales disueltas.

d) Salmueras naturales

Están conformadas por cuerpos de agua que presentan concentraciones superiores a los 35000 ppm de sales disueltas⁽⁸⁾. Por otra parte, Custodio y Llamas (1976)⁽²¹⁾ describen este grupo como aquellas masas de agua que presentan concentraciones superiores a los 40000 ppm de dichas sales, pudiendo llegar hasta 300000 ppm en algunos casos particulares. Adicionalmente, ambos sugieren que en estos casos la composición química viene determinada principalmente por los iones cloruro y sodio, donde el calcio en algunos casos, pasa a jugar un papel importante de la misma.

2.2.1.2.- Origen de las aguas subterráneas

Custodio y Llamas (1976) ⁽²¹⁾ clasifican las aguas subterráneas, según su origen, en (9) nueve grupos, presentados a continuación:

- a) Aguas Vadosas, Meteóricas o Recientes: son las masas de agua pertenecientes al ciclo hidrológico (hidrosfera, atmósfera, litósfera) y se caracterizan por poseer una composición bastante similar al agua de lluvia, debido a que la composición se halla influenciada principalmente por la infiltración de la misma.
- b) Aguas Juveniles: son aquellas masas de agua que proceden del interior de la tierra sin haber sido expuestas antes a la superficie.
- c) Aguas Fósiles o Connatas: Son masas de agua atrapadas en los intersticios de rocas sedimentarias en el momento de la depositación, caracterizadas por ser altamente salinas. Todd, D. (1959) ⁽²⁰⁾ añade a esto que las mismas pueden ser derivadas de fuentes de agua de mar o dulces que luego resultan mineralizadas.
- d) Aguas Congénitas: son masas de agua atrapadas en cuerpos de roca durante el proceso de formación de las mismas. No necesariamente se hallan asociadas a aguas fósiles, ya que pueden derivarse de sedimentos formados recientemente. Adicionalmente, suelen presentar proporciones elevadas de los iones cloruro, yoduro, sílice, boratos, nitratos y calcio, mientras presenta un empobrecimiento en las especies magnesio y sulfato.
- e) Aguas Metamórficas: son cuerpos de agua que han estado en contacto con la roca durante su metamorfismo y se caracterizan por poseer concentraciones de cloruros menores a las presentadas en el agua de mar, así como altas concentraciones de iones bicarbonato, boratos e yoduro.

- f) Aguas magmáticas y volcánicas: son cuerpos de agua que tienen su origen en la liberación de vapor de agua, junto con otros líquidos volátiles, durante explosiones y movimiento de masas magmáticas. Suelen poseer elevadas concentraciones de iones cloruro, fluoruros, sulfuros, boratos, litio, sodio, sílice y dióxido de carbono, con bajo contenido de ioduros, bromuros, nitratos y compuestos cálcicos.
- g) Aguas marinas: son cuerpos de agua de mar que invaden sedimentos costeros, en muchos casos mezclándose con aguas de origen continental, atribuyéndole un aumento a la dureza cálcica de la misma.
- h) Aguas minerales: son masas de agua caracterizadas por presentar elevadas cantidades de elementos disueltos y composiciones químicas variadas. Adicionalmente se relacionan con procesos orogénicos y/o volcánicos.
- i) Aguas saladas y salmueras: son cuerpos de agua que poseen su origen debido a la mezcla de aguas marinas con aguas de origen continental.

Una de las herramientas más utilizadas para esta clasificación es el *diagrama de Stiff*, en el cual se representa la composición del agua según los iones mayoritarios presentes. Simultáneamente, los diagramas permiten visualizar el grado de mineralización de las masas de agua ⁽⁶⁾.

La grafica resultante se halla compuesta de (3) tres ejes horizontales, donde cada uno une un catión y un anión, dispuestos de la siguiente forma: cationes ubicados al lado izquierdo del costado y aniones ubicados al lado derecho, donde el ión sodio confronta al cloruro, el calcio al bicarbonato y el magnesio al sulfato. ⁽²¹⁾

De esto resulta una figura cuya forma indica las proporciones relativas (en meq/L) de los diferentes iones, mientras el tamaño indica la concentración total en la que se encuentran presente los mismos. ⁽²¹⁾

2.2.1.3.- Composición química de las aguas subterráneas

La composición química del agua se halla determinada principalmente por el tipo y cantidad de especies disueltas, proceso que se ve influenciado por diversos factores entre los cuales destacan: litología, clima, relieve, vegetación y tiempo de residencia o contacto con la roca o sustrato. ⁽⁶⁾⁽²⁰⁾

Una de las herramientas más utilizadas para la representación del carácter químico de un cuerpo determinado de agua es el *diagrama de Piper* (1944), el cual consiste en dos campos triangulares donde se representan los valores de concentración de especies catiónicas (inferior izquierdo) y aniónicas (inferior derecho). Adicionalmente, en la parte central se halla un campo romboidal principal donde un punto simple representa la proyección de los puntos representados en los dos campos triangulares antes mencionados. Este diagrama tiene como objetivo mostrar la evolución hidrogeoquímica y los posibles procesos de mezcla entre cuerpos de agua ⁽²¹⁾.

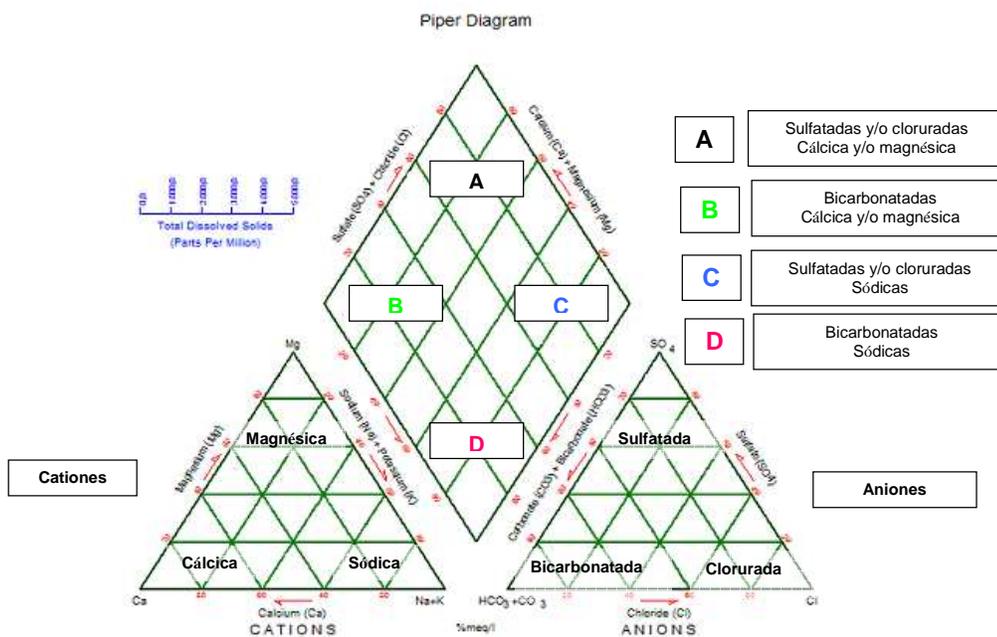


Figura 2: Diagrama de Piper.

2.2.2- Distribución y usos de las aguas subterráneas

El agua subterránea almacenada en los acuíferos del planeta representa una de las principales fuentes de agua dulce destinadas a cubrir necesidades domésticas, ganaderas, industriales y agrícolas ⁽³⁾, ya que se caracteriza por presentar una elevada pureza y ser de fácil explotación ⁽⁶⁾. En muchas oportunidades las mismas son explotadas sin prudencia o reglamento alguno, lo que produce un agotamiento y contaminación del recurso en cuestión ⁽¹¹⁾.

A continuación, los gráficos 1 y 2 presentan la distribución del agua a nivel nacional y mundial, según el uso para la cual es destinada la misma.



Gráfico 1: Distribución Nacional del agua según el uso ⁽²⁴⁾.



Gráfico 2: Distribución Mundial del agua según el uso ⁽²⁴⁾.

El área de estudio no presenta aguas superficiales permanentes, lo que le asigna una mayor importancia a las aguas subterráneas almacenadas en las formaciones de la región. Estas, representan un recurso estratégico importante que a menudo reemplaza el abastecimiento de agua a partir de ríos, lagos u otras escorrentías superficiales ⁽²⁵⁾.

A continuación, en la tabla 4 se presentan diversas reservas de agua ubicadas en el área de estudio, las cuales se encontraban en operación para el año 2005.

Tabla 4: Reservas principales de agua en el estado Bolívar ⁽²⁴⁾

Estado	Reserva o Embalse	Organismo Administrador	Uso
	Caruachi	CVG	Hidroelectricidad
	Copapuycito	CVG	Consumo Humano
	El Palmar	CVG	Consumo Humano
Bolívar	Guri	CVG	Hidroelectricidad
	Macagua I	CVG	Hidroelectricidad
	Macagua II	CVG	Hidroelectricidad
	Puente Blanco	CVG	Consumo Humano
	San Pedro	CVG	Consumo Humano

Las probabilidades de contaminación del recurso en cuestión, así como la iniciación y propagación de enfermedades epidemiológicas debido a la ingesta del mismo, serán disminuidas ⁽²⁶⁾, ya que en principio estas aguas se consideran libre de agentes patógenos ⁽²⁷⁾.

En la agricultura, el agua representa un ente que incluye humedad a los diversos tipos de suelo ⁽²⁰⁾, lo que abre paso al transporte de nutrientes, gases disueltos y complejos vitamínicos a través de la raíz de las mismas ⁽²⁸⁾.

El tratamiento químico de los suelos con fertilizantes, insecticidas y plaguicidas (entre otros), así como el uso de vacunas y hormonas para acelerar y mejorar el crecimiento de las crías del ganado, se traduce en la contaminación de aguas consumibles por materia altamente nitrogenada debido al aporte de desechos y percolación de muchos de los residuos a través de suelos. Esta alteración se halla directamente relacionada a enfermedades no transmisibles entre las cuales se destaca el cáncer de estomago y/o esófago, así como también la metahemoglobinemia, enfermedad originada por exceso de nitratos ⁽¹⁴⁾. Es de gran importancia mencionar que en el área de estudio se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas, especialmente esta ultima, de manera intensiva en las regiones de Guacuripia y El Palmar.

En adición a esto, existe una relación no muy bien definida entre la dureza del agua y el desarrollo de enfermedades cerebro y cardiovasculares ⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁵⁾. Sin embargo, estudios recientes han presentado resultados concluyentes sobre la relación directa entre la deficiencia de magnesio y el riesgo de infartos al miocardio. ⁽²⁹⁾

2.3.- Comportamiento de los elementos de estudio bajo el ambiente exógeno.

2.3.1.- Cloruros

Los cloruros son compuestos que llevan un átomo de cloro en el menor estado de oxidación (Cl^{-1})⁽³⁰⁾, representados por sales de alta solubilidad, derivadas del ácido clorhídrico (HCl). Dichas sales suelen ser sustancias incoloras cristalinas con elevados puntos de fusión, no son fácilmente susceptibles a procesos de oxidoreducción, sin embargo en presencia de oxidantes fuertes, como por ejemplo permanganatos, bismutatos, peróxidos, entre otros, suele oxidarse a cloro elemental.⁽²¹⁾

Comúnmente, el cloruro suele hallarse asociado al sodio, especialmente en aguas salinas o salmueras naturales, donde las concentraciones pueden llegar a estar en el orden de 220000 ppm, mientras que en aguas de carácter dulce el intervalo de concentraciones va de 10-250 ppm, no siendo extraño hallar concentraciones que alcancen los miles de ppm.⁽²¹⁾

Entre los indicadores o trazadores químicos solubles, el más utilizado es el cloruro. A pesar de presentar un comportamiento casi ideal para ello, solo resulta útil si el agua natural contiene concentraciones bajas (50-100 ppm) y siempre que se pueda garantizar que el mismo, no procede del terreno o de fugas de acuíferos con aguas salinas antiguas.⁽²¹⁾

Suele derivarse del proceso de lavado de terrenos de origen marino o mezcla de las mismas con aguas continentales, aguas de lluvia acumuladas en el terreno y localmente debido a la disolución de rocas evaporíticas. Raramente procede de gases exteriorizados en emanaciones volcánicas y debido a que es un elemento escaso en la corteza terrestre depende muy poco del ataque directo a cuerpos de roca.

2.3.2.- Sulfatos

Los sulfatos son compuestos salinos, derivados del ácido sulfúrico, que presentan moderadas y en casos, muy altas solubilidades. Se hallan conformados por un átomo central de azufre enlazado de forma covalente a (4) cuatro átomos de oxígeno, formando la especie iónica SO_4^{-2} .⁽³⁰⁾

En las aguas dulces, puede presentar concentraciones entre 2 y 250 ppm, pudiendo llegar hasta valores de 5000 ppm en aguas de carácter salino. En salmueras naturales se halla asociado a los elementos sodio y magnesio principalmente y puede presentar concentraciones hasta 200000 ppm.⁽²¹⁾

En terrenos en condiciones de aridez puede ser fácilmente precipitado, mientras que en medios con abundante materia orgánica, puede ser reducido por actividad bacteriana a sulfuro y en algunos casos hasta azufre.⁽²¹⁾

2.3.3.- Bicarbonato

Los bicarbonatos son sales derivadas del ácido carbónico (H_2CO_3), caracterizadas por poseer de bajas a altas solubilidades. Se hallan en equilibrio con los carbonatos, agua y dióxido de carbono (CO_2), lo que comunica la alcalinidad al agua. No son fácilmente oxidables ni reducibles en aguas naturales y proceden inicialmente de la disolución del CO_2 contenido en la atmósfera o el suelo en el agua, así como por disolución de calizas y dolomías.^{(18) (21)}

En aguas dulces el bicarbonato presenta concentraciones que van de 50 a 350 ppm, pudiendo presentar concentraciones hasta de 800 ppm, mientras que el agua de mar contiene alrededor de 100 ppm⁽²¹⁾. Por otra parte, las aguas bicarbonatadas sódicas suelen no ser indicadas para riego, debido a la fijación del sodio en el terreno y la creación de un medio alcalino, y suelen atribuir un carácter corrosivo a las masas de agua.

2.3.4.- Nitratos

Los nitratos son sales derivadas del ácido nítrico (HNO_3) que se hallan caracterizadas por presentar altas y muy altas solubilidades. Se representa por el anión NO_3^- , conformado por una geometría triangular, donde un átomo de nitrógeno, con estado de oxidación +5 se halla centrado y enlazado de forma covalente a (3) tres átomos de oxígeno ⁽³⁰⁾.

En ambientes reductores o con abundante materia orgánica, los nitratos pueden llegar a ser reducidos a NO_2^- , NH_4^+ e incluso a N_2 , y suele ser aportado por procesos naturales de nitrificación (legumbres), descomposición de materia orgánica, localmente durante emanaciones volcánicas, contaminación industrial, agrícola o ganadera. ⁽¹⁸⁾

Los nitratos suelen presentarse en concentraciones comprendidas entre 0,1-10 ppm, sin embargo en aguas contaminadas pueden llegar hasta 200 ppm y en algunos casos extremos hasta 1000 ppm. Esta contaminación puede comunicar corrosividad al agua, además de repercutir directamente sobre la salud, produciendo enfermedades como la cianosis. ⁽²¹⁾

2.3.5.- Calcio

El calcio es uno de los (8) ocho elementos principales presentes en la litósfera superior ⁽¹⁸⁾ y se halla formando algunos compuestos silicatados bastante complejos en las rocas ígneas, principalmente. Entre ellos se encuentran los mostrados a continuación:

Tabla 5: Silicatos complejos de calcio ⁽¹⁸⁾

Minerales silicatados	Fórmula
Wollastonita	CaSiO_3
Monticellita	$\text{CaMg}(\text{SiO}_4)$
Glaucoicroita	$\text{CaMn}(\text{SiO}_4)$
Andradita	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$
Uvarovita	$\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$
Anortita	$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$

Entre los compuestos minerales no silicatados más importantes, se destacan los señalados a continuación.

Tabla 6: Minerales no silicatados de calcio mas importantes ⁽¹⁸⁾

Minerales no silicatados	Fórmula
Calcita, Aragonito	CaCO_3
Dolomitas	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Yeso	$\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anhidrita	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$
Fluorita	CaF_2
Sheelita	$\text{Ca}(\text{WO}_4)$

Durante la meteorización química, los minerales que contienen calcio se descomponen, liberando al metal en solución ⁽¹⁰⁾, principalmente en forma de bicarbonato $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, pasando previamente por un proceso de retención en forma de carbonato o sulfato. Es importante resaltar que el calcio no es capaz de formar óxidos en condiciones de pH menores a 11, por lo cual no es un producto o residuo que se halle fácilmente en la naturaleza ⁽¹⁸⁾.

El calcio es el principal constituyente en aguas dulces superficiales y subterráneas, Debido a la alteración de calizas y yacimientos de sales cálcicas ⁽¹⁸⁾. La interacción agua- roca impulsa y favorece la disolución y desintegración de estas rocas, permitiendo la incorporación de especies solubles a estas aguas ⁽¹⁰⁾.

Puede llegar a presentar concentraciones entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar hasta valores de 600 ppm en aguas selenitosas (altas concentraciones de sulfato), y en fuentes de agua marina contiene alrededor de 400 ppm. Adicionalmente, en salmueras naturales puede presentar valores de hasta 50000 ppm como CaCl_2 . ⁽²¹⁾

La velocidad de alteración de la roca se ve afectada por factores como el tiempo de exposición al agente meteorizante (agua), la tasa de precipitación – evaporación, clima, humedad y vegetación, principalmente. Éstos aceleran los procesos de desgaste físico y químico de la roca, lo que se traduce en una posible saturación de las aguas y contaminación de las mismas ⁽¹¹⁾.

Las aguas que presentan un contenido alto de elementos bivalentes como calcio, magnesio, hierro, estroncio, entre otros, son conocidas como *aguas duras* ⁽³⁰⁾. Estas suelen no ser aptas para consumo doméstico e industrial, debido a que suelen producir mineralizaciones dentro de las tuberías o demás conductos.

A continuación se presenta una propuesta de la reacción de equilibrio que establece el calcio en las aguas duras, para favorecer el proceso de mineralización.



Por otra parte, el calcio resulta un elemento indispensable para coagular la sangre y mantener el ritmo cardiaco, así como también forma parte activa en el origen, desarrollo y mantenimiento de los huesos. Una deficiencia se traduciría en el adelgazamiento de la contextura ósea y fácil fracturamiento de la misma ⁽³⁰⁾.

Una forma de establecer la calidad de las aguas viene dada por la determinación de la dureza de la misma, la cual se halla definida como la capacidad que poseen los cationes bivalentes, principalmente calcio y magnesio, para desplazar a los iones sodio y potasio en los jabones, formando precipitado ⁽²²⁾.

Esta es una reacción de valoración, la cual se basa en el establecimiento de un intercambio iónico, donde iones de carga menor como sodio y potasio, son desplazadas al agua, mientras que calcio, magnesio y hierro son atraídos por aniones como grupos acetato ⁽³⁰⁾, presentes en el agente acomplejante hexadentado conocido como EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) ⁽²²⁾.

El ablandamiento del agua consiste en desincorporar del sistema acuoso un porcentaje de estos cationes con el fin de evitar las mineralizaciones antes nombradas ⁽³⁰⁾.

El agua ablandada poseerá ahora una alta concentración de iones sodio y potasio, los cuales no formaran precipitados debido a la alta solubilidad de sus sales. Sin embargo, ambos cationes tienen un daño directo en la salud, principalmente en personas con alta presión sanguínea ⁽³⁰⁾. Este proceso de ablandamiento se utiliza con el fin de hacer aptas las aguas para un consumo humano.

2.3.6.- Sodio y Potasio

El sodio y el potasio se encuentran en la naturaleza formando sales de alta a muy alta solubilidad ⁽²¹⁾ únicamente como cationes monovalentes, por lo que tienden a ocupar mucho espacio en las estructuras mineralógicas. Se hallan concentradas principalmente en las rocas ígneas bajo la forma de piroxenos, anfíboles, feldespatos, feldespatoideos y micas, los cuales representan los minerales más sensibles a la disolución por meteorización. Ambos cationes se presentan en forma de residuos sólo en regiones áridas, dejándolos disponibles en los demás ambientes siempre en solución ⁽¹⁸⁾.

En el agua dulce el sodio se halla presente en concentraciones que están entre 1 y 150 ppm, no siendo extraño hallar concentraciones de hasta miles de ppm. En las aguas de mar, el sodio presenta concentraciones que se hallan alrededor de los 10.000 ppm, mientras que en las salmueras se pueden encontrar concentraciones del elemento en cuestión de hasta 100.000 ppm. El potasio, por su parte, presenta un intervalo de concentraciones que van de 0.1 a 10 ppm en las aguas dulces, mientras que en las aguas de mar y salmueras presenta concentraciones de 400 y 100000ppm, respectivamente. En aguas con elevadas concentraciones de sodio, pueden esperarse asociados elevados valores de fluoruros. ⁽²¹⁾

El sodio disminuye su abundancia en los sedimentos hidrolizados que se forman debido a la descomposición química, ya que es extraído de las rocas durante el proceso de meteorización. El potasio, por su parte, pasa a formar parte de la disolución, para ser luego asimilado y concentrado en las arcillas. ⁽¹⁸⁾

La diferencia de comportamiento entre ambos cationes es atribuida a la velocidad de meteorización del feldespato potásico y el plagioclásico, traducándose en una acumulación de potasio durante la descomposición de la plagioclasa. Además, la actividad biológica fomenta la desincorporación de potasio del sistema de suelos, para favorecer la formación de compuestos orgánicos relativamente insolubles ⁽¹⁸⁾.

Para el ser vivo, el potasio es el elemento que regula los líquidos o fluidos en el organismo, ayuda a establecer un equilibrio ácido-base e interviene en la producción de proteínas y macronutrientes indispensables para el funcionamiento corporal. Su función principal en las plantas es mantener la presión osmótica y el tamaño de las células, lo que se correlaciona directamente con el proceso de fotosíntesis y producción de energía ⁽³¹⁾.

Para el ser humano, ambos cationes colaboran con la regularización de todas las funciones celulares, actividades cardiovasculares, musculares y aquellas relacionadas con el sistema nervioso y la iniciación de los procesos enzimáticos ⁽³²⁾.

2.3.7- Estroncio

La capacidad que poseen diferentes elementos para ocupar una misma posición en una red cristalina se conoce como *diadoquia* ⁽¹⁸⁾. Para lograr una sustitución sin comprometer la estabilidad de la estructura cristalina, los radios iónicos deben ser similares y no necesariamente deben poseer la misma carga o valencia. A continuación se presenta una tabla donde se muestran los radios iónicos de los elementos de interés en esta investigación. ⁽¹⁸⁾

Tabla 7: Radios iónicos de los elementos de interés en la presente investigación

Ión	Radio iónico
Mg ⁺²	0,78
Mn ⁺²	0,80
Fe ⁺²	0,83
Na ⁺	0,97
Ca ⁺²	1,08
Sr ⁺²	1,21
Pb ⁺²	1,32
K ⁺	1,46

Para sustituir a un elemento en la red cristalina se deben cumplir ciertas condiciones, conocidas como las **reglas de Goldschmidt** entre las cuales se encuentran.⁽¹⁹⁾

- a) Un ión se halla en capacidad de reemplazar a otro de igual carga y radio iónico similar, si sus radios no difieren en más de un 15% en tamaño.
- b) Para elementos de radios iónicos similares, cuya carga difiera en más de una unidad, se permite la sustitución siempre y cuando ocurra una segunda sustitución, de forma tal que se garantice la neutralidad eléctrica.
- c) Cuando (2) dos iones pueden ocupar una posición particular en una red cristalina, el ión con la mayor densidad de carga (potencial iónico) forma el enlace mas fuerte y favorece su posición en la red.
- d) La sustitución puede ser limitada, aun cumpliéndose el criterio de carga/radio, cuando los iones tienen mucha diferencia en su electronegatividad.

El estroncio es un elemento capaz de presentar *diadoquia* con las especies químicas K^+ y Ca^{+2} , principalmente. Acompaña al calcio constantemente en los minerales y rocas, de origen ígneo y sedimentario, así como también pasa a sustituir al potasio en muchos minerales, principalmente de origen ígneo, debido a la similitud de los radios iónicos, mostrados anteriormente⁽¹⁷⁾.

El aragonito ($CaCO_3$) y la anhidrita ($CaSO_4$) son los vehículos principales del estroncio entre los minerales que se forman durante el ciclo exógeno, sin embargo el estroncio, de forma general, se ve asociado a ambientes donde predominan las calizas, dolomías, rocas yesíferas y yacimientos salinos. El intercambio iónico en estas especies mineralógicas favorece la formación de la estroncianita ($SrCO_3$) y celestina ($SrSO_4$), las cuales poseen un origen hidrotermal y se encuentran ubicados mayoritariamente en cavidades y grietas o filones de rocas sedimentarias⁽¹⁸⁾.

Las acumulaciones secundarias de estroncio en las rocas sedimentarias derivan también del incorporado en el aragonito. Debido a que el aragonito es menos estable que la calcita, se convierte en ésta, o bien se disuelve, produciendo una separación del estroncio favoreciendo su precipitación en fósiles, en forma de sulfato ⁽¹⁸⁾.

Durante la meteorización el estroncio se disuelve en forma de bicarbonatos, cloruros y sulfatos, presentando sus mayores concentraciones en el agua de los océanos. Adicionalmente, es de resaltar que el estroncio no llega a formar minerales nuevos durante el metamorfismo ⁽¹⁸⁾.

2.3.8.- Manganeso

En geoquímica, el manganeso es un elemento metálico con alto carácter litofílico, que se encuentra concentrado en superficie formando óxidos. Normalmente se halla asociado a rocas metamórficas y sedimentarias debido a que durante la formación de las rocas ígneas, en el paso de cristalización el manganeso no posee aun concentraciones tan significativas como para formar minerales independientes ⁽¹⁸⁾.

A continuación se presenta una tabla donde se distinguen los principales óxidos e hidróxidos formados por el manganeso ⁽¹⁸⁾:

Tabla 8: Óxidos e hidróxidos de manganeso más importantes, según el porcentaje de abundancia.

Minerales	Formula	%Mn
Manganosita	MnO	-----
Pirolusita	MnO ₂	60-63
Manganomelana	MnO ₂	58
Pirocroita	Mn(OH) ₂	-----
Manganita	MnO(OH)	69

La forma de presentación del manganeso en las rocas ígneas depende de su capacidad para sustituir a otros cationes en forma *diadócica*. En este tipo de rocas se favorece la especie Mn^{+2} , ión que presenta propiedades químicas muy similares al Fe^{+2} , con cierto impedimento estérico en la sustitución e incorporación a redes cristalinas conformadas principalmente por Zn^{+2} , Ca^{+2} y Mg^{+2} , debido a la diferencia de radios iónicos. Debido a esta similitud con el Fe^{+2} , las mayores concentraciones de manganeso se observan en las rocas ultrabásicas entre las cuales se hallan las dunitas y hornblenditas ⁽¹⁸⁾.

El carbonato de manganeso mas importante es la rodocrosita ($MnCO_3$) que contiene aproximadamente un 61,7% de Mn, así como el sulfuro de manganeso (MnS) que contiene un 63,2% de Mn. Ambas especies mineralógicas se encuentran asociadas a filones hidrotermales debido a la percolación de fluidos químicamente activos a través de fracturas presentes en el cuerpo rocoso ⁽¹⁸⁾.

Durante la meteorización, el manganeso se disuelve principalmente en forma de bicarbonato $Mn(HCO_3)_2$, en aguas que contienen dióxido de carbono y sulfatos, reacción que se ve más favorecida que la del hierro. Debido a que el contenido de manganeso en las rocas ígneas es mayor que el contenido de hierro, éste (Mn) suele ser más común en las soluciones de meteorización ⁽¹⁸⁾.

Adicionalmente, el manganeso toma un papel fundamental en el desarrollo de la vida en el planeta. Interviene en la reducción de nitratos en plantas superiores y algas verdes, así como también desempeña una función de activador enzimático, el cual interviene en el desarrollo de los huesos, crecimiento y reproducción en animales marinos y terrestres ⁽²⁸⁾.

2.3.9.- Hierro

Desde el punto de vista geoquímico el hierro (Fe) representa uno de los elementos más importante. Posee un alto carácter litofílico y biófilo, y se halla principalmente formando óxidos ⁽¹⁸⁾.

El hierro nativo es un componente raro en las rocas ígneas, encontrándose en rocas basálticas en forma de hierro metálico o en aleaciones con níquel. Se halla existente de (2) dos formas principales: ferrosa (Fe^{+2}) y férrica (Fe^{+3}). La especie ferrosa es favorecida en la primera etapa de cristalización magmática y se caracteriza por presentar una fácil solubilidad en agua rica en dióxido de carbono (CO_2), en ausencia de oxígeno, formando bicarbonato ferroso $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$. En condiciones de alta evaporación, se pierde dióxido de carbono lo que induce a la precipitación de la siderita (FeCO_3) debido al aumento del pH en el medio. Esto permite deducir que el hierro (Fe^{+2}) es el elemento más importante en las segregaciones magmáticas. ⁽¹⁸⁾

En las primeras rocas silicatadas que se forman, como las *dunitas*, el contenido de hierro es pequeño, predominando la presencia del magnesio sobre el. El contenido de hierro máximo se halla al terminar el estado principal de cristalización, representado en este caso por la hornblenda. Al avanzar la cristalización, el contenido de hierro disminuye ⁽¹⁸⁾.

Debido a la diferencia existente en los tamaños iónicos de ambas especies del hierro, se presentan diferentes comportamientos al momento de sustituir de forma *diadócica* a un elemento en una red mineralógica. El Fe^{+2} sustituye al Mg^{+2} , mientras el Fe^{+3} tiende a sustituir al Al^{+3} . La diadoquia entre el hierro (Fe^{+2}) y el magnesio (Mg^{+2}) en una estructura mineral es completa y continua, mientras que la diadoquia (Fe^{+3}) con el aluminio (Al^{+3}) es menos extensa ⁽¹⁸⁾, es por esto que el hierro tiende a hallarse presente en dolomitas (sustituyendo al magnesio) y calizas (sustituyendo al calcio) ⁽¹⁷⁾. Por su parte, en las rocas ígneas, el hierro pasa a formar compuestos oscuros, entre los cuales se encuentran los piroxenos, anfíboles y micas ferromagnesianas ⁽¹⁸⁾.

Adicionalmente, se encuentran también sulfuros y óxidos presentes como minerales accesorios en las rocas ígneas, entre los cuales destacan la magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), ilmenita (FeTiO_3), pirrotina (FeS) y pirita (FeS_2), así como la siderita (FeCO_3), asociada a filones hidrotermales ⁽¹⁹⁾.

El paso más importante en el ciclo del hierro es el proceso de oxidación, el cual origina la precipitación del mismo, facilitando la formación de yacimientos. Por su parte, procesos como disolución, precipitación y oxido-reducción le brindan a elementos como el hierro, la oportunidad de migrar de capas o redes mineralógicas para luego formar nuevos arreglos cristalinos ⁽¹⁸⁾.

Entre los factores que controlan la migración del hierro se hallan los siguientes ⁽¹⁸⁾

- a) La presencia o ausencia de oxígeno
- b) La presencia o ausencia de dióxido de carbono (CO₂).
- c) pH

Su importancia biológica reside en el papel catalítico que desempeña en el ciclo del carbono, así como en el transporte del oxígeno desde el medio a los compuestos oxidables de los tejidos durante el proceso de respiración. En las plantas es el elemento responsable del crecimiento y desarrollo de las mismas, debido a su participación en la formación de la clorofila, mientras que en los tejidos animales forma pigmentos constituyentes de la sangre, responsables de procesos tan vitales como el de la respiración ⁽¹⁸⁾. En el ser humano, el hierro se halla asociado a la hemoglobina, proteína encargada de transportar el oxígeno a través del conducto sanguíneo ⁽³⁰⁾.

2.2.10.- Magnesio

El magnesio es el más escaso de los (8) ocho elementos mayoritarios que conforman la litósfera superior. Posee un carácter fuerte como litófilo, y se halla en forma casi cuantitativa en la capa silicatada del planeta. Por otra parte, se encuentra en capacidad de formar compuestos inorgánicos estables de alta a moderada solubilidad, simples y complejos, en condiciones de superficie ⁽¹⁸⁾.

Las concentraciones de magnesio en las aguas dulces van desde 1 a 100 ppm, en el agua de mar presenta concentraciones alrededor de 1200 ppm, pudiendo llegar a presentar concentraciones hasta miles de ppm en el caso de las salinas y algunas salmueras naturales. ⁽²¹⁾

Entre los minerales silicatados más importantes se hallan los presentados a continuación.

Tabla 9: Minerales silicatados de magnesio ⁽¹⁹⁾.

Minerales silicatados	Fórmula
Forsterita	Mg_2SiO_4
Piropo	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$
Diópsido	$CaMgSi_2O_6$
Pigeonita	$(Mg, Fe^{2+}, Ca)(Mg, Fe^{2+})Si_2O_6$
Augita	$Ca(Mg, Fe, Al)Si_2O_6$
Hornblenda	$(Mg, Fe, Al)_5(Al, Si)_8O_{22}(OH)_2$
Talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
Flogopita	$KMg_3Si_3AlO_{10}(F, OH)_2$
Biotita	$K(Mg, Fe^{2+})(Al, Fe^{3+})Si_3O_{10}(OH, F)_2$

El magnesio, al igual que el hierro, se encuentra formando minerales oscuros, los cuales se separan al principio de la cristalización magmática debido a que el número de coordinación no permite la separación del magnesio en forma de minerales pertenecientes al grupo de los tectosilicatos (grupo que forma principalmente los minerales claros) ⁽¹⁸⁾.

A continuación se presenta la tabla 10, donde se nombran los minerales no silicatados más importantes de magnesio.

Tabla 10: Minerales no silicatados de magnesio más importantes ⁽¹⁸⁾.

Minerales no silicatados	Fórmula
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Magnesita	MgCO_3
Espinelita	MgAl_2O_4
Geikielita	MgTiO_3
Periclasa	MgO
Brucita	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
Sellaita	MgF_2

Las rocas ígneas, básicas y ultrabásicas representan un medio característico para la existencia del magnesio en la litósfera, concentrando sus mayores proporciones en silicatos resultantes de los primeros estados de cristalización magmática. Esto lo hace, junto con el hierro ferroso, el catión más importante que se incorpora en los minerales félicos durante el estado principal de cristalización ⁽¹⁸⁾.

Debido a la similitud de los tamaños iónicos, el magnesio está presente en las rocas ígneas por su diadoquia con el hierro (Fe^{+2}), la cual se caracteriza por ser completa y continua en la mayoría de los grupos de gran importancia petrográfica ⁽¹⁸⁾.

El magnesio se libera durante los procesos de meteorización en forma de cloruro (MgCl_2) y sulfato (MgSO_4), presentando sus mayores concentraciones en aguas de río y de mar, debido a la alta solubilidad que muchas de sus sales presentan ⁽¹⁸⁾. Por otra parte, la precipitación de los óxidos e hidróxidos de magnesio se favorece en condiciones de $\text{pH} = 10$, posibilitando la formación de la brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ⁽¹⁸⁾.

El magnesio también presenta diadoquia con el calcio debido a la similitud en carga y tamaño, dando origen a la formación de especies cristalinas como la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y magnesita (MgCO_3), las cuales poseen gran importancia petrográfica ⁽¹⁹⁾.

La importancia del magnesio en ámbitos de biósfera radica en que éste representa un componente esencial con funciones catalíticas para llevar a cabo procesos vitales como fotosíntesis (plantas), procesos enzimáticos y de crecimiento (animales), así como también el desarrollo de esqueletos, masa muscular y tejido nervioso ⁽¹⁸⁾.

Junto con el calcio, el magnesio es el elemento que determina la *dureza cálcica* del agua y le atribuye a la misma un sabor amargo cuando presenta concentraciones por encima de 100 ppm ⁽²¹⁾. La dureza cálcica se halla relacionada de forma aun no bien definida a enfermedades cerebro y cardiovasculares, enfermedades que en Venezuela representan, junto al cáncer, las principales causas de muerte relacionadas a aquellas de origen no transmisible ⁽¹⁵⁾.

A continuación se presenta una tabla estadística resumida del anuario del Ministerio de Salud del año 2005, donde se representan las principales causas de muerte en el país para el año 2004. ⁽¹⁵⁾

Tabla 11: Principales causas de muerte en Venezuela para el año 2004 ⁽¹⁵⁾.

Causa	% decesos	Posición
Enfermedades no-transmisibles		
Corazón	21,94	1
Cáncer	15,82	2
Cerebro-Vasculares	7,49	3
Accidentes	7,15	4
Homicidios	6,27	5
Diabetes	6,44	6
Enfermedades transmisibles		
Influenza-Neumonía	2,61	9
Hígado	2,00	10
Infeciosas intestinales	1,69	12
VIH	1,26	15
Por protozoarios	0,69	18
Tuberculosis	0,67	19
Septicemia	0,59	20

El estado Bolívar representa, a nivel nacional, un 17% de decesos debido a enfermedades del corazón, siendo éste el porcentaje mas bajo en el país. Adicionalmente, representa un 7% aproximado de decesos debido a accidentes cerebrovasculares y un 14% de decesos debido al cáncer, ubicándose por debajo del promedio nacional ⁽¹⁵⁾.

A pesar de esto, el resumen del anuario del ministerio de la salud elaborado para el año 2005 demuestra que aproximadamente un 40% de esta tasa de mortalidad dada en la región de estudio, esta representada por personas con edades por debajo de los 65 años ⁽¹⁵⁾, situación alarmante que confiere a esta investigación mayor importancia. A continuación se presentan los datos obtenidos del resumen del anuario del Ministerio de la Salud para el año 2005.

Tabla 12: Porcentaje de decesos según la causa, por estado, ordenado en forma ascendente, para Venezuela en el año 2004 ⁽¹⁵⁾.

Estado	Corazón	Estado	Cáncer	Estado	Diabetes	Estado	ACV
Bolívar	17,13	Portuguesa	11,65	Guárico	3,80	Zulia	5,77
Nva. Esparta	18,14	Cojedes	11,75	Cojedes	3,81	Vargas	6,00
Monagas	18,57	Apure	12,04	Apure	3,99	Cojedes	6,40
Dtto. Capital	19,06	Monagas	12,55	Vargas	4,43	Monagas	6,40
Apure	19,49	Barinas	12,94	Sucre	4,77	Barinas	6,43
Lara	19,66	Sucre	13,08	Miranda	4,89	Bolívar	6,49
Mérida	19,84	Trujillo	13,21	Portuguesa	5,03	Portuguesa	6,49
Anzoátegui	20,03	Táchira	14,03	Barinas	5,40	Dtto. Capital	6,61
Carabobo	20,30	Bolívar	14,06	Dtto Capital	5,48	Yaracuy	6,87
Sucre	20,41	Vargas	14,64	Monagas	5,61	Miranda	7,00
Aragua	20,57	Carabobo	14,75	Aragua	6,01	Trujillo	7,07
Yaracuy	20,99	Anzoátegui	14,95	Anzoátegui	6,22	Carabobo	7,14
Miranda	20,99	Guárico	15,04	Bolívar	6,26	Mérida	7,20
Portuguesa	21,44	Yaracuy	15,45	<u>Nacional</u>	6,44	Guárico	7,23
Barinas	21,86	Lara	15,58	Yaracuy	6,52	Táchira	7,30
Cojedes	21,88	Dtto Capital	15,67	Falcón	6,79	<u>Nacional</u>	7,49
<u>Nacional</u>	21,94	Zulia	15,74	Carabobo	6,83	Lara	7,58
Falcón	23,03	Mérida	15,76	Mérida	6,87	Apure	8,05
Zulia	23,10	<u>Nacional</u>	15,82	Lara	6,87	Aragua	8,23
Vargas	23,39	Aragua	16,31	Nva. Esparta	6,95	Anzoátegui	8,25
Táchira	23,53	Nva. Esparta	16,45	Táchira	7,11	Falcón	8,73
Guárico	23,74	Miranda	16,99	Zulia	7,49	Nva. Esparta	9,18
Trujillo	25,07	Falcón	17,15	Trujillo	8,46	Sucre	11,60

2.4.- Carbonatos

Los carbonatos son compuestos químicos que se hallan formados por una fase triangular donde un átomo de carbono (C) se sitúa en el centro de tres átomos de oxígeno (O) para formar el grupo divalente CO_3^{-2} . Este anión divalente tiende a establecer enlaces iónicos con ciertos cationes metálicos para formar moléculas que luego pasarán a ser parte de las redes cristalinas de los minerales. ⁽³⁰⁾

El grupo carbonato de los minerales posee (2) dos posibles orígenes: orgánico e inorgánico ⁽³⁾. El origen orgánico se debe a la capacidad que poseen algunos organismos vivos para tomar carbonato en solución y precipitarlo durante la formación de esqueletos y conchas que luego, al morir, pasan a ser parte de un cúmulo de sedimentos. Entre los organismos más importantes capaces de producir carbonatos se encuentran los corales, algas coralinas, algas verdes, moluscos, briozoarios y foraminíferos, entre otros. ⁽³⁴⁾

El origen inorgánico, por su parte, se atribuye a procesos bioquímicos y fisicoquímicos que se ejercen sobre aguas saturadas o sobresaturadas de carbonato de calcio. No se forman a partir de rocas preexistentes y representan el grupo más numeroso perteneciente a las rocas sedimentarias. ⁽⁵⁾

Los carbonatos están formados por (3) tres tipos de minerales principalmente: calcita con bajo porcentaje de magnesio ($\leq 5\%$ de magnesio), calcita con alto porcentaje de magnesio y aragonito. ⁽³¹⁾

Entre los minerales característicos formadores de estas rocas se destacan los mostrados a continuación ⁽³³⁾.

Tabla 13: Minerales carbonáticos mas importantes.

Mineral	Fórmula
Calcita	CaCO_3
Aragonito	CaCO_3
Magnesita	MgCO_3
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Estroncianita	SrCO_3
Siderita	FeCO_3
Witherita	BaCO_3
Rodocrosita	MnCO_3
Smithsonita	ZnCO_3
Cerusita	PbCO_3
Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$

Adicionalmente, los cuerpos carbonáticos son relacionados a óxidos de hierro y pirita como minerales accesorios, junto con porcentajes menores de cuarzo y arcillas ⁽⁵⁾.

El mecanismo de formación de los carbonatos involucra procesos de disolución, cementación, litificación y alteración de los mismos, desde el momento de la depositación, donde son expuestos a diversos agentes de meteorización hasta llegar al metamorfismo ⁽³⁴⁾.

En los carbonatos el concepto de madurez textural no tiene la relevancia que se presenta en sedimentos clásticos, ya que el tamaño, forma y escogimiento de los granos, se halla controlado principalmente por el tipo de biota ⁽³⁴⁾. Sin embargo, es importante destacar que los mismos se caracterizan por poseer una matriz porosa con baja permeabilidad y alta capacidad de retención de agua, lo que produce una serie de fracturas en la roca que aumentan la porosidad de la misma ⁽³⁵⁾.

Estas fracturas y porosidad heterogénea, exponen mayor superficie de contacto a los diversos agentes de alteración, química y física, debido a la percolación de fluidos químicamente activos, los cuales originan a su vez desviaciones en el camino de percolación de los mismos ⁽³⁶⁾.

Para la formación de este tipo de rocas se requieren ciertas condiciones, entre las cuales se pueden considerar las siguientes ⁽³⁴⁾:

- a) Aguas cálidas en mares tropicales.
- b) Aguas someras con una tasa de evaporación alta.
- c) Saturación o sobresaturación de carbonato en las aguas.
- d) Ausencia de turbidez generada por aporte de sedimentos por ríos, para garantizar un desarrollo de la biota y así la acumulación de la misma. La materia orgánica demanda cantidades grandes de dióxido de carbono (CO_2), produciendo un aumento del pH favoreciendo la precipitación.
- e) Temperaturas de las aguas comprendidas entre $(18-30)^\circ$, mostrando un rango óptimo de $(24-28)^\circ \text{C}$.
- f) El pH y las presiones parciales del dióxido de carbono (CO_2) son factores determinantes para la formación de carbonatos. El pH del agua debe ser de 8.4 o mayor, para favorecer la precipitación.

Sus sedimentos no suelen presentar mucho transporte desde el momento y lugar de formación hasta el momento y lugar de litificación ⁽³⁴⁾ y presentan solubilidad considerable en aguas que poseen dióxido de carbono (CO_2) disuelto, ya que el mismo aporta un ligero carácter ácido a las mismas, como ya antes se ha mencionado ⁽⁹⁾.

2.4.1- Meteorización

Debido a que la incorporación de especies químicas a las aguas subterráneas depende en gran medida del proceso de meteorización, a continuación se explica brevemente este proceso.

La resistencia de las rocas ante severas condiciones climáticas resulta ser un factor determinante para la estabilidad de las mismas ⁽³⁷⁾. Éstas, al ser expuestas a la superficie terrestre, cambian la situación de ambiente y condiciones bajo las cuales se formaron ⁽³⁸⁾, motivo por el cual las rocas tienden a adaptarse a estas nuevas condiciones, presentando cambios físicos y químicos en su estructura cristalina ⁽³⁹⁾, esto siempre en búsqueda de la estabilidad termodinámica ⁽¹⁹⁾. En esta búsqueda, los minerales, rocas y sedimentos pasan a formar nuevas especies estables ante las nuevas condiciones de presión, temperatura y actividad química presente en superficie ⁽⁵⁾.

Entre los cambios fisicoquímicos presentados en los minerales y rocas se encuentran ⁽³⁾:

- a) **Pérdida de la presión de carga por eliminación del material de recubrimiento:** los minerales se expanden en función de su elasticidad, con lo cual comienza la separación granular. Los poros y las fisuras creadas hacen a la roca más permeable a los fluidos hidrosféricos y atmosféricos.
- b) **Interacción química entre la roca y las fases fluidas:** fenómenos de solubilización parcial, oxidación, solución congruente (disolución) o incongruente (hidrólisis). En esta última, a su vez, puede existir o no interacción con el medio (por ejemplo fijación de iones del agua circundante).

- c) **Acciones mecánicas:** incluye toda alteración del material parental (roca o sedimento) ⁽¹⁹⁾, debida a la presencia de fuerzas físicas que rompen a la roca en trozos cada vez mas pequeños ⁽⁵⁾. Las rocas formadas en el interior de la corteza se hallan sujetas a presiones de confinamiento debido a la profundidad y las rocas suprayacentes (carga litostática). Cuando éstas son erosionadas debido a la exposición en la superficie, la presión originada por la carga litostática cesa, favoreciendo una expansión del cuerpo rocoso, en el cual se producen una serie de fracturas, aumentando el área superficial de susceptibilidad de la roca ante los agentes meteóricos ⁽⁵⁾. De igual forma, el constante calentamiento y enfriamiento del cuerpo rocoso produce conduce a un continuo proceso de dilatación-contracción, produciendo una fragmentación debido a las tensiones de dilatación acumuladas en la roca ⁽⁵⁾.
- d) **Acciones biológicas:** se halla determinada por la colonización vegetal en las superficies rocosas. Estas especies poseen la capacidad de absorber y aportar metales presentes en los suelos a través de sus raíces, siendo quelatados, percolados, transportados y finalmente depositados fuera del sistema. Adicionalmente, ésta se halla determinada por el crecimiento de bacterias, algas, líquenes y hongos principalmente, los cuales poseen la capacidad de alterar física y químicamente la capa externa de la roca, auspiciando el desarrollo de suelos ⁽⁵⁾. En conjunto don esto, los organismos excavadores, los cuales remueven y airean tanto suelo como sedimentos, tienden a aportar dióxido de carbono (CO₂) al sustrato rocoso, lo que pasa a favorecer la disolución de los cuerpos rocosos carbonáticos ⁽⁵⁾.
- e) **Acciones químicas:** alteración del material parental (roca o sedimento) con cambios sustanciales en la composición química y mineralógica, produciendo un colapso de la estructura mineral ⁽¹⁹⁾.

Entre los procesos alteración química se pueden destacar los siguientes:

- 1) **Disolución:** proceso químico correspondiente a la primera etapa de meteorización, asociado a la movilidad relativa de los elementos, debido al rompimiento de enlaces y así, induciendo un colapso en la red mineralógica, dejándolas disponibles como especies iónicas en el entorno ⁽³⁰⁾.

Para la red del mineral, la atracción que ejerce el disolvente (comúnmente agua) es mayor que la que puede ejercer y permite mantener en pie a la red cristalina, ya que las moléculas de agua poseen la fuerza suficiente para extraer a los iones de sus posiciones dentro del arreglo del cristal ⁽⁵⁾. Esto produce un colapso de la red mineralógica, dando origen a la formación de nuevas especies o también conocidas como *especies neoformadas*.

A continuación se presenta un ejemplo de disolución e hidrólisis del feldespato potásico en *aguas meteóricas*:



Como puede observarse en la ecuación antes propuesta, la tendencia a disolverse una especie cristalina aumenta considerablemente con la presencia de dióxido de carbono (CO₂), debido mayoritariamente a la descomposición de materia orgánica y procesos de respiración de organismos vivos presentes y formadores de los suelos. Debido a ello, las regiones que poseen alto grado de humedad con abundante vegetación, representan zonas de aguas subterráneas con ligero carácter ácido, lo cual aumenta su poder disolutor ⁽³⁾.

- 2) **Reducción:** Proceso químico el cual involucra la conversión de una especie mineralógica en otra debido a la pérdida de oxígeno presente en la misma, incorporándolo principalmente al medio o entorno ⁽³⁾.

- 3) **Oxidación:** representa la combinación del oxígeno con un mineral para formar óxidos e hidróxidos o cualquier otra especie donde se dé una ganancia de oxígeno y, químicamente una pérdida de electrones. ⁽³⁰⁾

Debido a su alto potencial de impacto ambiental, la oxidación de sulfuros metálicos resulta uno de los temas de mayor interés. Tiende a producirse cuando grandes cantidades de sedimentos fuertemente reducidos y ricos en sulfuros (la mayoría de procedencia de actividades mineras) son expuestos a condiciones superficiales ⁽⁴⁰⁾.

La oxidación de sulfuros metálicos tiene (2) dos orígenes principalmente: inorgánico y biológico. El origen inorgánico viene causado mayoritariamente por la acción del oxígeno (O₂). Se halla favorecido por ambientes abiertos y bien drenados, con fácil eliminación de los productos disueltos ⁽⁴¹⁾.

El origen biológico, en cambio, se verá favorecido por la acción catalizadora de determinadas bacterias que poseen la capacidad de acelerar (y en algunos casos retardar) los procesos de oxidación de la especie de hierro ferroso (Fe⁺²). Este proceso resulta ser el mecanismo de oxidación más importante en todo el rango de pH de las aguas naturales ⁽³⁹⁾.

A continuación se presenta la reacción de oxidación del hierro bajo la forma de pirita, producto de una oxidación inorgánica:



El proceso de oxidación resulta muy importante en la alteración de silicatos ferromagnesianos como olivino, piroxeno, anfíbol y biotita. El hierro de estos minerales se combina con el oxígeno para formar hematita.

- 4) **Hidrólisis:** reacción química entre los iones de hidrógeno o los iones hidroxilo del agua y los iones de un mineral. Esta sustitución cambia la composición de los minerales, liberando sustancias solubles que pueden entonces oxidarse. Resulta ser la principal causa de descomposición de muchos silicatos ⁽³⁾.

- 5) **Lixiviación:** migración de iones alentada por los procesos de disolución, hidrólisis, hidratación, entre otros. La movilización de los iones dependerá del potencial iónico entre ellos. Elementos como el calcio, magnesio, sodio y potasio son fácilmente lixiviados por las aguas circulantes, mientras que el hierro y aluminio representan a los elementos más resistentes ⁽³⁾.

- 6) **Hidratación:** absorción de moléculas de agua dentro de la estructura interna de un mineral. La admisión de agua acelera los procesos de disolución, oxidación, reducción e hidrólisis debido a los cambios de volumen producidos en el mineral y a la reacción exotérmica producida ⁽³⁾.

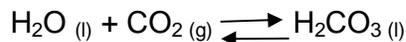
2.4.2.- Factores que afectan el proceso de alteración de las rocas carbonáticas.

La alteración de las rocas carbonáticas va a depender de muchos factores según sean las características del cuerpo rocoso y las características del ambiente exógeno en el que éste se halle ⁽⁹⁾.

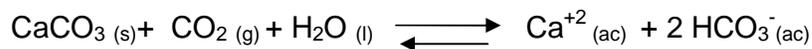
Entre las características que determinan la tasa de meteorización de las rocas carbonáticas se destacan: el grado de cristalinidad ⁽¹²⁾, porosidad, permeabilidad, cementación, fracturamiento, composición y textura ⁽⁵⁾.

Adicionalmente, factores como el relieve, clima, litología ⁽⁹⁾, la tasa e intensidad de precipitaciones, la tasa de evaporación, el grado de filtración de agua a través de suelos y rocas ⁽⁵⁾, la temperatura, saturación de aguas con carbonatos, presencia de dióxido de carbono (CO₂) ⁽¹²⁾, pH y Eh ⁽¹³⁾ ⁽¹⁸⁾, se comportan como agentes controladores de procesos como disolución ⁽³⁴⁾, lixiviación ⁽¹³⁾ y óxido-reducción, los cuales determinan la movilidad de los elementos en el ambiente exógeno ⁽¹⁸⁾.

En las *aguas meteóricas*, el dióxido de carbono (CO₂) se combina con el agua para formar ácido carbónico (H₂CO₃), el cual disuelve perfectamente a la calcita, principal mineral en las rocas carbonáticas. La formación de ácido carbónico en el agua es expresada por la siguiente ecuación ⁽⁵⁾:



En las calizas, el ácido carbónico reacciona con la calcita y forma bicarbonato de calcio, el cual se mantiene en solución hasta que finalmente es removido por el agua subterránea ⁽⁵⁾. A continuación se presenta la reacción que muestra la solubilidad de la calcita (carbonato de calcio) en *aguas meteóricas*. ⁽³³⁾



Luego de la calcita, la dolomita resulta ser el carbonato más común. Se halla estructurado principalmente por calcio y magnesio y posee un origen diagenético a partir de la sustitución del calcio por magnesio en el arreglo cristalino de la calcita ⁽⁵⁾.

De igual forma, la dolomita presenta inestabilidad frente a diversos agentes ambientales como las *aguas meteóricas*, las cuales inducen a la disolución de la misma mediante la reacción presentada a continuación ⁽²²⁾:



La disolución del carbonato permite un acercamiento rápido al equilibrio con los cationes del suelo ⁽¹²⁾ y tienden a controlar la química de las aguas, cuando están presentes en los mismos, en niveles iguales o mayores al 1% ⁽²³⁾.

2.5.- Metamorfismo

Debido a la importancia que presentan las rocas metamórficas en la presente investigación, se hará una breve descripción de este proceso y los factores que lo determinan.

Cuando las rocas están sometidas a condiciones de presión y temperatura diferentes a las de su formación, las mismas dan una respuesta a esas nuevas condiciones en busca de estabilidad, produciendo cambios de forma gradual hasta lograr alcanzar un nuevo estado de equilibrio ⁽⁴¹⁾. Dicho evento se conoce con el nombre de *metamorfismo*. Éste se produce de manera creciente, desde cambios texturales y mineralógicos ligeros (grado bajo) hasta llegar a cambios bastante definidos (grado alto).

Entre los factores principales que determinan el metamorfismo se encuentran ⁽³⁾:

- a) Calor
- b) Presión (esfuerzo)
- c) Fluidos químicamente activos

El metamorfismo de grado bajo se lleva a cabo a temperaturas y presiones ligeramente mayores a las existentes al momento de litificación de los sedimentos ⁽³⁾. Estas presiones producen una compactación, originando un aumento en la densidad de la roca, produciendo a su vez un tipo de textura asociada según la magnitud del esfuerzo ⁽⁴¹⁾.

La textura es considerada como toda aquella característica (forma, tamaño y distribución) que presentan las partículas mineralógicas que conforman una roca. Entre las texturas metamórficas se encuentran: foliada y no foliada ⁽⁴¹⁾.

La textura foliada viene definida bajo condiciones extremas. La presión origina un alineamiento en los granos y en algunos casos logra iniciar una recristalización en ciertos minerales. Esta recristalización produce un aumento en el tamaño de los cristales a escala visible y pueden llegar a ser perpendiculares a la dirección de esfuerzo, permitiendo la separación en lajas o capas. Este arreglo se conoce con el nombre de *foliación* ⁽⁴¹⁾.

En la zona de estudio se presentan (2) dos estructuras foliadas de gran importancia: esquistos y gneises ⁰. Los esquistos son rocas metamórficas muy foliadas formadas bajo regímenes de presión y temperatura en grados medios a altos y se caracterizan por presentar ciertas lineaciones tipo escama, las cuales son conocidas como *esquistosidad*. Se compone de aproximadamente un 20% de minerales planares, se origina a partir de lutitas (previamente deformadas o no) y se hallan asociados a la formación de montañas ⁽⁴¹⁾.

A continuación se presenta una imagen donde se puede observar como ejemplo una roca metamórfica foliada (esquisto micáceo).



Imagen 1: Esquisto micáceo ⁽⁴²⁾.

Los gneises son rocas metamórficas bandeadas originadas bajo condiciones de temperatura y presión elevadas, donde las migraciones iónicas pueden ser lo suficientemente grandes como para generar segregación de minerales, aportando así un aspecto de bandeamiento. Están conformados principalmente por cuarzo y feldespatos ⁽⁴¹⁾.

A continuación se presenta como segundo ejemplo de roca metamórfica foliada, un gneis:



Imagen 2: Gneis cuarzo feldespático potásico biotítico presente en el complejo Imataca ⁽⁴³⁾.

Las rocas metamórficas no foliadas se caracterizan por componerse de un solo mineral (monomineral), donde el hábito de los cristales se caracteriza por ser equidimensional ⁽³⁴⁾.

Entre las rocas metamórficas no foliadas se encuentra una de gran importancia para la presente investigación: el mármol ^{(42) (43) (44)}.

El mármol es una roca metamórfica cristalina de grano grueso derivada de la alteración de calizas y dolomías ^{(5) (41)}, caracterizándose por presentar coloraciones claras y, en condiciones de metamorfismo bajo, texturas reliquias como fósiles. En oposición a esto, si el grado de metamorfismo es elevado, solo serán observados cristales producto de procesos de recristalización ⁽⁴¹⁾. A continuación se presenta una imagen donde se muestra una roca metamórfica no foliada (mármol):



Imagen 3: Mármol ⁽⁴⁴⁾.

El metamorfismo de grado alto involucra fuerzas tectónicas extremas y temperaturas cercanas a la de fusión de las rocas ⁽⁴¹⁾.

3.- OBJETIVOS.

3.1.- OBJETIVO GENERAL

Caracterizar hidrogeoquímicamente las aguas subterráneas pertenecientes a la región Guacuripia - El Palmar, estado Bolívar.

3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Determinar la concentración de las especies químicas Ca^{+2} , Ba^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} , Al^{+3} , Fe^{+2} , Mn^{+2} , Sr^{+2} , UO_2^{+2} y SiO_2 , mediante la técnica analítica de espectroscopía de emisión atómica inductivamente acoplado a plasma.
- 2) Determinar la concentración de las especies químicas Na^+ y K^+ mediante la técnica analítica de espectroscopía de emisión atómica con llama y la concentración de la especie química Mg^{+2} mediante la técnica analítica de espectroscopía de absorción atómica con llama.
- 3) Determinar la concentración de las especies químicas SO_4^{-2} y NO_3^- mediante la técnica analítica cromatografía iónica y la concentración de las especies químicas Cl^- y HCO_3^- mediante la titulación argentométrica y potenciométrica, respectivamente.
- 4) Establecer la posible relación entre la litología y la composición química de los pozos de agua subterránea mediante los resultados obtenidos experimentalmente y la bibliografía previamente consultada.
- 5) Establecer el área de influencia de la litología dolomítica en las aguas subterráneas (acuíferos) de la zona
- 6) Evaluar la calidad química del agua subterránea destinada a consumo humano y en caso de no ser apta para tal uso, plantear posibles usos, según resulte la composición de las mismas.

4.- ANTECEDENTES

4.1.- Internacionales

Roy y Gaillardet (1999) ⁽⁹⁾ desempeñaron trabajos de investigación en el río Seine ubicado en Europa, en busca de identificar los procesos principales responsables de la composición química de las aguas, por medio de la caracterización geoquímica de los sólidos disueltos y suspendidos en las mismas. En sus resultados, presentan la siguiente distribución de carga total disuelta: 2% atribuido a sólidos derivados de fuentes naturales atmosféricas, 7% derivados de fuentes atmosféricas antrópicas, 6% derivado de zonas agrícolas, 3% debido a entrada de residuos comunales y un 82% debido a la meteorización de los cuerpos de roca, atribuyendo así, a procesos como la disolución (congruente e incongruente) de minerales la mayor relevancia en cuanto al aporte de especies en solución al río en estudio.

Por otra parte, **Beaucaire et al (1999)** ⁽⁴⁵⁾ estudian el origen de la salinidad presente en las aguas subterráneas de la mina Chardon, en Francia, por medio de la determinación de las especies mayoritarias, minoritarias, traza e isotópicas. Los autores durante la investigación emplean el litio como elemento indicador de la interacción agua roca en ambientes cristalinos ya que el mismo no es fácilmente removido y/o asimilado por minerales secundarios. Dicho elemento presenta una buena relación lineal con el magnesio y es aportado por la meteorización geoquímica de los filosilicatos (especialmente biotita).

Adicionalmente, los resultados obtenidos sugieren que las aguas profundas del área de estudio son el resultado de una mezcla entre un cuerpo subterráneo salino primario y un cuerpo de agua dulce, donde los iones determinados cloruro y bromuro sugieren una única evolución química de las mismas.

Brousted et al (1997) ⁽⁴⁶⁾ realizan estudios geoquímicos sobre cuerpos de agua subterránea pertenecientes a la Comarca Lagunera, ubicada al norte de México. Los autores señalan que la sobreexplotación de estos cuerpos de agua ha sido traducida como una disminución en el nivel freático, lo que posiblemente genere una

inhabilitación de las aguas por extinción o pérdida de la calidad de las mismas. Esta realidad se tradujo en una investigación que se basó en el estudio de las zonas de recarga y descarga de los acuíferos mediante el empleo de especies isotópicas, el cálculo del tiempo de residencia de las aguas en el acuífero (por medio del uso de radiocarbono) y el origen asociado a la mineralización de los cuerpos de aguas.

Los resultados presentaron una alta variabilidad espacial debido a la meteorización geoquímica de diversas litologías y la tasa de evaporación, proceso al cual se atribuye la alta mineralización de las aguas. Finalmente, el tiempo de residencia confirmó una zona de recarga moderna de las aguas provenientes del río Nazas, adyacente al área de estudio.

Frape y Fritz (1984) ⁽⁴⁷⁾ estudiaron más de 300 muestras para determinar el impacto que tienen las especies isotópicas y químicas en la composición presentada por diversos cuerpos de agua subterránea, específicamente las aledañas a la cuenca Canadiense. Debido a la pérdida de la composición primaria mineral posiblemente debido a la acción hidrotermal, se originaron una serie de discusiones referentes al origen de la salinidad presentada en estas aguas., a pesar de que en esta cuenca se presenta una composición química similar para las aguas, sugiriendo una misma evolución geoquímica.

La cantidad de sólidos disueltos presentados por estas aguas llega a ser de 3000 a 5000 ppm, caracterizándose así como *aguas salinas o salmueras*, las cuales los autores sugieren deben su origen a zonas de falla o cizalla.

Adicionalmente, los resultados obtenidos muestran una excelente relación lineal entre el calcio y sólidos disueltos totales, sugiriendo así que procesos como la formación de minerales neoformados (antartacita) desempeñan un papel importante en el control geoquímico del elemento. Por otra parte, las altas concentraciones de magnesio en las aguas sugieren una fuerte influencia de rocas ultramáficas, mientras que las bajas concentraciones de calcio (hasta por debajo de 5 ppm) son atribuidas a la formación de minerales secundarios como la clorita.

Jalali (2007) ⁽⁴⁸⁾, por su parte, realiza estudios referentes a la caracterización química en la cuenca Chah, perteneciente a la provincia Hamadan, en Irán. Plantea que los cuerpos de agua de la zona son sometidos a procesos hidrogeoquímicos complejos, debido al amplio rango de concentraciones obtenido para las especies iónicas presentes. Las especies calcio y bicarbonato resultan predominantes en el área, específicamente en la zona de recarga. Por su parte, los procesos de intercambio catiónico y demás meteorización mineral se presentan como principales responsables de la composición química de las aguas de estudio, determinando su impacto con el establecimiento de relaciones interelementales.

Adicionalmente, **Jalali** sostiene que la composición química de las aguas está siendo afectada por actividades antrópicas, entre las cuales destacan el uso de fertilizantes y plaguicidas, así como incorporación de drenajes y aportes directos de desechos domésticos.

En la misma línea de ideas, **Rahmojan** (2006) ⁽⁴⁹⁾, realiza estudios en busca de entender el papel que juega la variación del nivel del agua con su composición química. Para ello, durante los años 1998 y 1999 llevaron a cabo muestreos mensuales, captando aguas subterráneas adyacentes a los ríos Palar y Chevyar, al sur de la India, las cuales principalmente son destinadas a consumo y usos agropecuarios.

Se realizó la determinación de las especies iónicas mayoritarias, las cuales mostraron una variación de acuerdo a la distribución espacial. De esta forma, las aguas captadas en las cercanías del río Palar presentan altas concentraciones de las especies mayoritarias a excepción del calcio, mientras que las menores concentraciones de dichas especies son ubicadas preferencialmente en la zona central del área de estudio. Finalmente los procesos imperantes en la composición química de las aguas fueron los procesos de disolución mineral y actividad antrópica.

Lixin Jin (2007) ⁽¹²⁾ estudia la meteorización mineral carbonática en suelos de Michigan, Estados Unidos. Jin sugiere que la disolución de la dolomita, proceso principal responsable de la composición química de las aguas, resulta mayor que la presentada por la calcita bajo las condiciones ambientales presentes y que a su vez, esto favorece el incremento en las concentraciones de carbono inorgánico total disuelto, parámetro que presenta una fuerte influencia en los valores de pH y por ende, en la tasa de meteorización de la roca.

Kim et al (2010) ⁽¹³⁾ determinaron los procesos que controlan las variaciones de pH, bicarbonato y presión parcial de CO₂ en los intersticios de cenizas de carbón. La importancia del estudio reside en el papel que desempeñan estos factores en la lixiviación de los elementos traza.

Los resultados presentados por los autores, demuestran la existencia de una relación entre el grosor de la capa de suelo y la regulación de los parámetros en estudio. Ellos señalan que en ausencia de una capa de suelo, los intersticios superficiales presentan bajo contenido de CO₂ y bicarbonato, observándose altos valores de pH, comportamiento contrario al presentado cuando hay presencia de una cobertura de suelo poco permeable, la cual produce un aumento en los valores de CO₂ y bicarbonato, facilitando así un equilibrio en los valores de pH, los cuales ahora están dentro de un rango neutral. Los autores atribuyen esta diferencia de condiciones a posibles cambios de suministro de CO₂, asociado principalmente a cambios en la tasa de infiltración de los fluidos, mayoritariamente aguas meteóricas.

Para el área de estudio, el modelo geoquímico obtenido muestra que procesos como la precipitación de calcita, dolomitización, meteorización de fases minerales y cenizas de carbón son los principales responsables en el decrecimiento o aumento de los parámetros CO₂, pH y bicarbonato, los cuales están altamente relacionados.

En la misma línea de ideas, **Yavuz et al** (2006) ⁽³⁷⁾ realiza la estimación de las propiedades índice en las rocas carbonáticas deterioradas debido a procesos de meteorización por impactos termales (calentamiento y enfriamiento). Para esto, los autores realizaron un muestreo constituido por 12 rocas carbonáticas diferentes, las cuales fueron sometidas a meteorización física simulada, con procesos de choques térmicos a través de secuencias de 20 ciclos de enfriamiento-calentamiento.

El modelo aplicado fue validado por diversas pruebas estadísticas y permitió obtener el índice de decrecimiento presentado en una roca carbonáticas, sujeta siempre a las propiedades y porosidad inicial. Finalmente, la ecuación empleada fue incorporada a un modelo estándar en busca de su optimización, haciéndola independiente del número de ciclos propuestos, propiedades o porosidad inicial.

Por otra parte, la geología médica estudia el impacto que tienen los factores y procesos geológicos naturales en la salud de los seres vivos. Desde el nacimiento de esta ciencia, muchas investigaciones han surgido en busca de la asociación entre enfermedades mortales cerebro y cardiovasculares con la dureza del agua. **Gupta (1999)** ⁽¹¹⁾, por ejemplo, desempeñó estudios acerca del comportamiento presentado por los elementos traza ante condiciones exógenas asociadas a explotación de carbón y aguas subterráneas, aledañas a la mina de carbón PENCH VALLEY, en la India. Esta investigación busca evaluar la influencia en la composición de las aguas y determinar el impacto en la salud humana.

Los resultados obtenidos describen que ante un ambiente exógeno influenciado por condiciones de explotación de carbón, los elementos traza presentaron una alta movilidad, lo que luego produjo una alta tasa de incorporación de los mismos a los cuerpos de agua y así, valores ubicados por encima de los máximos permitidos para garantizar un buen estado de salud, lo que se tradujo en una pérdida de la calidad de las aguas para un uso doméstico.

Hirotohi Mori et al (2006) ⁽⁵⁰⁾ realizan estudios relacionados con el contenido de los elementos calcio y magnesio en aguas (principales contribuyentes en la dureza de la misma) y el impacto que presenta en la salud una deficiencia o excedencia en la ingesta de los mismos. Dicho estudio fue realizado muestreando aguas de diferentes fuentes (ríos, manantiales, pozos, acueductos) en distintos lugares del mundo (Estados Unidos, Francia, Bélgica, Turquía, Grecia, Chile, Egipto, China, Corea, Mongolia, Indonesia y Japón).

Los resultados presentados por los autores muestran diferencias considerables en el contenido mineral en el agua potable a nivel mundial. Por ejemplo, en Europa, ambos elementos presentaron concentraciones elevadas respecto a otras áreas del mundo, indicando así la presencia de aguas más duras, comportamiento inverso al observado para las aguas muestreadas en el área de Japón, las cuales se ubican por debajo de los valores presentados en Europa y Norteamérica, aportándoles un carácter mas blando que las mismas.

Adicionalmente, los autores señalan que las aguas blandas, debido a una deficiencia presentada en la concentración de ambos elementos (principalmente de magnesio), son relacionadas de una forma aun no bien establecida, al desarrollo de enfermedades cardiovasculares.

Yang et al (2006) ⁽¹⁶⁾ determinaron las concentraciones de los elementos Calcio y Magnesio en el agua potable y su relación con el riesgo de muerte por infartos al miocardio, en Taiwán. Para lograr este objetivo, los autores solicitaron la información fisicoquímica de los parámetros y especies determinadas a la corporación de agua Taiwán. Los resultados presentados para la relación entre el índice de mortalidad por causa (infarto al miocardio) y la dureza del agua, mostraron un efecto inverso al planteado anteriormente. Los autores describen que las aguas presentaron un comportamiento protector ante la iniciación y el desarrollo de las enfermedades cardiovasculares.

4.2.- Nacionales

Montero (1997) ⁽⁵¹⁾, por su parte, lleva a cabo la caracterización hidrogeoquímica de cuerpos de agua subterránea captadas en la región nor-central en el estado Monagas. Para ello, el autor llevó a cabo la captación de 63 muestras ubicadas en pozos, aljibes, manantiales y pozos surgentes, y 8 muestras correspondientes a aguas superficiales, en busca de verificar la interconexión hidráulica entre los sistemas subterráneo y superficial.

Los resultados presentados muestran la existencia de masas de aguas contaminadas con las especies nitrato, sodio, potasio y cloruro, posiblemente aportadas por actividad antrópica. Por otra parte, el autor determina, por medio de las relaciones interelementales, que los procesos principales responsables en la composición química de las aguas son la disolución de los cuerpos de rocas carbonáticas, en conjunto con el proceso de intercambio iónico.

En la misma línea de ideas, **Zambrano** (1999) ⁽⁵²⁾ realiza la caracterización geoquímica de las aguas subterráneas pertenecientes al estado Táchira, en busca de establecer una posible relación entre la composición química de las aguas y la litología aflorante.

Para cumplir con estos objetivos, el autor procedió a recolectar un total de 34 muestras de agua subterránea. Luego de ello, procedió a determinar los parámetros fisicoquímicos, donde obtuvo como resultado que el proceso que gobierna la composición de las aguas es el de interacción agua-roca, expresado como disolución de rocas carbonáticas, silicatadas y aluminosilicatadas. Adicionalmente, los resultados obtenidos para los iones sulfato, nitrato y cloruro permiten proponer una influencia directa de las actividades antrópicas.

Por su parte, **Faublack** (2008) ⁽⁵³⁾ caracterizó muestras de agua subterránea pertenecientes a los sectores Barbacoas (estado Aragua) y Cachamas (estado Guárico), con el fin de conocer los procesos que controlan la composición química de las aguas.

Para lograr este objetivo, la autora realizó la captación de 16 muestras para las cuales determinó la magnitud de los parámetros fisicoquímicos y especies químicas (mayoritarios, sílice disuelta y trazas). Los resultados fueron validados por medio del cálculo de la conductividad teórica y el balance de masas, y fueron interpretados por medio del empleo del diagrama de Piper y relaciones interelementales.

Los resultados presentados por la autora muestran la existencia de dos grupos de agua, donde la composición química del grupo I es controlada por procesos de disolución mineral debido a la interacción agua-roca, mientras el segundo grupo debe su composición a procesos de intercambio iónico y aporte atmosférico.

En otra línea de ideas, **Reina** (2011) ⁽⁵⁴⁾ lleva a cabo estudios de caracterización química (inorgánica y orgánica) de los compuestos lixiviados del relleno sanitario “La Bonanza”, en el estado Miranda. Para ello, la autora analizó 8 muestras de lixiviados y 2 muestras de aguas superficiales presentes en el área de estudio, a las cuales determinó los parámetros fisicoquímicos. Seguido de esto, los resultados obtenidos fueron validados por medio del cálculo del balance iónico.

Los datos presentados por la autora señalan que las mayores concentraciones obtenidas para los elementos traza fueron detectados en los lixiviados que fueron sometidos a evaporación y el lixiviado que presenta la mayor edad del relleno, los cuales se caracterizan por presentar altas concentraciones en las especies sodio, potasio, cloruro y nitrato, respecto al Decreto 883 del MARN (Gaceta oficial N°E-5021). Adicionalmente, fueron identificados 32 compuestos orgánicos volátiles además de los comúnmente hallados en estos rellenos (BTEX).

Finalmente, **Ferreira** (2007) ⁽⁵⁵⁾ realizó estudios de caracterización geoquímica de 26 muestras de aguas subterráneas captadas en los sectores Monte Oscuro, Caño del Diablo y la zona central del Sistema de riego del río Guárico, en el estado Guárico, con el fin de identificar los procesos que controlan la composición química de las aguas y evaluar la calidad de las mismas.

Los datos obtenidos del análisis químico de las especies y parámetros fueron validados por medio del cálculo del balance iónico y conductividad teórica, y fueron interpretados por medio del empleo de diagramas de Piper y relaciones interelementales.

La composición química de las muestras de agua evidencia la existencia de dos grupos de agua, donde el grupo I es dominado por el proceso de disolución de especies minerales en conjunto con el proceso de intercambio iónico. Este grupo corresponde a las muestras captadas en la zona central del río Guárico.

Contrario a esto, el grupo II es dominado por el aporte atmosférico en conjunto con el proceso de intercambio iónico. Este grupo de aguas se ubica en los sectores Caño del Diablo y Monte Oscuro.

En relación a la calidad del agua, 16 muestras son clasificadas como excelentes mientras las restantes 10 son catalogadas como Aceptables, debiendo ser destinadas a actividades industriales, comercio, armonía paisajística y navegación.

4.3.- Locales

La Formación Guacuripia posee uno de los cuerpos carbonáticos de mayor importancia económica y académica para el país, debido a su asociación con las antiguas menas de manganeso aflorantes en la región de Upata y por su posible uso en la industria siderúrgica y agrícola del estado Bolívar, donde podrían ser usadas con el fin de remediar la acidez de los suelos típicos de la región ⁽⁵⁶⁾.

Por este motivo, **Fernández** en el año 2006 emprende su investigación con el fin de determinar las características asociadas al cuerpo de roca, a fin de poder plantear una posible relación con las menas de manganeso antiguamente explotadas ⁽⁴⁶⁾. Para ello, fueron estudiadas las rocas frescas y meteorizadas asociadas al mármol, para así poder establecer una relación entre la variación química y mineralógica producto de procesos de alteración ⁽⁵⁶⁾.

Elementos como calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), sodio (Na) y potasio (K) fueron determinados en una fracción de roca carbonática, donde logró establecerse el orden de lixiviación mostrado a continuación $Fe > Mn > Na \geq K > Ca > Mg$.

Por otra parte, **Nevado** (1999) ⁽⁵⁷⁾ en busca de identificar y estudiar los diferentes procesos que tienen lugar durante la interacción agua- roca existente entre el mármol dolomítico y las aguas subterráneas de la zona en estudio, se llevó a cabo la recolección de (25) veinticinco muestras distribuidas a lo largo de las (2) dos provincias geológicas pertenecientes a la zona noreste del estado Bolívar: Imataca y Pastora ⁽⁵⁷⁾.

En los resultados de esta investigación se obtuvo el orden de variabilidad determinado para las especies químicas mayoritarias mostrado a continuación: $Cl^- > Mg^{+2} > NO_3^- > SO_4^{-2} > Na^+ > K^+ > HCO_3^- > SiO_2$, donde a través del diagrama de Piper y las figuras de Stiff se pudieron atribuir esas composiciones a diferentes tipos de agua, atribuyéndole un posible origen a las mismas.

En adición a esto, valores anómalos de algunos elementos traza como el estroncio y manganeso, conjuntamente con cloruros y sulfatos, permitió proponer zonas de posibles mineralizaciones en la localidad de San Lorenzo, vía el Palmar.

Saavedra (2006) ⁽⁵⁸⁾ continuó el trabajo iniciado por Fernández determinando las especies químicas Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} , Al^{+3} , Sr^{+2} , Ti^{+3} , Zr^{+4} , Co^{+2} , Ni^{+2} , UO_2^{+2} y SiO_2 en muestras de roca fresca y alterada y suelos superficiales colectados en Guacuripia. Sus resultados concuerdan con los obtenidos por Fernández (2006) ⁽⁵⁶⁾.

Un aspecto de importancia que se desprende de este trabajo, es la determinación de concentraciones apreciables de Uranio en algunas de las muestras colectadas. Dada la geoquímica de este elemento, el mismo podría estar siendo incorporado a las aguas subterráneas donde, de ser detectado, podría utilizarse como trazador del área de influencia de la litología carbonática ⁽⁵⁷⁾.

Godoy (2007) ⁽⁵⁹⁾ continuó esta línea de investigación realizando el estudio de la distribución vertical en un perfil de suelo para los elementos Ca, Mg, Fe, Mn, Al, Si, Sr, Cu, Co, Ni, Ba, Zn, Pb, Rb y Ti. Este perfil correspondió a uno de los relictos de los horizontes manganesíferos aflorantes en la región de Guacuripia.

Este trabajo permitió establecer la distribución de estos elementos en el perfil y establecer algunas relaciones elementales como Ti/Al; Fe/Al; Ca/Al; Mn/Al y Mg/Al así como una relación genética entre el mármol dolomítico de Guacuripia y los suelos manganesíferos de la región.

Por otra parte, **Morantes (1997)** ⁽⁶⁰⁾ realizó un estudio hidrogeoquímico en los ríos que drenan sobre las Provincias geológicas de Imataca, Pastora y Roraima (cuenca del río Cuyuní), en busca de establecer una posible relación entre la composición química de las aguas y la litología aflorante en el área de estudio. Para esto, el autor llevó a cabo la captación de un total de 16 muestras, tomando en consideración las diferentes unidades litoestratigráficas presentes en el área de interés.

Para el total de las muestras, el autor determinó los parámetros fisicoquímicos, sólidos suspendidos y disueltos. Los resultados indican que las aguas más ácidas se hallan drenando sobre la provincia de Roraima, área donde adicionalmente fueron halladas las más altas concentraciones de carbono orgánico disuelto, atribuyendo esto a la acción de factores geomorfológicos que puedan estar presentes en el área.

Por otra parte, el grado de mineralización permitió clasificar las aguas en tres grupos, de los cuales el tercer grupo se caracteriza por presentar los valores más elevados de conductividad, sólidos disueltos totales, sílice, sodio, potasio, calcio, hierro, bario, cloruro y estroncio, entre otros. Este grupo corresponde a los ríos que drenan sobre la Provincia de Imataca, el Complejo Supamo y el Cinturón de Rocas Verdes, que adicionalmente han sido sometidos a eventos hidrotermales y alta evaporación (y precipitación de sales).

5.- GEOLOGÍA

5.1.- Geología Regional

En Sur-América, el área de escudos precámbricos se halla dividido principalmente en (2) dos porciones: El escudo de Guayana Venezolano y el Escudo Brasileiro, separados por la cuenca del río Amazonas. ⁽⁶¹⁾

El escudo de Guayana Venezolano muestra una extensión, de aproximadamente 46% del territorio nacional, se encuentra al sur del curso del río Orinoco ⁽⁶¹⁾ ⁽⁶²⁾, al este del río negro, al norte del valle del Amazonas y al oeste del océano atlántico.

La región de Guayana se caracteriza por poseer un clima muy húmedo donde se desarrolla una vegetación abundante que sirve de habitat para especies como loros, monos, ardillas, zorros, distintos tipos de serpientes e insectos, entre otros ⁽²⁴⁾.

Guayana presenta un período de precipitaciones durante todo el año, sin un periodo seco bien definido, lo que favorece la tasa de infiltración sobre la de evaporación. En el sur de Bolívar se presenta un promedio anual donde la tasa de precipitación supera los 2500 mm, llegando a alcanzar hasta más de 4000 mm. Los meses más lluviosos ocurren entre junio y octubre, meses en los cuales se presenta una tasa de precipitación comprendida entre 300 y 500 mm mensual. Tiende a disminuir entre los meses noviembre y diciembre presentando valores por debajo de los 200 mm, hasta llegar a los valores mínimos presentados entre enero y febrero, donde la tasa de precipitación se encuentra ubicada entre 100 y 200 mm mensual ⁽²⁴⁾.

A continuación se presenta la distribución de la tasa de precipitaciones en el país según estudios realizados entre los años 1968-1983 ⁽²⁴⁾.

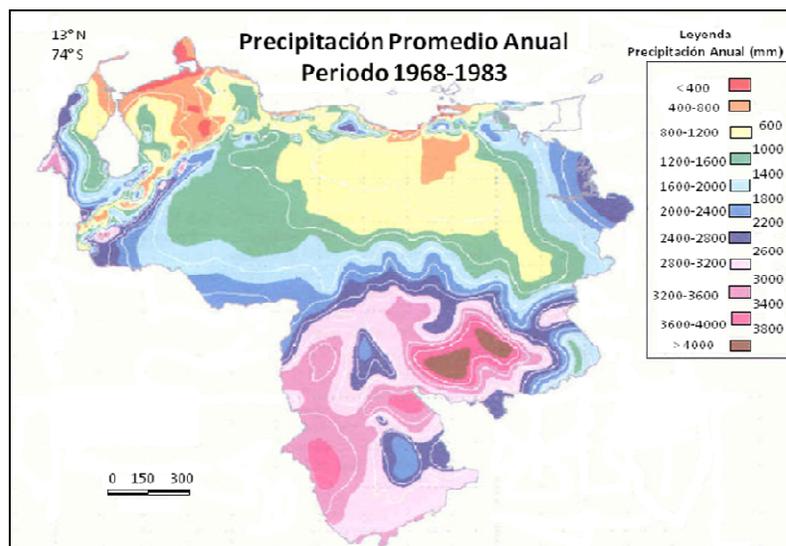


Figura 3: Distribución de precipitación promedio anual en Venezuela ⁽²⁴⁾.

Por otra parte, el escudo está conformado por rocas arqueozoicas y proterozoicas de diversas litologías, alteradas según los episodios geotectónicos acontecidos ⁽⁶¹⁾. Las rocas de alto grado de metamorfismo y parcialmente migmatizadas están representadas por paragneises, esquistos, gneises graníticos, esquistos anfibólicos y anfibolitas intrusionadas por granitos, granodioritas y rocas básicas, las cuales se consideran como las unidades más antiguas del escudo ⁽⁶²⁾. Se halla dividido en (4) cuatro provincias principales Roraima, Imataca, Pastora y Cuchivero, basado esto, en los caracteres petrológicos y tectónicos, entre las cuales se destacan las diferencias existentes entre las asociaciones litológicas, direcciones estructurales, estilos de deformación y edades, principalmente ⁽⁶¹⁾.

La parte central el escudo se encuentra cubierto por sedimentos de la formación Roraima, de origen terrestre, que suprayace discordantemente a las rocas de la pastora. ⁽⁴²⁾

La serie Imataca, a su vez, se halla caracterizada por la formación de hierro y de manganeso, aflorando en la parte central y oriental de Venezuela. Se halla definida por una serie de rocas migmatizadas, granitizadas y metamorfizadas, constituida

principalmente por gneises y granulitas feldespáticas, esquistos anfibólicos, mármol dolomítico y cuarcitas ferruginosas ⁽⁶²⁾. Junto con el grupo pastora suprayacente, esta serie constituye la parte superior del complejo basal o precámbrico de Guayana en Venezuela, separadas por la zona de falla de Guri ⁽²⁵⁾, así como también se hallan delimitando la zona de estudio.

5.1.1.- Provincia de Imataca

La provincia de Imataca se ubica al extremo norte de la Guayana venezolana, ocupando una faja angosta, con anchuras comprendida entre 65 y 130 kilómetros y una longitud de aproximadamente 500 kilómetros. Es conocida como Cinturón Granulítico ⁽²⁵⁾ y se halla definida entre el río Caura y el territorio Delta Amacuro, al oeste y al este, respectivamente ⁽⁶¹⁾.

La provincia se halla representada en la actualidad por un conjunto de rocas leucocráticas en una abundancia aproximada del 80%, gneises máficos y félsicos, así como metasedimentos graníticos plegados, con intercalaciones de capas de cuarcitas ferruginosas y cuerpos de rocas graníticas más delgados ⁽²⁵⁾.

La provincia presenta evidencias de eventos de deformación y metamorfismo de alto grado bastante complejos. Estas rocas poseen edades comprendidas entre 3500-3600 m.a. aproximadamente, lo que indica que pueden estar correspondiéndose con la edad de las rocas originales previas al metamorfismo, correspondientes al precámbrico temprano ⁽²⁵⁾.

La deformación más significativa se halla ubicada al N-NW de la falla de Ciudad Piar– Guri ⁽²⁵⁾, la cual posee una extensión de aproximadamente 400 Km desde el sur-oeste de Ciudad Piar hasta el Delta del Orinoco, donde se pierde bajo los sedimentos ⁽⁶²⁾.

Esta falla separa a las provincias Pastora e Imataca y las diferencia geomorfológicamente, mostrando en Imataca terrenos elevados y abruptos, mientras en la provincia pastora se reflejan lomas suaves, bajas y redondeadas. Esta falla, junto con la del Pao, representa uno de los más importantes elementos estructurales en el área ⁽⁶²⁾.

Hasta ahora el origen de las rocas que constituyen esta provincia han sido tema de controversia, sin embargo, hasta ahora la hipótesis mas aceptada indica que las rocas de esta provincia, incluidas en el complejo de Imataca, son de origen silíceo de composición calco-alcalina, con algunos episodios máficos y asociaciones menores de sedimentarias o formaciones de hierro ⁽⁶¹⁾.

Por otra parte, en la región cercana al cerro Bolívar se propone un protolito ígneo debido al estudio de la composición de los elementos mayoritarios y traza de los gneises graníticos presentes ⁽⁶¹⁾.

5.1.2.- Provincia de Pastora

La Provincia de Pastora, también conocida con el nombre de *Provincia Esequibo*, se encuentra definida inicialmente por la región de El Callao-Guasipati, delimitada al norte por la Provincia de Imataca y al sur por la Provincia Roraima. Adicionalmente, se halla separada en su parte oriental por la falla del Guri y en la parte occidental por la falla de Santa Bárbara ⁽⁶¹⁾.

Su litología se halla definida por una secuencia de rocas volcánicas ácidas y básicas y rocas sedimentarias asociadas, con presencia de diques intrusivos de gabros o diabasas, definidos a varios niveles. Las rocas presentan edades comprendidas entre los 2700-2000 m.a. y tienden a presentar evidencias de grandes eventos de metamorfismo de bajo grado, donde se alcanza la *facies de la anfibolita* ⁽⁶¹⁾.

5.2.- Geología Local

La zona de estudio se halla caracterizada por la presencia de depósitos de dolomita asociados a las rocas sedimentarias del complejo Imataca, mostrándose como afloramiento desde la región del Cerro Bolívar hasta las cercanías de Guacuripia, Región Upata, donde se alcanzan los mayores espesores, específicamente en las cercanías del Cerro Paja, donde se registran dimensiones de 85 metros aproximadamente ⁽²⁵⁾.

Posee una vegetación típica de selva y sabanas con diversidad de relieve, donde se muestran zonas altas y bajas ⁽²⁵⁾. Se caracteriza por poseer (2) dos sistemas hidrográficos superficiales principales mostrados a continuación:

- a) La quebrada Upata: fluye hacia el norte del río Caroní
- b) El río Yuruarí: fluye hacia el este al río Cuyuní, desembocando al esequibo y éste a su vez, en el océano atlántico ⁽²⁵⁾

Adicionalmente, la región cuenta con lagunas de gran tamaño ubicadas en las sabanas, donde son aprovechadas como bebederos para el ganado. Como ejemplo: la laguna Guacuripia ⁽²⁵⁾.

5.2.1.- Formación Guacuripia

La Formación Guacuripia se halla designada como la unidad de *mármol dolomítico*, expuesta a lo largo de 12 Km de distancia, en las colinas con rumbo este-oeste, las cuales incluyen Los Cerros Pando, Jiménez, Hacha, Lindero y Guacuripia, pertenecientes al estado Bolívar. Esta formación forma parte del *Complejo de Imataca* e incluye yacimientos y afloramientos distribuidos de forma paralela a las rocas de la Provincia, las cuales se hallan en contacto discordante superior con una secuencia de esquistos hornbléndicos, mientras que suprayacen discordantemente a una secuencia definida por un cuerpo gnéisico ⁽²⁵⁾.

La Formación está determinada por la presencia de un cuerpo rocoso mármol dolomítico de color, textura y composición uniformes mostrada a lo largo de toda la zona de afloramiento. Esta roca se halla altamente recristalizada y se encuentra caracterizada por presentar una coloración gris azulado claro a medio, con brillo perlino ⁽²⁵⁾.

Una de las hipótesis propuestas para la explicación a la recristalización completa de este cuerpo de roca, sostiene que el mármol dolomítico posiblemente haya sido expuesto, en principio, como un sedimento sujeto a eventos de moderado metamorfismo termal ⁽⁶²⁾, lo que ha originado en la roca una desaparición total de la composición primaria ⁽²⁵⁾. Estas rocas primarias fueron correlacionadas con las presentes en la Provincia Imataca debido a la inclusión que presentan estas rocas en la provincia, lo que permitió estimar una edad correspondiente al Precámbrico Inferior ⁽⁶²⁾.

En ámbitos petrográficos, el mármol dolomítico exhibe al microscopio una textura granoblástica gruesa bien definida, con cristales euhedrales y subhedrales de dolomita (mineral dominante) (85%) y calcita (en agregados gruesos) (10%). Los cristales tienden a presentar lamelas de maclación bien desarrolladas y una serie de minerales accesorios entre los cuales se pueden destacar los nombrados a continuación: Forsterita, flogopita, actinolita, tremolita y moscovita, además de los óxidos de hierro y manganeso producidos por los diversos procesos de meteorización ⁽⁶²⁾.

Por otra parte, los yacimientos y afloramientos ubicados en el cerro Guacuripia resultan ser ricos en manganeso y se encuentran distribuidos en una zona angosta de aproximadamente 20 Km de longitud y 500 m de anchura ⁽²⁵⁾.

6.- METODOLOGÍA

Las actividades mostradas a continuación fueron llevadas a cabo en las regiones Guacuripia-El Palmar, estado Bolívar, señaladas en la figura 4.

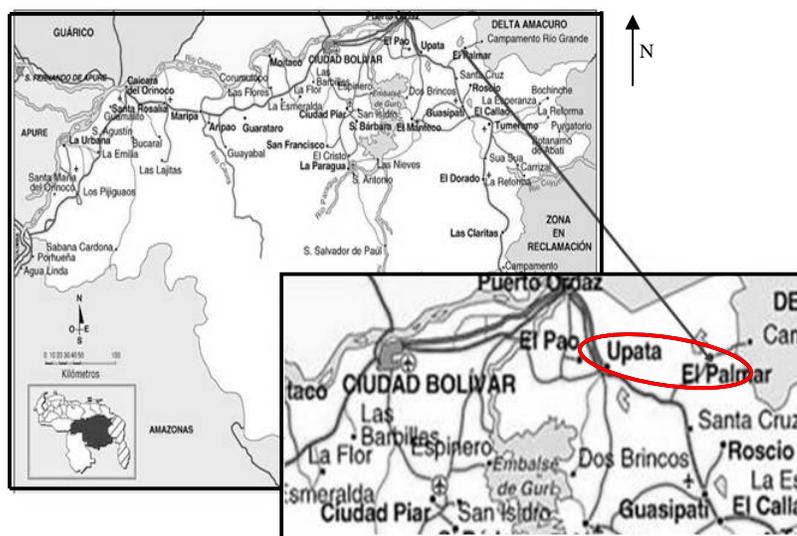


Figura 4: Ubicación geográfica de la zona de muestreo.

6.1.- Actividad pre-campo

El trabajo de pre-campo consistió en la recopilación de datos descriptivos de la zona de estudio y preparación del material a emplear en la toma de muestras.

Para la recolección de las muestras de agua destinadas a la determinación de los elementos mayoritarios y traza se utilizaron envases plásticos de polietileno con capacidad de 250 mL, los cuales fueron lavados previamente en el laboratorio con HNO_3 bidestilado, durante (24) veinticuatro horas. Luego de esto, se aplicó un lavado con abundante agua destilada (por lo menos tres veces) y (1) una vez con agua desionizada.

Para la toma de muestras destinadas a la determinación de aniones, se reservaron envases de plásticos de polietileno con capacidad de 250 mL, los cuales no fueron tratados según el procedimiento antes descrito.

Es importante señalar que en ambos casos (determinación de cationes y aniones) los envases fueron etiquetados indicando localidad y número de muestra.

6.2.- Actividad de campo

Esta fase se llevó a cabo en un lapso de (4) cuatro días, entre el 29 de mayo y el 1 de junio del presente año, 2011. Consistió en el traslado hacia la zona de estudio para la captación de las muestras y la medida de parámetros fisicoquímicos (*pH*, *conductividad* y *temperatura*) de (19) diecinueve muestras de agua distribuidas de la siguiente forma: (2) dos muestras de agua superficial y (17) diecisiete muestras de agua subterránea, correspondientes a pozos y aljibes. La distribución de los puntos de muestreo en la zona de estudio se muestra en la figura 5, y la ubicación geográfica y parámetros fisicoquímicos son presentados en el apéndice A, en la tabla A.

Previo a la toma de muestras, se procedió a dejar abierta la llave de salida de agua por un tiempo aproximado de (3) tres a (5) cinco minutos, con el fin de poder desalojar agua residual estancada presente en las tuberías.

En algunos casos la toma de muestras se realizó por medio de una extracción manual y en otros, por sistema de bombeo. En cada estación, una porción de agua fue captada en un beacker plástico de 250 mL de capacidad, para la determinación de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura. Dicha determinación fue llevada a cabo con un pH-metro marca Orión modelo 250 A, provisto de un electrodo de vidrio calibrado cada (3) tres estaciones, con soluciones amortiguadoras de pH 4 -7 y 10.

Las muestras destinadas a la determinación de cationes fueron filtradas con una pistola de succión, a través de una membrana con un tamaño de poro de 0,45 μm con una jeringa de 25 mL de capacidad, para luego ser acidificadas con 2 mL de ácido nítrico bidestilado. Las muestras destinadas al análisis de aniones fueron captadas directamente, sin realizar el proceso descrito para las muestras de cationes antes mencionado. Luego de la recolección de las aguas, las mismas se preservaron en una cava a una temperatura aproximada de 5° centígrados, donde las muestras fueron transportadas hasta el laboratorio para realizar los análisis respectivos.

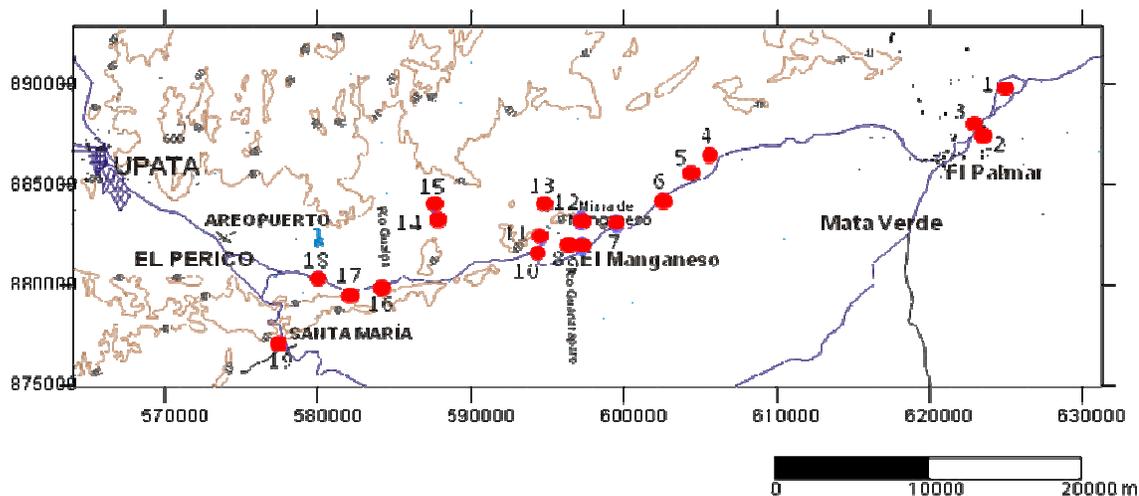


Figura 5: Distribución de los puntos de muestreo en el área de estudio.

LEYENDA

- | | | | |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|------------------|
| 1.- San José | 6.- Las Moreas | 11.- La Esperanza | 16.- Gualpa |
| 2.- Juan de Dios (escuela) | 7.- La Reforma | 12.- El Manguito | 17.- Don Enrique |
| 3.- Juan de Dios | 8.- Santa Teresita | 13.- Guaranaparo | 18.- Dr. Eduardo |
| 4.- El Santuario | 9.- Santa Teresita Aljibe | 14.- El Edén Aljibe | 19.- Santa María |
| 5.- El Chaparral | 10.- El Manganeso | 15.- El Edén | |

6.3.- Actividad de Laboratorio

A continuación se plantea el esquema de trabajo experimental realizado.

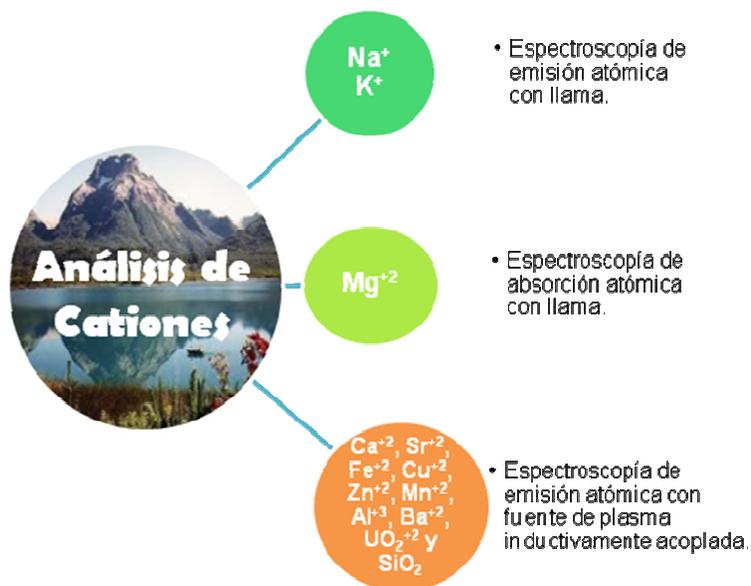


Figura 6: Esquema de trabajo experimental seguido en la determinación de cationes.

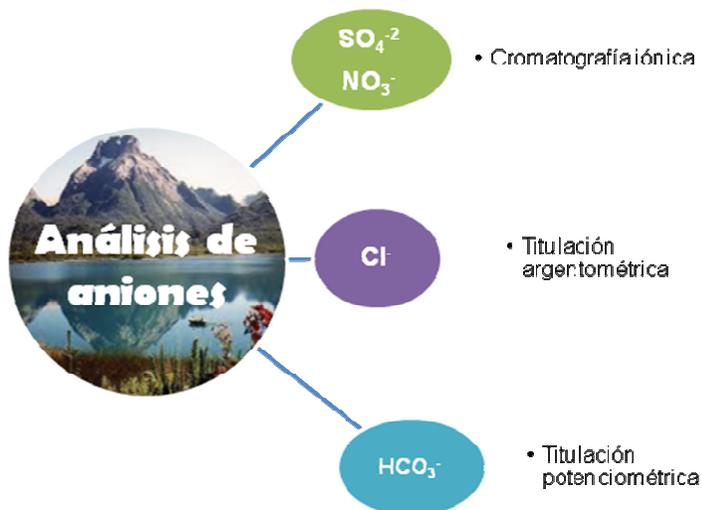


Figura 7: Esquema de trabajo experimental seguido en la determinación de aniones.

6.3.1.- Cationes mayoritarios, minoritarios y traza

La determinación de los cationes mayoritarios Na^+ y K^+ se llevó a cabo por medio de la técnica analítica espectrofotometría de emisión atómica en llama; mientras que para el análisis del magnesio fue utilizada la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en llama. Para ello, se utilizó un equipo Perkin Elmer modelo AAnalyst200, presentado en la imagen 4. Las concentraciones obtenidas se exponen en la tabla F del apéndice E y las condiciones se presentan en el apéndice B en la tabla B.



Imagen 4: Espectrofotómetro de absorción y emisión atómica con llama Perkin Elmer AAnalyst200.

Las especies químicas Ca^{+2} , Fe^{+2} , Mn^{+2} , Ba^{+2} , Sr^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} , Al^{+3} , UO_2^{+2} y SiO_2 fueron determinadas por medio de la técnica analítica espectrofotometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado, en un equipo marca Jobin Yvon. Las condiciones experimentales utilizadas para el análisis se hallan presentadas en la tabla D y E del apéndice B y las concentraciones expuestas en el apéndice E.

Se prepararon patrones multielementales a partir de soluciones de 1000 mg/L contenidos en ampollas Tritisol marca Merck. Las curvas de calibración se construyeron con patrones de concentraciones comprendidas entre 0-10 ppm, a excepción del calcio, curva de calibración que fue construida con patrones de concentraciones entre 30-200 mg/L.

6.3.2.- Bicarbonato

El análisis del ión bicarbonato se realizó por medio de una titulación potenciométrica de 25 mL de muestra, con una solución de H_2SO_4 0,0193 N previamente valorado, empleando un pHmetro marca Orión modelo 250 A y una bureta digital de 50 mL de capacidad, marca Jencons. El método utilizado es presentado en el apéndice C, mientras que en la tabla G del apéndice E se exponen los valores de concentración obtenidos.

6.3.3.- Cloruros

La determinación de los iones cloruro (Cl^-) se llevó a cabo mediante el método argentométrico usando K_2CrO_4 como indicador. Para el análisis se requirió una bureta de 25 mL donde fue colocada una solución de AgNO_3 0,023 N (titulante), previamente valorado, y fioles de 250 mL donde fueron colocadas las respectivas alícuotas de 5 mL de muestra. El punto de equivalencia fue observado por la formación de un precipitado color rojo ladrillo. Los cálculos respectivos son mostrados en el apéndice D y las concentraciones obtenidas son presentadas en la tabla G del apéndice E.

6.3.4.- Sulfato y Nitrato

La determinación de los aniones SO_4^{2-} y NO_3^- fue llevada a cabo por medio de la técnica analítica cromatografía iónica, donde fue empleado un equipo marca Dionex modelo DX-100. Las condiciones experimentales son presentadas en el apéndice B, en la tabla C.

A partir de las sales Na_2SO_4 (seco) y NaNO_3 se procedió a preparar una solución madre de 100 mg/L, a partir de la cual realizó la construcción de los patrones correspondientes para la elaboración de las curvas de calibración, las cuales son mostradas en el apéndice F.

7.- Presentación y discusión de resultados

En la siguiente sección se presentan y discuten los resultados obtenidos en las (19) diecinueve muestras de agua subterránea captadas en la zona de estudio, así como también se muestran los métodos de validación, clasificación e interpretación de los mismos.

La sección se distribuye de la siguiente forma:

- 7.1) Precisión, límite de detección y coeficiente de variación (CV)
- 7.2) Métodos de validación de resultados
- 7.3) Caracterización química
- 7.4) Caracterización hidrogeoquímica

7.1.- Precisión, límite de detección y coeficiente de variación (CV)

En la tabla 14 son presentados los parámetros estadísticos obtenidos a partir de la determinación de las especies químicas y datos fisicoquímicos para (3) tres réplicas de las muestras N° 6, 10 y 12 (“las Moreas”, “El Manganeseo” y “El Manguito”, respectivamente). Estos datos permiten conocer la precisión de los métodos analíticos empleados, aportando confiabilidad a las técnicas empleadas para la toma de medidas en campo y los datos químicos obtenidos.

Los datos estadísticos fueron calculados por medio de las ecuaciones presentadas en la tabla el apéndice G.

Tabla 14: Parámetros estadísticos obtenidos para (3) tres réplicas de las muestras N° 6, 10 y 12 (Las Moreas, El Manganeso y El Manguito, respectivamente).

Muestra	Parámetro	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	PROM.	S	CV	CV%	LD
M12	K	7,42	7,65	7,60	7,6	0,1	0,016	1,60	0,20
M12	Na	368,80	360,00	-	364	6	0,017	1,71	0,22
M12	Mg	518,27	522,40	522,40	521	2	0,005	0,46	0,30
M12	Al	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-	41,26
M12	Ba	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-	91,46
M12	Cu	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-	8,63
M12	Fe	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-	368,16
M12	Mn	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-	602,12
M12	Zn	<LD	<LD	<LD	-	-	-	-	244,87
M12	Sr	136,81	138,29	134,11	136	2	0,016	1,55	11,46
M12	Si	25,98	25,90	25,57	25,8	0,2	0,008	0,84	2,19
M12	Ca	190,41	196,25	194,70	194	3	0,016	1,56	1,42
M12	U	26,63	29,51	29,98	29	2	0,063	6,32	17,42
M6	Cl ⁻	8,10	8,00	8,00	8,03	0,06	0,007	0,72	-
M10	SO ₄ ⁻²	79,32	79,49	79,32	79,38	0,09	0,001	0,12	0,91
M10	NO ₃ ⁻	10,23	10,12	10,12	10,15	0,06	0,006	0,63	3,70
M12	Temp. °C	27,7	27,8	-	27,75	0,07	0,003	0,25	-
M12	Cond. (mS/cm)	5,6	5,4	-	5,5	0,1	0,026	2,57	-
M12	pH	7,16	7,07	-	7,12	0,06	0,009	0,89	-

X = Promedio

S= Desviación Estándar

CV = Coeficiente de variación

CV% = Coeficiente de variación porcentual

LD = Límite de detección

7.2.- Validación de Resultados

La validación de los datos obtenidos fue llevada a cabo de (2) dos formas: el cálculo del balance iónico y el cálculo de la conductividad teórica.

7.2.1.- Balance iónico

El balance iónico es una aplicación del principio de la conservación de la masa, aplicada a una región definida por determinadas condiciones de contorno. ⁽⁵³⁾

Su validez ha sido causa de un sin número de debates y polémicas, sin embargo, siempre resulta ser una herramienta útil para situar el orden de magnitud e importancia relativa de los diferentes términos.

Según Hem (1970) ^(s) valores iguales o menores al 10% son considerados datos confiables, desde un punto de vista geoquímico ⁽⁵³⁾. La ecuación empleada para la determinación del balance iónico para cada muestra y los resultados obtenidos son presentados en el apéndice H.



Figura 8: Representación gráfica del error porcentual del balance iónico.

En la figura 8 se presenta la distribución de error % del balance iónico para cada una de las muestras captadas en la zona de estudio. Puede observarse que de las (19) diecinueve muestras analizadas (6) seis de ellas presentan un balance iónico cuyo promedio excede el 10%, con valores que oscilan entre 13% y 17%. Este es el caso de las muestras 1-3-9-10-13 y 17, cuyos valores del balance iónico porcentual son 16%-15%-14%-14%-15% y 17%, respectivamente.

Morantes (1997) ⁽⁶⁰⁾ sugiere que un error mayor al 10% podría deberse a la presencia de especies orgánicas u otros iones no determinados que pudiesen estar en cantidades considerables y estar afectando el balance iónico. Basados en esta propuesta, se presenta uno de los casos donde el error porcentual del balance iónico excede el 10%.

Para la muestra 9 (“Santa Teresita Aljibe”), se obtuvo un error porcentual en el balance iónico de +14%. Esto podría estar sugiriendo un excedente de las especies catiónicas o una deficiencia obtenida en los resultados de las especies aniónicas. Este último planteamiento se puede apoyar en uno de los resultados obtenidos para la determinación de los iones sulfato y nitrato por la técnica de cromatografía iónica, mostrado en la figura 9, presentada a continuación.

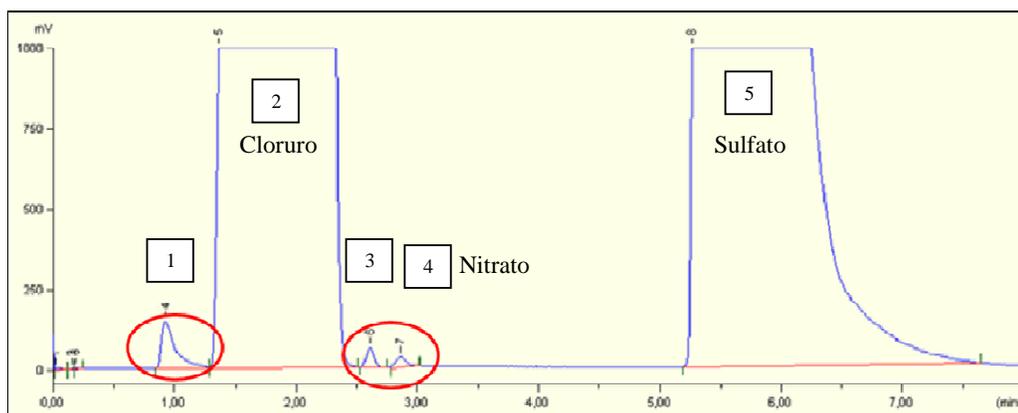


Figura 9: Cromatograma obtenido para la muestra N° 9 (Santa Teresita Aljibe) en la determinación de los iones sulfato y nitrato.

El pico característico del ión cloruro inicia su elución en un tiempo aproximado de 1,5 minutos, terminando de ser eluído en un tiempo aproximado de 2 min. Por su parte, el ión sulfato inicia su cromatograma a un tiempo de retención de aproximadamente 6 minutos, terminando de ser eluído en aproximadamente 6,5 min.

En esta corrida se pueden observar (5) cinco picos de los cuales dos (el 2 y el 5, correspondientes a los iones cloruro y sulfato, respectivamente) presentan concentraciones elevadas, saturando la señal. Esta saturación pudiese estar solapando al pico de la especie PO_4^{-3} , haciéndola no visible o detectable para su análisis. Por otra parte, los otros tres picos son representativos de los iones F^- , NO_2^- y NO_3^- , dos de los cuales no fueron determinados en esta investigación (NO_2^- y F^-). Esto, junto con la falta de información acerca de la influencia de la materia orgánica posiblemente presente en la zona de muestreo, pudiesen ser los factores que estén influyendo directamente sobre los datos obtenidos en el balance iónico.

Por otra parte, se procede a construir la gráfica de la relación entre la concentración de los cationes en contra de los aniones (ambas en mmol/L), donde se obtuvo un valor en la pendiente de (1.18 ± 0.04) , lo que indica que la tendencia general de la concentración de los cationes se halla por encima de la concentración presentada por las especies aniónicas determinadas, factor que se corrobora en los cálculos del balance iónico antes descrito.

En la misma línea de ideas, se logra observar una buena relación lineal dada por un $R^2 = 0.971$, lo que permite la discusión de los resultados con un amplio criterio de confiabilidad. La gráfica se presenta en la figura 10.

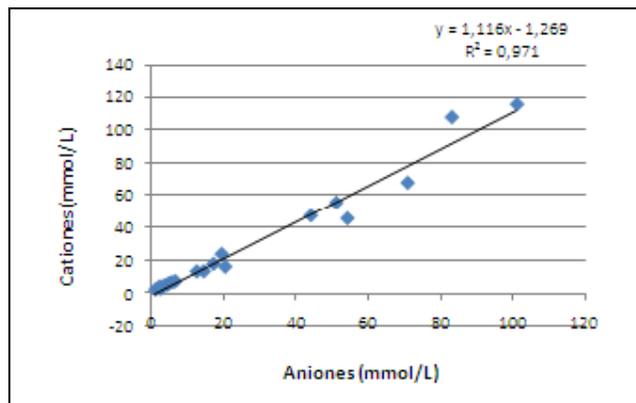


Figura 10: Relación dada entre la sumatoria de las especies catiónicas y aniónicas.

7.2.2.- Conductividad teórica

La conductividad eléctrica es una forma aproximada de medir la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) presentes en un cuerpo de agua ⁽⁶⁾. Presenta dependencia directa con la temperatura de la masa de agua, siendo utilizado como valor estandar 25°C. Se halla expresada en Ohmios/cm (Ω/cm), sin embargo suele expresarse en función de unidades decimales (d,m, μ , entre otros) debido a que el agua natural presenta valores de conductividad menores a un (Ω/cm). ⁽²⁰⁾

En la figura 11 se presenta la relación existente entre la conductividad obtenida en campo y la conductividad teórica para las (19) diecinueve muestras captadas en la zona de estudio y en la tabla J del apéndice H, son presentadas las concentraciones obtenidas.

En esta figura puede observarse que existe una buena relación lineal en todas las muestras, a excepción de la muestra N° 6 ("Las Moreas"), la cual presenta un valor en la relación Conductividad teórica/conductividad en campo menor a la unidad (0,8884), lo que pudiese estar sugiriendo que la conductividad en campo es mayor que la conductividad teórica.

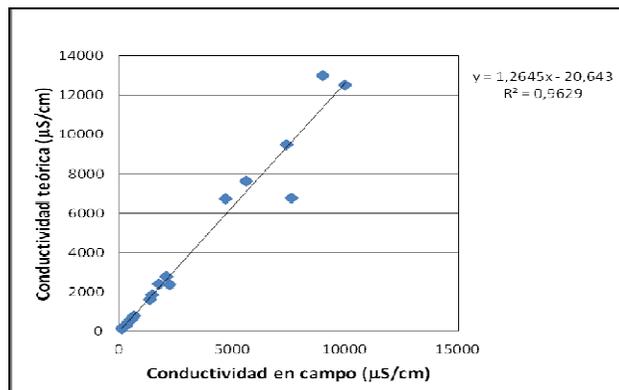


Figura 11: Relación entre la conductividad teórica y la conductividad obtenida en campo.

En el mismo orden de ideas, se puede observar que la gráfica presenta un valor de pendiente de $(1,26 \pm 0,06)$ indicando que el valor de la conductividad en campo se halla, en general, por debajo del obtenido para la conductividad teórica. Adicionalmente, se puede observar una buena relación lineal dada por un valor de $R^2=0,9629$, lo que, en conjunto con el análisis del balance iónico obtenido y la relación lineal obtenida para cationes contra aniones, brinda a los resultados un alto nivel de confianza.

La diferencia entre las conductividades, teórica y de campo, puede estarse debiendo a la capacidad de respuesta presentada por el electrodo ante la medición de la propiedad en muestras de elevadas conductividades, además de la interferencia que posiblemente pudo causar la presencia de materia orgánica no analizada, en el momento de la medida ⁽⁶³⁾. Sin embargo, en general, los resultados obtenidos para la validación de los datos, con cada método analítico empleado en el laboratorio, resultaron bastante precisos, por lo que los mismos son de total confiabilidad para la realizar la interpretación objetivo de este proyecto.

7.3.- Caracterización química

Esta sección es destinada a la caracterización química de las muestras de agua subterránea captadas en la zona noreste del estado Bolívar, por medio del estudio de la distribución espacial de las concentraciones de las especies químicas y parámetros fisicoquímicos, dispersión de los datos y localización de valores anómalos. Para ello, se emplearon las cajas gráficas como una herramienta que facilita la representación y comparación de los datos obtenidos, utilizando como tendencia central el valor de la mediana y no el promedio, debido a la posible asimetría que puedan presentar los resultados ⁽⁵³⁾.

Adicionalmente, fueron construidos mapas de distribución espacial para cada uno de los parámetros de estudio (químicos y fisicoquímicos), con la finalidad de facilitar la observación de la distribución y abundancia de dichos parámetros en la zona de estudio ⁽⁵³⁾⁽⁵⁷⁾.

La variación existente entre los datos obtenidos para los parámetros químicos y fisicoquímicos a lo largo del área de estudio, fue determinada mediante la obtención de los coeficientes de variación. Yanes (1997) ⁽⁶⁴⁾ establece como criterio de comparación una escala arbitraria, la cual se presenta en la tabla 15 mostrada.

Según esta escala arbitraria, el orden de variabilidad hallado para los parámetros químicos y fisicoquímicos determinados, resultó ser el siguiente: $\text{Na}^+ > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Cond.} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{+2} > \text{NO}_3^- > \text{SiO}_2 > \text{pH} > \text{Temp}$. Este orden obedece al control que ejercen las solubilidades relativas de los minerales mayoritarios, así como a procesos secundarios de posible meteorización de depósitos minerales, contaminación y procesos de evapotranspiración. ⁽⁵⁷⁾

Tabla 15: Escala arbitraria de comparación de variabilidades en las muestras, según el valor obtenido para el coeficiente de variación porcentual (CV%).

Intervalo de variabilidad (%CV)	Interpretación
$\%CV < 19\%$	No presenta variación
$20\% < \%CV < 39\%$	Varía poco
$40\% < \%CV < 69\%$	Presenta una variación moderada
$70\% < \%CV < 89\%$	Varía
$90\% < \%CV$	Altamente variable

Por su parte, los datos estadísticos determinados para las especies químicas y los parámetros fisicoquímicos bajo estudio en el área, son presentados en la tabla 16. Los mismos fueron obtenidos empleando las fórmulas planteadas en el apéndice G.

Tabla 16: Datos estadísticos determinados para los parámetros químicos y fisicoquímicos de estudio. (Conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$; pH en unidades de pH; especies químicas mayoritarias en mg/L ; elementos minoritarios y traza en $\mu\text{g}/\text{L}$).

Parámetro	X	S	CV	CV%
Cond.	2965	3317	1,12	112
pH	6,6	0,8	0,12	12
Temp	28	2	0,08	8
Al^{+3}	104	404	3,87	387
Ba^{+2}	32	38	1,19	119
Fe^{+2}	15	66	4,36	436
Mn^{+2}	46	103	2,24	224
Sr^{+2}	341	392	1,15	115
SiO_2	55	15	0,26	26
UO_2	33	73	2,18	218
K^+	12	14	1,20	120
Na^+	336	516	1,53	153
Mg^{+2}	173	195	1,13	113
Ca^{+2}	93	95	1,02	102
HCO_3^-	360	270	0,75	75
Cl^-	680	849	1,25	125
SO_4^{-2}	190	273	1,44	144
NO_3^-	13	11	0,84	84

X = Promedio

S = Desviación estándar

CV = Coeficiente de variación

CV%= Coeficiente de variación porcentual

Se presentan, a continuación, los resultados y discusiones de los datos obtenidos para los parámetros químicos y fisicoquímicos determinados en las (19) diecinueve muestras captadas en la zona de estudio.

7.3.1.- Conductividad y pH

Los valores obtenidos para los parámetros pH y conductividad son presentados en la tabla A del apéndice A y las cajas gráficas resultantes para ambos parámetros son presentadas en las figuras 12 y 13 y discutidas a continuación.

Para las conductividades medidas en campo se construyó la caja gráfica, obteniéndose una mediana de 1489 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un valor de fondo comprendido entre 396 y 5600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y valores mínimo y máximo de 104 y 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Los datos se caracterizan por presentar alta variabilidad de acuerdo a la escala arbitraria propuesta por Yanes ⁽⁶⁴⁾ ($\%CV > 90$), lo que posiblemente se debe a la tasa de aporte de especies iónicas debido a la influencia de procesos como precipitación, evaporación, meteorización y actividades antrópicas, entre otras. ⁽⁶⁴⁾

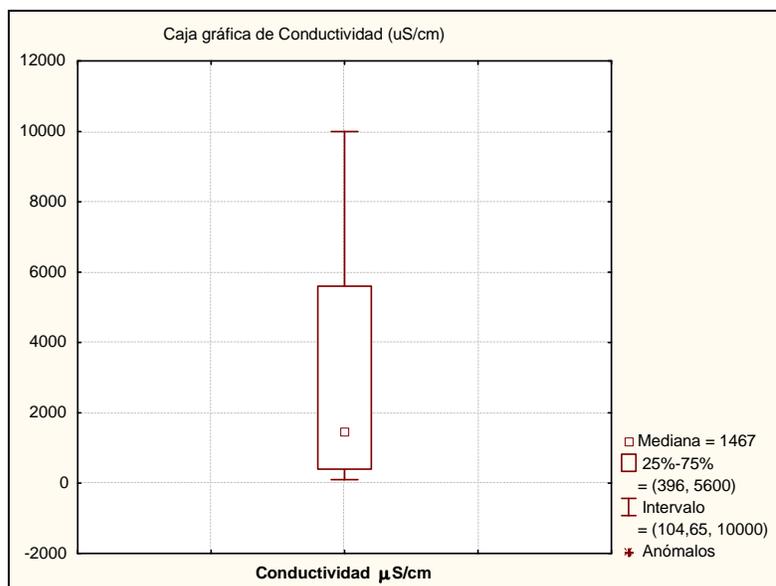


Figura 12: Caja gráfica de la conductividad medida en campo ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

En la caja gráfica obtenida para el pH se observa una mediana de 6,51 unidades de pH, un valor de fondo comprendido entre 6,13 y 7,13 unidades, así como valores mínimo y máximo de 5,35 y 7,84 unidades, respectivamente. Los datos obtenidos no presentan variabilidad significativa de acuerdo a la escala arbitraria propuesta por Yanes (1997) ⁽⁶⁴⁾ (%CV < 19) y no es observable ningún dato con carácter anómalo.

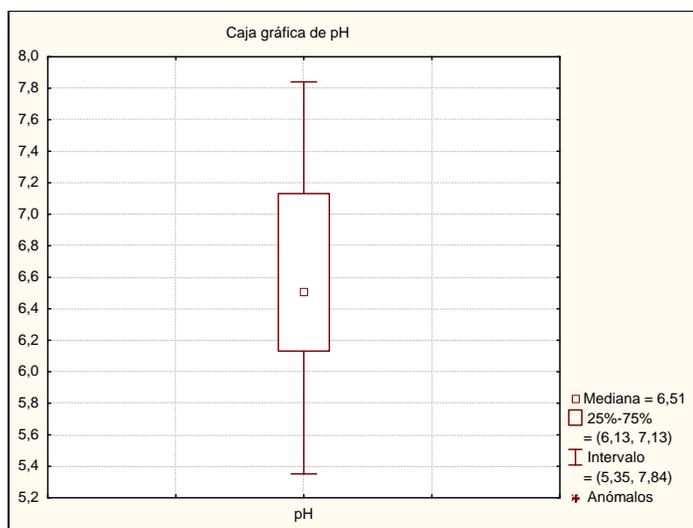


Figura 13: Caja gráfica del pH.

La distribución espacial de la conductividad medida en campo presenta una relación con la concentración de los sólidos disueltos totales (SDT), mostrando un comportamiento gaussiano en el área, donde la zona central presenta los mayores valores en conjunto con los pozos “Juan de Dios Escuela” y “Dr.Eduardo”, ubicados a los extremos de la zona de estudio.

Los valores de pH resultan uniformes a lo largo del área de estudio, observando el mayor valor en el pozo El Manganeso, ubicado en el sector El Manganeso; mientras el menor valor es asociado al pozo “San José”, ubicado en el sector el Palmar. El mayor valor presenta una relación directa con la disolución de especies minerales debido a la interacción agua roca; mientras que el menor valor debe su valor de pH al aporte atmosférico.

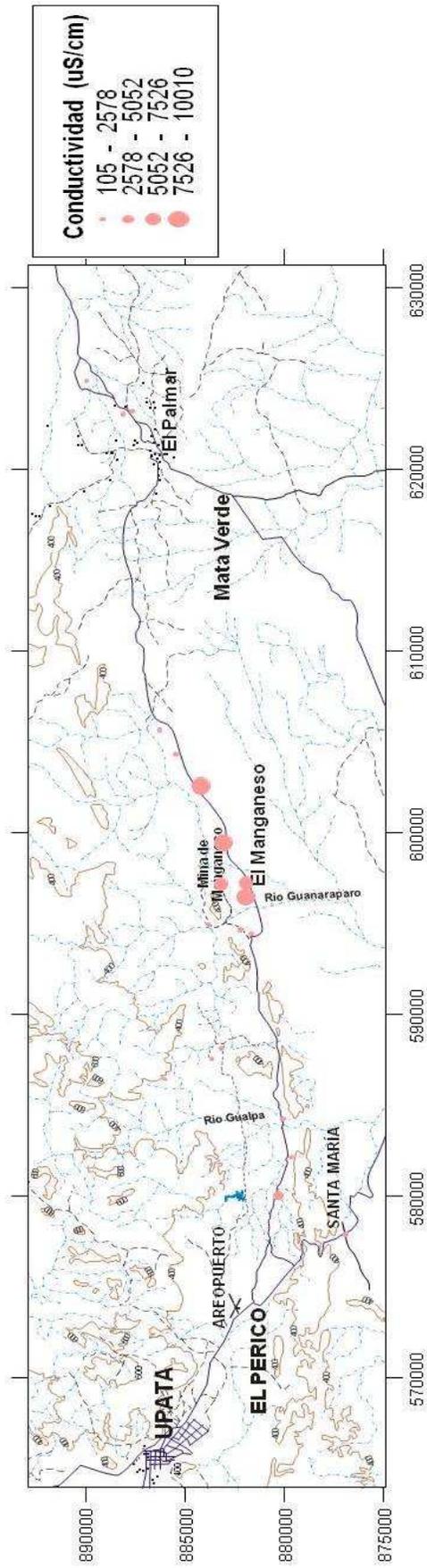


Figura 14. Distribución espacial de la Conductividad (uS/cm).

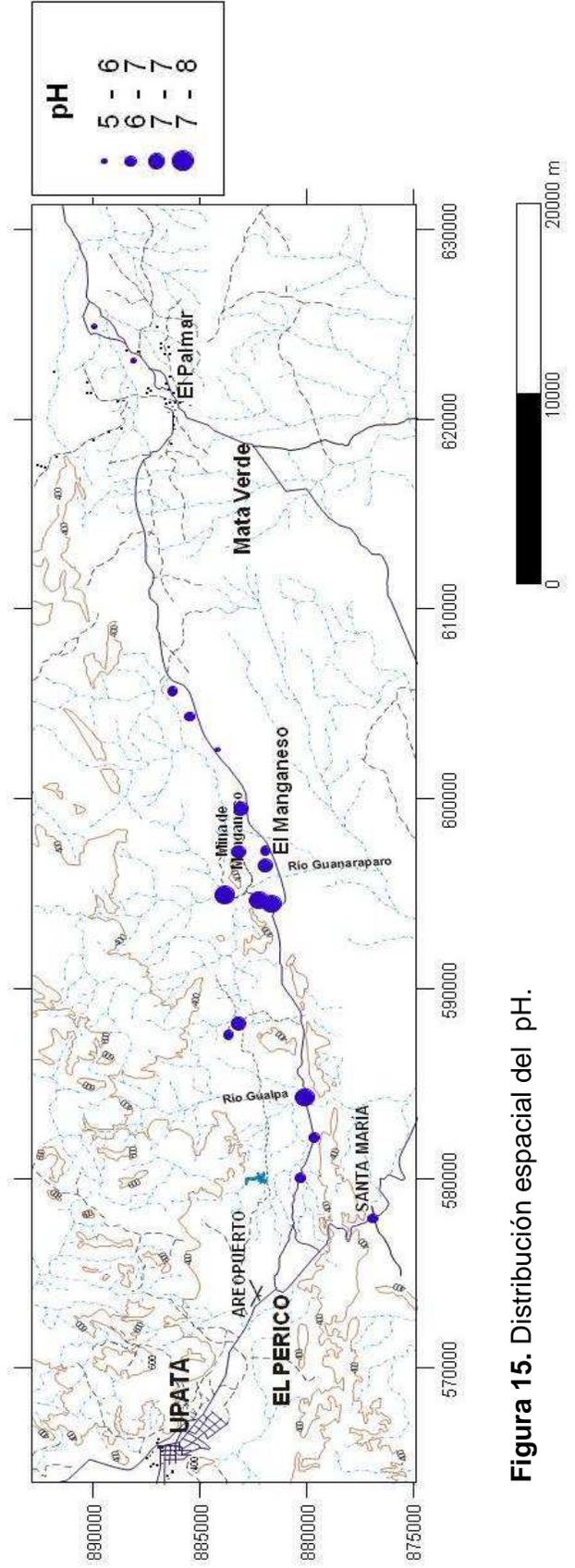


Figura 15. Distribución espacial del pH.

7.3.2.- Sólidos Disueltos Totales (SDT)

La determinación de los sólidos disueltos totales para cada una de las muestras se obtuvo mediante la sumatoria de las especies químicas analizadas (cationes mayoritarios, minoritarios, traza, aniones y SiO_2). Los datos obtenidos para cada una de las muestras se hallan presentados en la tabla A apéndice A.

En la figura 15 se presenta la caja gráfica obtenida, en la cual puede observarse un valor de concentración promedio de 1913,0 mg/L, con una mediana de 1100,3 mg/L, un valor de fondo comprendido entre 371,7 y 3350,0 mg/L y un valor mínimo y máximo en 145,4 mg/L y 7032,7 mg/L, respectivamente, sin presentar valores anómalos.

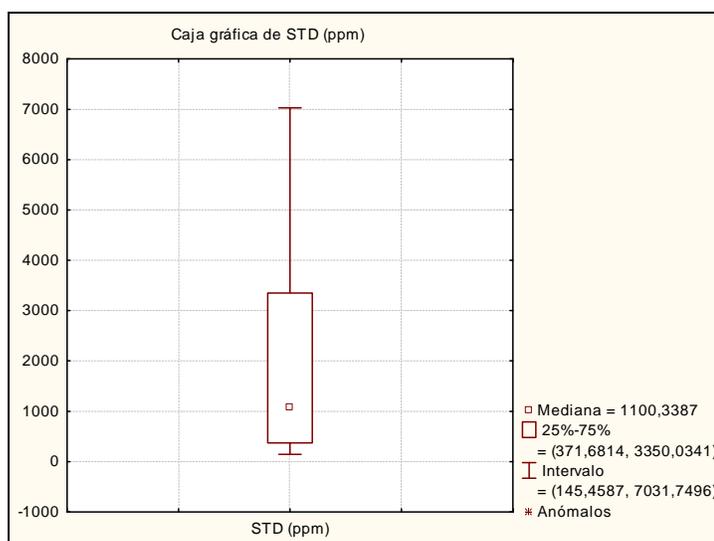


Figura 16: Caja gráfica de los Sólidos Disueltos Totales.

La distribución espacial es presentada en la figura 17, donde puede observarse una tendencia preferencial para la ubicación de los valores máximos, distribuyéndose alrededor de la mina de Manganeso, ubicada en el sector El Manganeso, en conjunto con los pozos “Juan de Dios Escuela” y “Dr. Eduardo” ubicados a los extremos del área de estudio.

Según la clasificación dada por Hem (1970) ⁽⁸⁾, las aguas de la zona de estudio pueden ser divididas de acuerdo a la concentración de sólidos disueltos totales en (2) dos grupos, los cuales son mostrados en la tabla 17.

Tabla 17: Clasificación de las aguas superficiales y subterráneas pertenecientes a la zona de estudio, según la cantidad de sólidos disueltos totales.

Grupo I	Grupos II
Aguas dulces	Aguas Salobres
San José	Juan de Dios Escuela
Juan de Dios	Las Moreas
El Santuario	La Reforma
El Chaparral	Santa Teresita
El Edén Aljibe	Santa Teresita Aljibe
El Edén	El Manganeso
Gualpa	La Esperanza
Don Enrique	El Manguito
Santa María	Guanaraparo
-	Dr. Eduardo

Esta clasificación resulta similar a la presentada por Nevado (1999) ⁽⁵⁷⁾, quien hace estudio de las aguas subterráneas en la zona norte del estado Bolívar. Adicionalmente, la autora sugiere que los valores obtenidos para los sólidos disueltos totales resultaron mucho mayores a los presentados por Yanes (1997) ⁽⁶⁴⁾ para los ríos de la región de estudio, lo que posiblemente se deba al mayor tiempo de residencia que presentan las aguas subterráneas, en comparación con las aguas superficiales. ⁽⁵⁷⁾

Drever ⁽⁶⁾ sugiere que la conductividad es una función de la cantidad de sólidos disueltos totales. En apoyo a esta idea, en la figura 18 se presenta la correlación existente entre ambos parámetros.

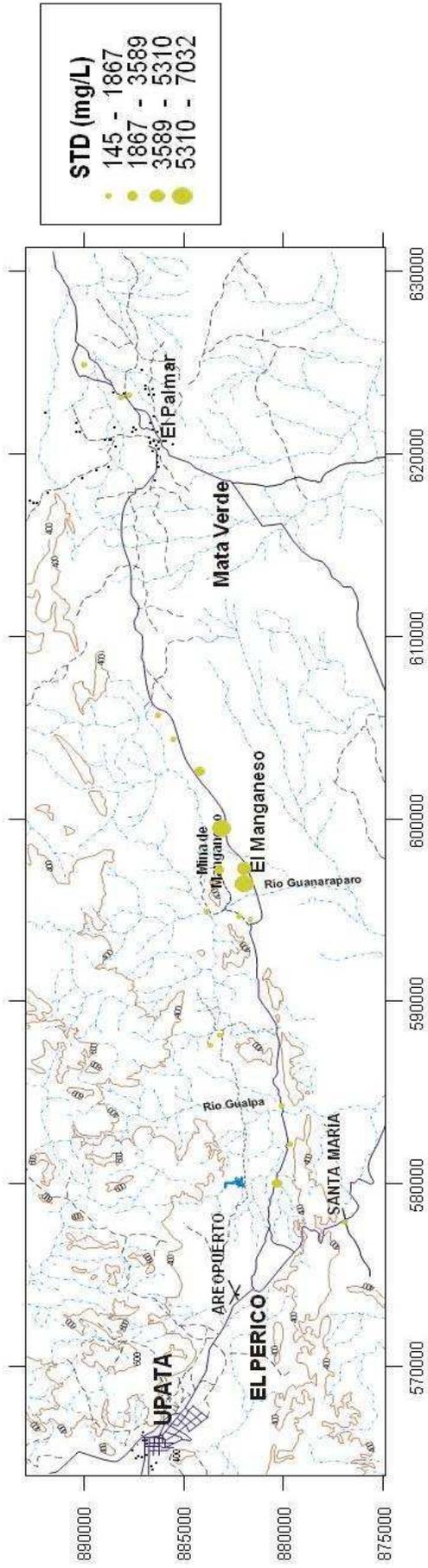


Figura 17. Distribución espacial de los sólidos disueltos totales (mg/L).

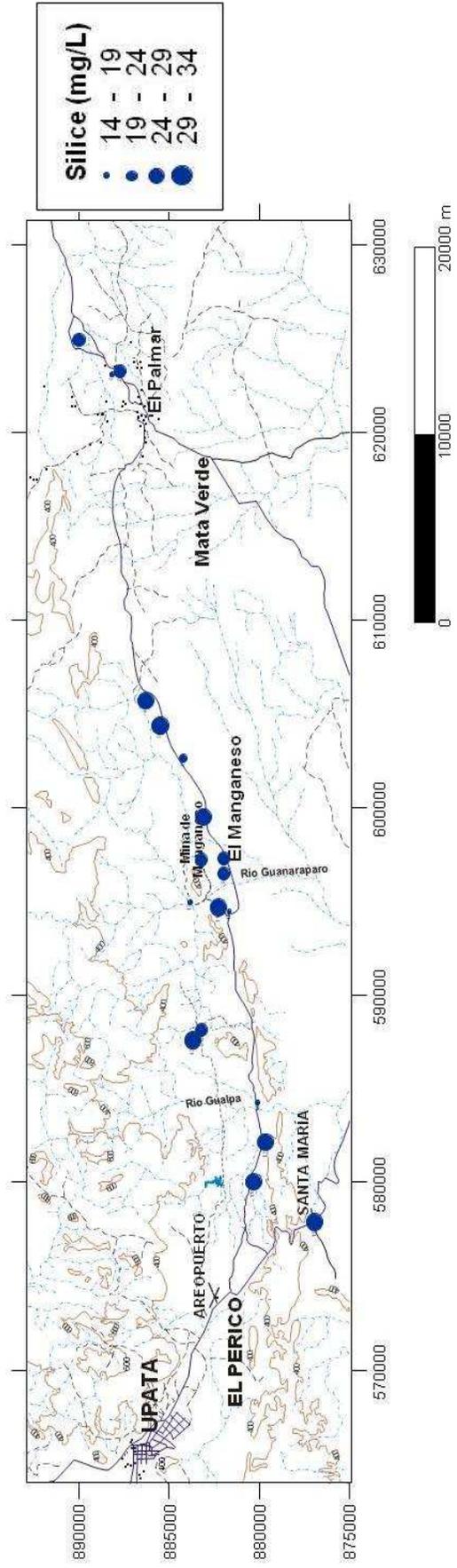


Figura 20. Distribución espacial de la sílice disuelta (mg/L).

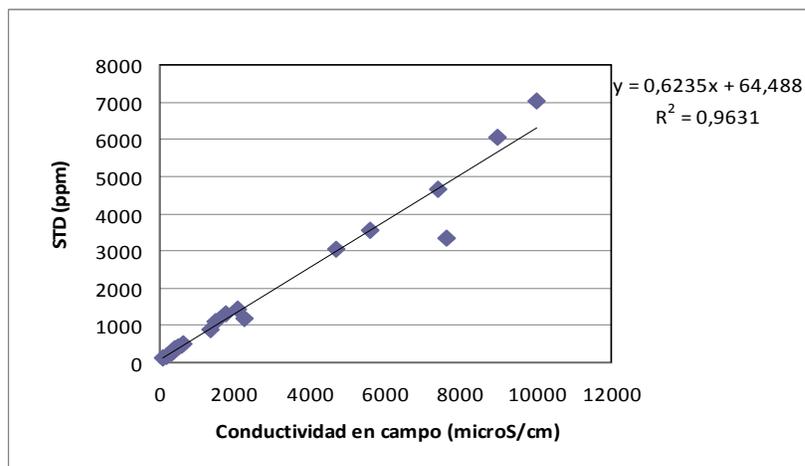


Figura 18: Relación entre la conductividad obtenida en campo ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y los sólidos totales disueltos (mg/L)

Yanes (1997) ⁽⁶⁴⁾ reporta un valor teórico para la relación entre la conductividad y los sólidos disueltos totales de $0,67 \text{ mg}^*\text{cm}/\mu\text{S}^*\text{L}$, sugiriendo la contribución de la disolución de especies ricas en calcio y potasio (calcita, anortita, albita, biotita) como principal factor responsable de la composición química de las aguas.

La figura 18 muestra un valor de la pendiente obtenida para esta relación de $(0,62 \pm 0,03) \text{ mg}^*\text{cm}/\mu\text{S}^*\text{L}$, valor bastante aproximado al propuesto por Yanes (1997), permitiendo sugerir que la composición química de las aguas se debe principalmente a procesos de disolución por la interacción prolongada agua-roca.

7.3.3.- Sílice disuelta (SiO_2)

Las concentraciones obtenidas para la sílice disuelta en la zona de estudio se presentan en la tabla E del apéndice E y se caracterizan por poseer poca variabilidad según la escala arbitraria ($20 < \%CV < 39$). Sus valores se comprenden entre 14 y 34 mg/L , con un valor promedio de 26 mg/L y mediana de 28 mg/L . El valor de fondo se encuentra establecido entre 22 y 32 mg/L y no es observado ningún dato anómalo para la zona de estudio.

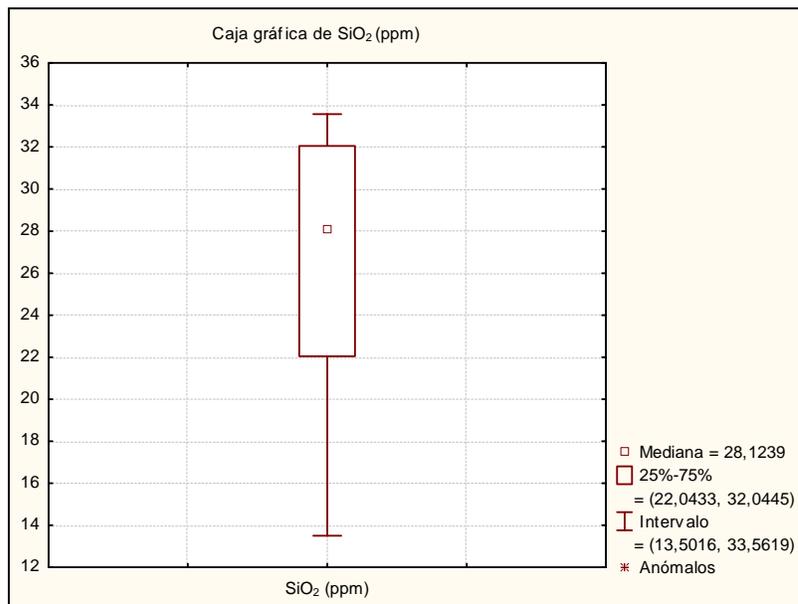


Figura 19: Caja gráfica de la sílice disuelta (mg/L)

El mapa de distribución espacial presentado en la figura 20 no presenta una tendencia preferencial, sin embargo es importante resaltar que los mayores valores se presentan en los pozos El Santuario y el Chaparral, mientras que el menor valor se presenta en el pozo Juan de Dios, ubicado en el sector el Palmar.

El origen de esta especie en solución es asociada principalmente a la alteración de minerales silicatados y aluminosilicatados, así como también a la disolución de especies más resistentes a los procesos de meteorización tal como es el caso del cuarzo.

Yanes (1997) ⁽⁶⁴⁾ señala que una relación entre la sílice disuelta (SiO₂) y la conductividad determinada en campo podría mostrar la principal fuente de aporte de esta especie y atribuirle o no al proceso de alteración de la litología circundante. En esta misma línea de ideas, se procedió a graficar ambas variables para lo cual resultó la figura 21.

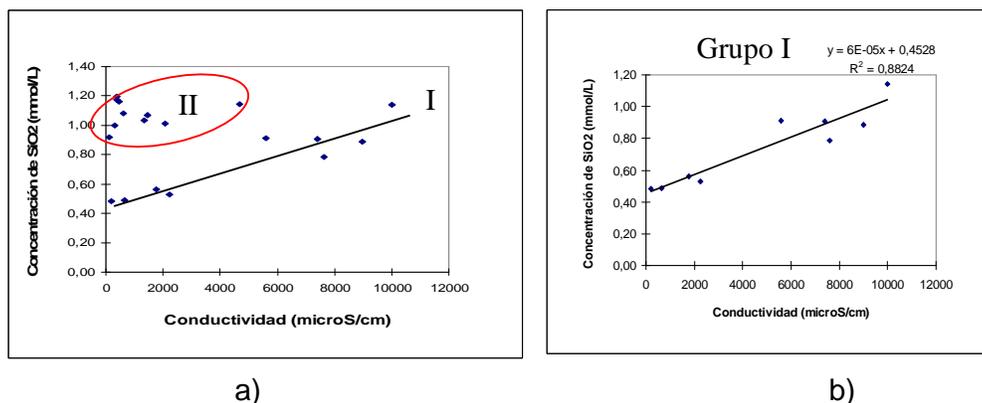


Figura 21: a) Relación entre la conductividad medida en campo ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y la cantidad de sílice disuelta (mmol/L). b) Relación lineal presentada para el grupo I resultante del gráfico a.

En el gráfico a se puede observar que para un 100% de las muestras analizadas, la relación entre ambas variables señala la presencia de dos grupos principales.

El grupo I presenta una tendencia lineal, descrita por un $R^2=0,8824$ y una pendiente (en mg/L) de 0,0017, indicando que la sílice disuelta (SiO_2) no es la única especie química contribuyente al valor de la conductividad medida en campo. Yanes (1997)⁽⁶⁴⁾ indica que de existir una dependencia entre ambos parámetros, puede sugerirse la acción del proceso de meteorización sobre cuerpos silicatados y aluminosilicatados, tal como es el caso.

Por su parte, el grupo II se caracteriza por presentar los mayores valores de sílice disuelta (SiO_2), asociados a conductividades de hasta $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$, a excepción de la muestra captada en el pozo Dr. Eduardo, la cual presenta un valor para la especie química en cuestión de $1,14 \text{ mmol}/\text{L}$, con un valor de conductividad de $4695 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Nevado (1999)⁽⁵⁷⁾ obtiene para esta relación dos grupos de datos, donde el primero se relaciona con concentraciones de sílice por debajo de los $20 \text{ mg}/\text{L}$, drenando en las Rocas Graníticas del Complejo Supamo, mientras el segundo grupo se caracteriza por presentar concentraciones entre 20 y $45 \text{ mg}/\text{L}$ y percolando en La Provincia de Imataca y el Cinturón de Rocas Verdes de la Provincia de Pastora.

7.3.4.- Sodio

El sodio se presenta como el elemento mayoritario en un total de 63% de las muestras captadas en la zona de estudio. Los datos obtenidos para las concentraciones presentan alta variabilidad ($\%CV > 90$), con valores establecidos entre 7 y 1825 mg/L, presentando una mediana de 88 mg/L, con un valor promedio de 336 mg/L y un valor de fondo comprendido entre 59 y 369 mg/L.

Esta variación de las concentraciones puede estar atribuida al control que ejercen las solubilidades relativas de las diferentes fuentes minerales, así como a procesos de alteración y meteorización, evapotranspiración, contaminación por actividades antrópicas, intercambio iónico y posible aporte atmosférico. ⁽²¹⁾

La caja gráfica del sodio, mostrada con la figura 22, presenta dos valores anómalos, con concentraciones ubicadas cinco veces por encima del valor promedio, los cuales corresponden al pozo “La Reforma” y aljibe “Santa Teresita”.

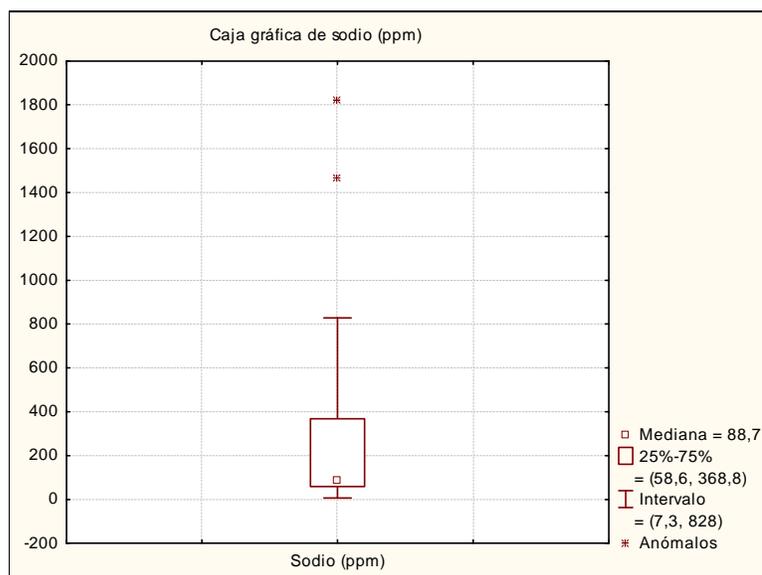


Figura 22: Caja gráfica del sodio.

La distribución espacial del sodio presenta una tendencia preferencial, donde se observa un enriquecimiento desde el sector El Palmar hasta el sector El Manganeso, distribuyendo así el menor y mayor valor, respectivamente. El mapa de distribución espacial para el elemento sodio es presentado en la figura 23. Adicionalmente, puede observarse que en el mismo sector (El Manganeso) se presentan dos tendencias: en la zona norte se encuentran concentraciones de sodio comprendidas entre 75 y 368 mg/L, mientras que en la zona sur las concentraciones van de 670 a 1825 mg/L, incluyendo los datos anómalos obtenidos.

La contribución del sodio al valor de la conductividad determinada en campo se presenta en la figura 24, mostrada a continuación, donde puede observarse buena relación lineal ($R^2 = 0,8502$). Nuevamente, la diferencia del valor del R^2 con la unidad evidencia la dependencia de la conductividad con otras especies iónicas las cuales serán discutidas mas adelante.

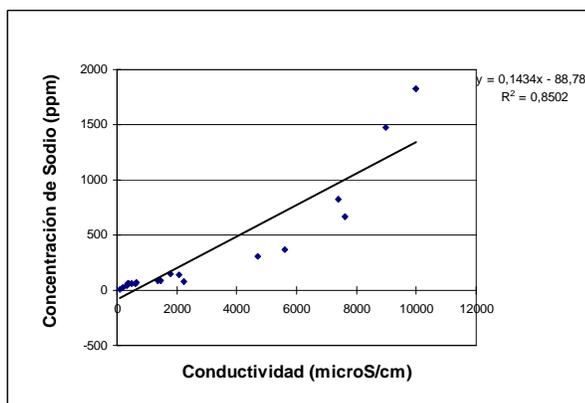


Figura 24: Relación de dependencia de la conductividad medida en campo ($\mu\text{S/cm}$) con la concentración de sodio (mg/L).

En relación a la litología presentada en la zona de estudio, se pudieron obtener muestras de material rocoso para las cercanías de la mina ubicada en el sector El Manganeso. Este material fue obtenido en la finca La Esperanza (pozo de agua n°11) y se presenta en la imagen 5 (a y b).

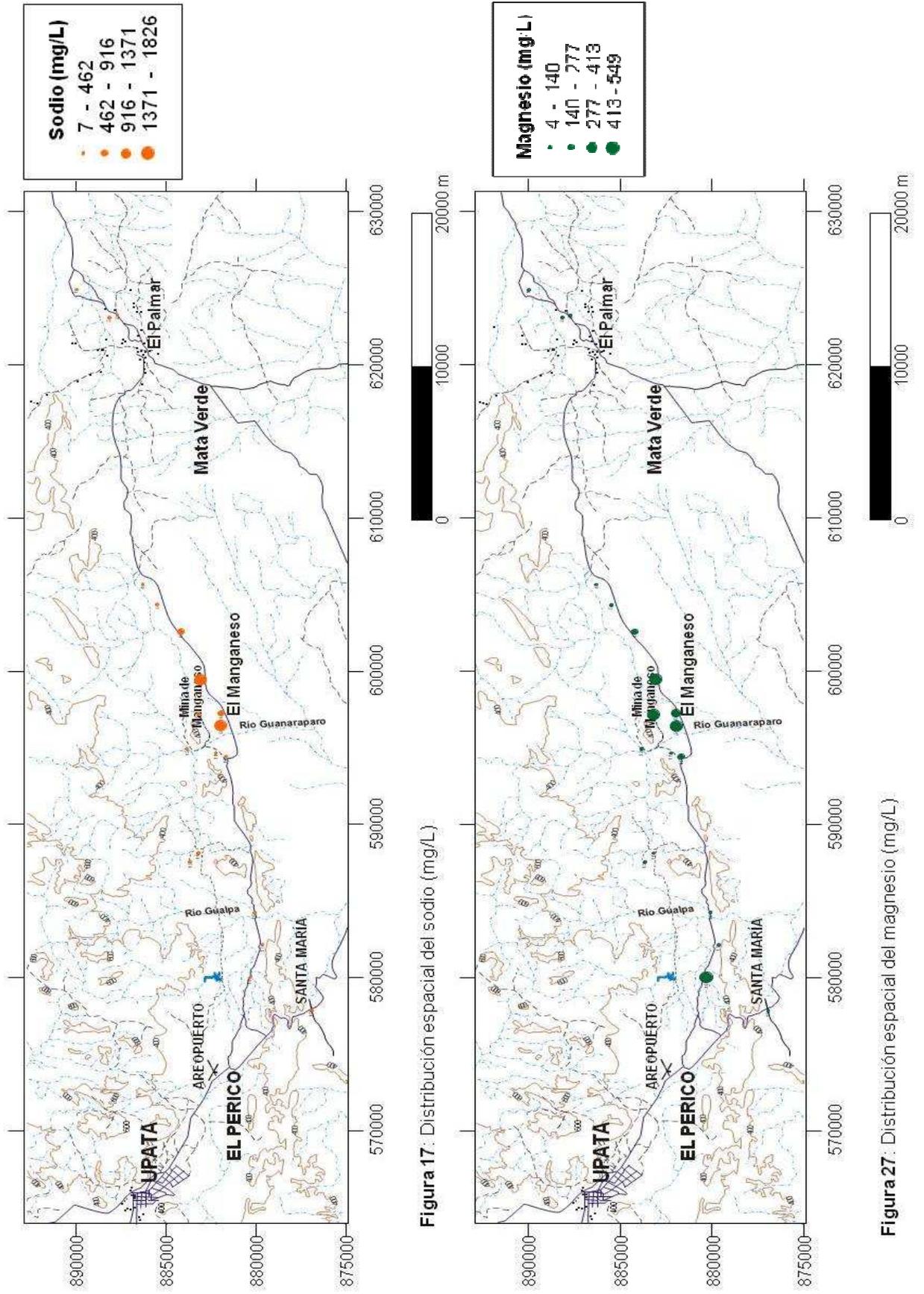


Figura 17: Distribución espacial del sodio (mg/L)

Figura 27: Distribución espacial del magnesio (mg/L)



Imagen 5: a) Cuarzita b) Cuarzita Ferruginosa

En función de la información litológica obtenida, se procedió a graficar la relación entre los iones sodio y bicarbonato, mostrada en la figura 25, en busca de identificar la ocurrencia de procesos de disolución de especies minerales.

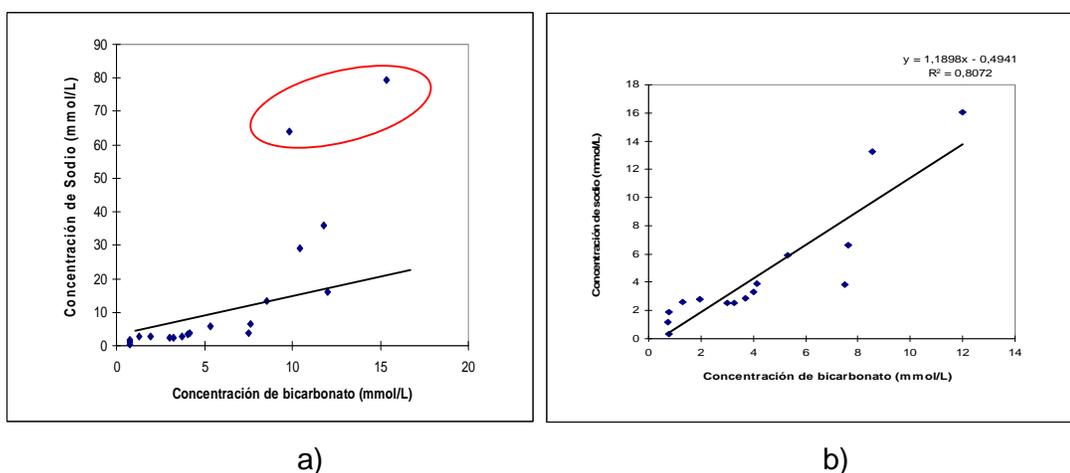


Figura 25: a) Relación entre la concentración de las especies bicarbonato y sodio, (mmol/L).
b) Relación lineal existente entre ambas especies (mmol/L) presentada para el 79% de las muestras.

En el gráfico puede observarse una relación lineal para un 79% de los datos obtenidos en las muestras captadas en la zona. La relación presenta un valor de $R^2=0,8072$, indicando buena dependencia y linealidad entre los datos. Para la totalidad de las muestras se observa poca linealidad, indicando la influencia de procesos como intercambio iónico y aporte meteórico, para el aporte de esta especie a las masas de agua.

En la misma línea de ideas, Faublack (2008) ⁽⁵³⁾ señala que al existir altas concentraciones de sodio en las aguas, la tendencia del calcio suele ser inversa en los casos donde el principal proceso que controla la presencia de las especies en solución es el intercambio iónico.

7.3.5.- Magnesio

El magnesio se presenta como la segunda especie iónica predominante en la zona de estudio, siendo el catión mayoritario para un 32% del total de las muestras. Los valores de concentración oscilan entre 4 y 549 mg/L, mostrando una mediana igual a 99 mg/L, un valor promedio de 173 mg/L y un valor de fondo comprendido entre 12 y 320 mg/L, datos que se presentan en la caja gráfica observada en la figura 26.

Los datos obtenidos se caracterizan por presentar una alta variabilidad ($\%CV > 90$) en el área, mostrando un comportamiento distinto a lo encontrado por Nevado (1999) ⁽⁵⁷⁾. La autora obtiene un valor para la mediana de los datos, ubicada por encima del encontrado por Yanes (1997) ⁽⁶⁴⁾ en la zona de estudio, si embargo resulta aproximadamente 39 veces por debajo de la encontrada en esta investigación.

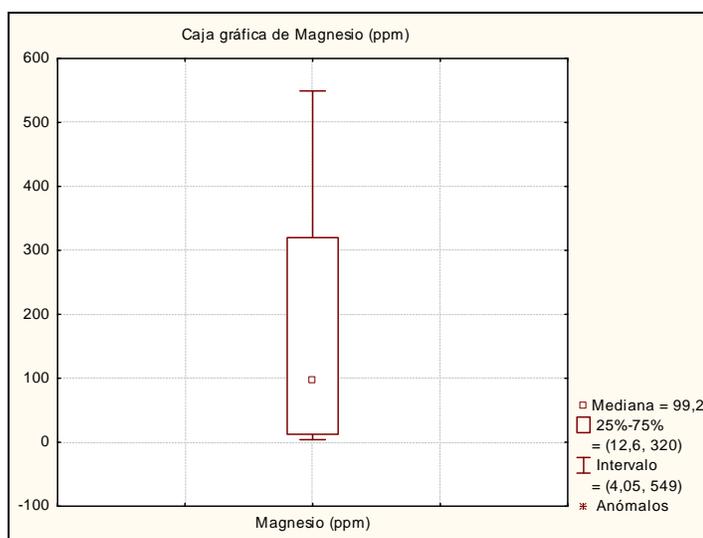


Figura 26: Caja gráfica del magnesio (mg/L)

La distribución espacial es presentada en la figura 27, donde puede observarse cierta tendencia preferencial, ubicando el segundo mayor valor al pie de la mina del sector Manganeseo, en la cual aflora el mármol. Este hecho demuestra que el proceso de disolución de especies minerales debido a la interacción agua-roca se relaciona con la composición química que presente el cuerpo de agua bajo estudio.

Por otra parte, al evaluar la tendencia espacial del magnesio y compararla con la presentada por el sodio se observa que en los casos donde la concentración arroja valores altos de magnesio, el sodio presenta un comportamiento inverso. Al graficar la relación entre ambas especies, se obtienen dos grupos de datos, a saber: el primer grupo representado por el 79% de las muestras, presenta una tendencia lineal dada por un $R^2=0,957$, con concentraciones que van desde 4 hasta 522 mg/L; mientras el segundo grupo de datos representa un 21% de la totalidad de las muestras y se caracteriza por presentar las mayores concentraciones del elemento en cuestión (magnesio) y conductividad.

En la figura 28 (a y b) se presenta la relación interelemental entre las especies sodio (mg/L) y magnesio (mg/L) para la totalidad de las muestras y para un 79% de las mismas.

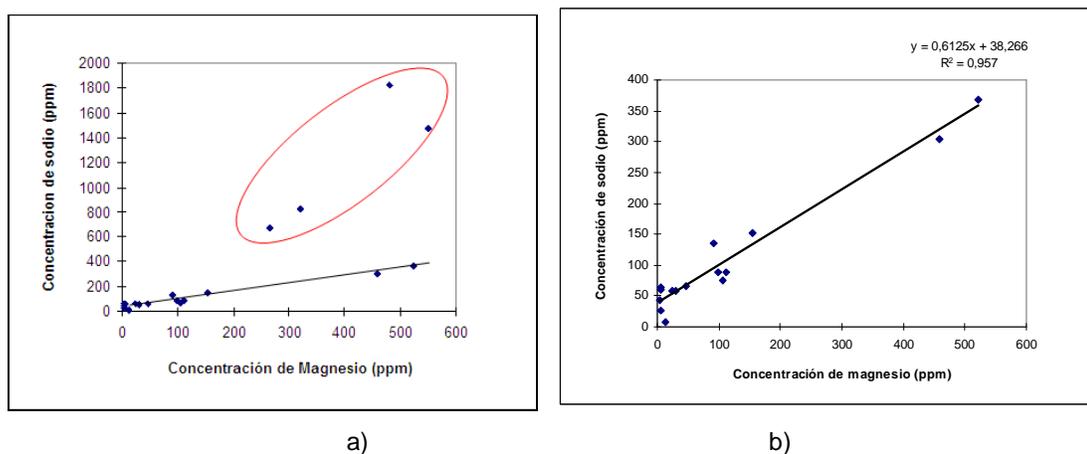


Figura 28: a) Relación de dependencia entre las especies sodio y magnesio (mg/L). b) Relación de dependencia entre las especies sodio y magnesio (mg/L) para el 79% de las muestras.

Adicionalmente, se puede evaluar la contribución del ión magnesio al valor de conductividad medida en campo, mediante la relación presentada en la figura 29. En el mismo puede observarse un valor de $R^2 = 0,8124$, el cual atribuye buena relación lineal entre ambos valores. La dispersión de este valor de R^2 respecto a la unidad, indicaría la dependencia de la conductividad con otras especies iónicas presentes en solución.

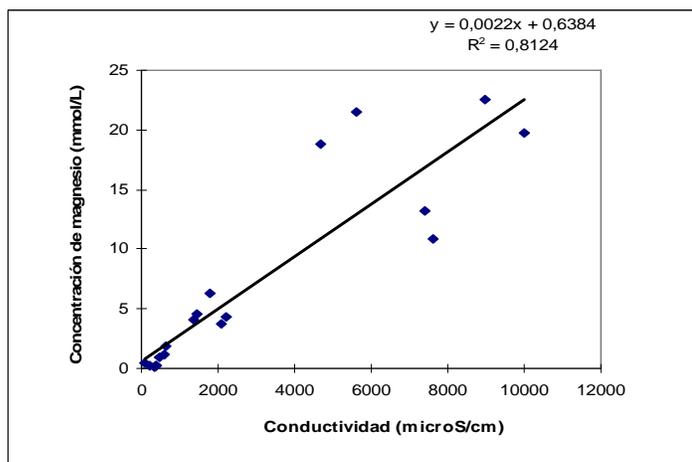


Figura 29: Relación de dependencia entre la concentración de magnesio (mmol/L) con los valores de conductividad medida en campo ($\mu\text{S/cm}$).

Por otra parte, al establecer la relación entre las especies calcio y magnesio, se obtuvo que para las muestras 2 y 5 la relación presenta valores por debajo de 0,5, para las muestras 3 y 4 se presentan valores entre 0,6 y 1, para las muestras 8-11-13 y 19 los valores de concentración se ubican entre 1 y 1,5 y finalmente las muestras restantes se ubican en una relación entre 1,5 y 3,5. Por su parte, la muestra 1 ("San José"), captada en el sector el Palmar, se comporta como un dato anómalo, presentando un valor de 4,12 para la relación entre ambas especies.

Custodio y Llamas (1976)⁽²¹⁾ proponen que para una relación Mg/Ca cercana al valor de la unidad, puede existir la influencia de un cuerpo de roca dolomítica mientras que para valores de la relación mayores a uno, la composición del agua puede

atribuirse a la alteración de minerales ricos en silicatos magnésicos como piroxenos, olivino, anfíboles y algunas micas. Adicionalmente, es de interés resaltar que las mayores concentraciones de magnesio se ubican en pozos muestrados en fincas con gran actividad agrícola y ganadera, donde en busca de la optimización de cosechas y crías se emplean frecuentemente especies fertilizantes inorgánicas que pudiesen hallarse conformadas por especies como fósforo, nitrógeno, calcio, magnesio y potasio, entre otros ⁽²¹⁾.

7.3.6.- Potasio

El potasio presenta un valor promedio de 11,68 mg/L, con valores que oscilan entre 0,56 y 52,60 mg/L, siendo este último parte de los dos datos anómalos reflejados en la caja gráfica del elemento para la zona de estudio, la cual se presenta en la figura 29. La mediana presenta un valor de 7,12 mg/L, con un valor de fondo comprendido entre 4,3 y 13,2 mg/L. Los valores de concentración obtenidos para el potasio se exponen en la tabla F del apéndice E.

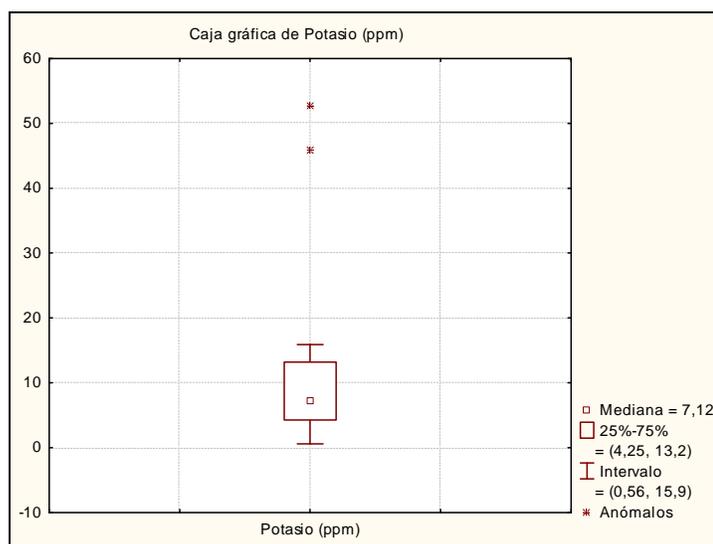


Figura 30: Caja gráfica del potasio (mg/L).

Los datos presentan una alta variabilidad según la escala arbitraria (%CV>90), lo que puede estar atribuido a la contribución de diferentes fuentes de aporte del elemento en cuestión. En la misma línea de ideas, Nevado ⁽⁵⁷⁾ sugiere que los datos anómalos obtenidos en su investigación son el resultado de la percolación de estos cuerpos de agua a través de áreas afectadas por procesos hidrotermales, hecho que apoya Vargas (1993) ⁽⁶⁵⁾, al señalar que la región de Guayana ha sido afectada en numerosas oportunidades por procesos hidrotermales.

En el mapa de distribución espacial mostrado a continuación en la figura 31, no se observa una tendencia preferencial, ubicando la menor concentración (0,56 mg/L) en el pozo Juan de Dios ubicado en el sector el Palmar, mientras que la mayor concentración (52,60 mg/L) la presenta el pozo N°10 ubicado en la Unidad Educativa El Manganeso, sector El Manganeso. Es importante resaltar que este último valor es considerado anómalo para la zona de estudio.

Adicionalmente, es importante resaltar que el potasio puede estar siendo aportado, al igual que el magnesio, por el uso de fertilizantes y plaguicidas empleados para la optimización de cultivos y ganadería en general. No obstante, Reina (2011) ⁽⁵⁴⁾ sugiere que los residuos sólidos urbanos también suelen ser una fuente importante para el aporte del elemento en cuestión.

7.3.7.- Calcio

El calcio presenta un valor promedio de 93 mg/L, mostrando datos que oscilan entre 2 y 282 mg/L, con una mediana de 59 mg/L y un valor de fondo comprendido entre 12 y 195 mg/L. En la figura 32 se presenta la caja gráfica correspondiente.

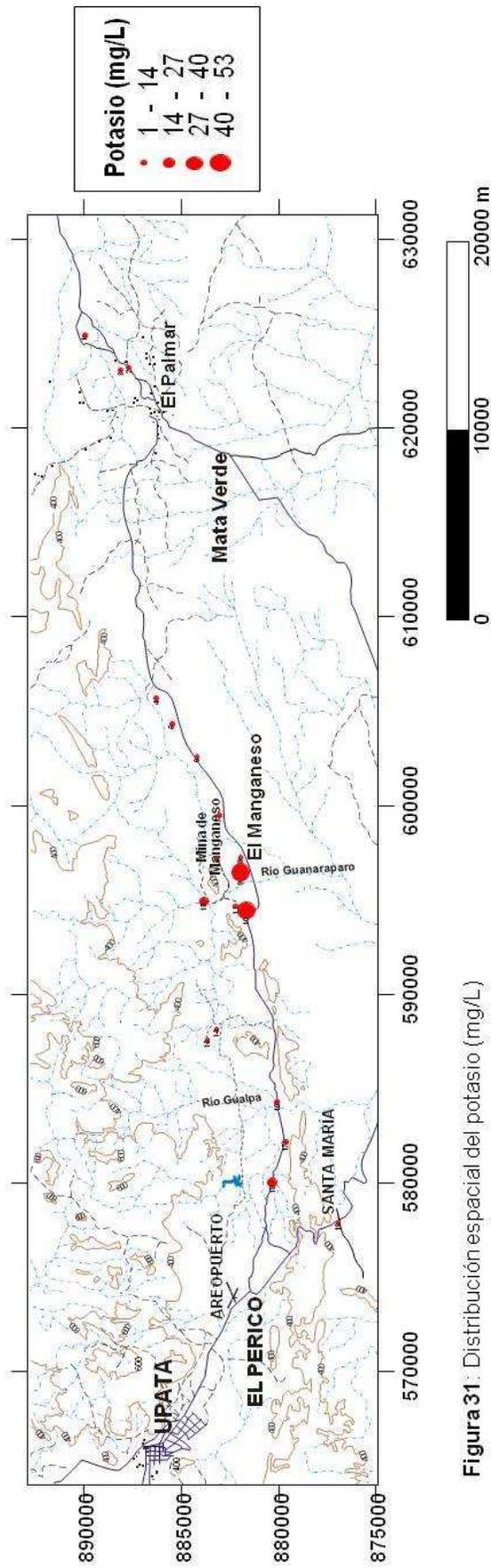


Figura 31: Distribución espacial del potasio (mg/L)

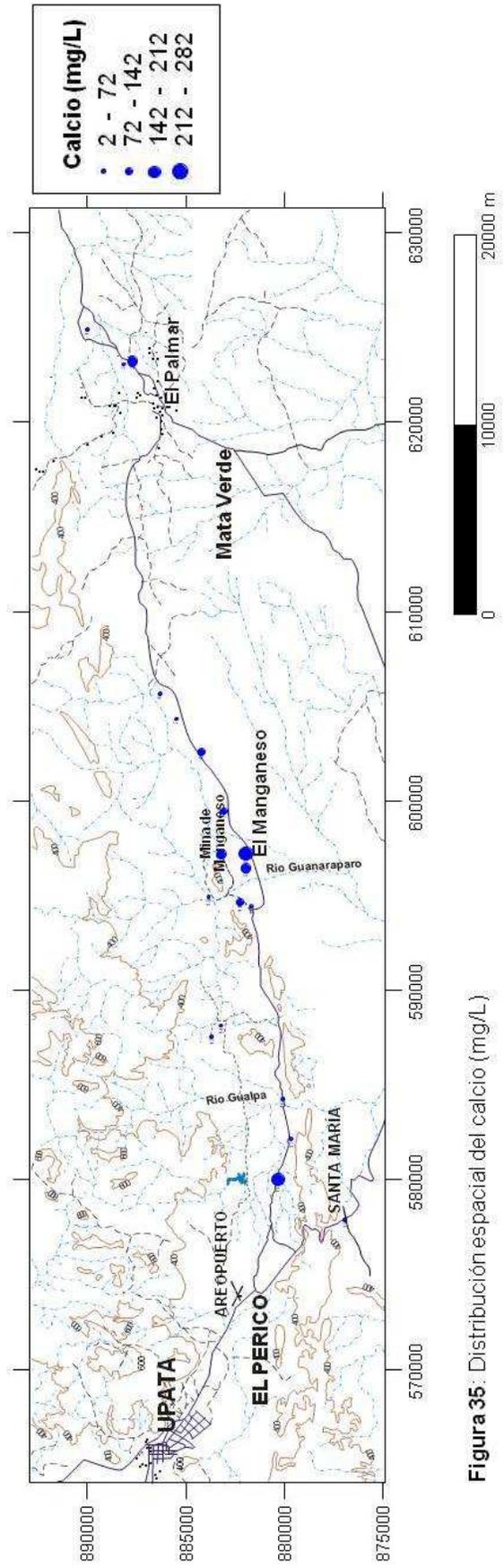


Figura 35: Distribución espacial del calcio (mg/L)

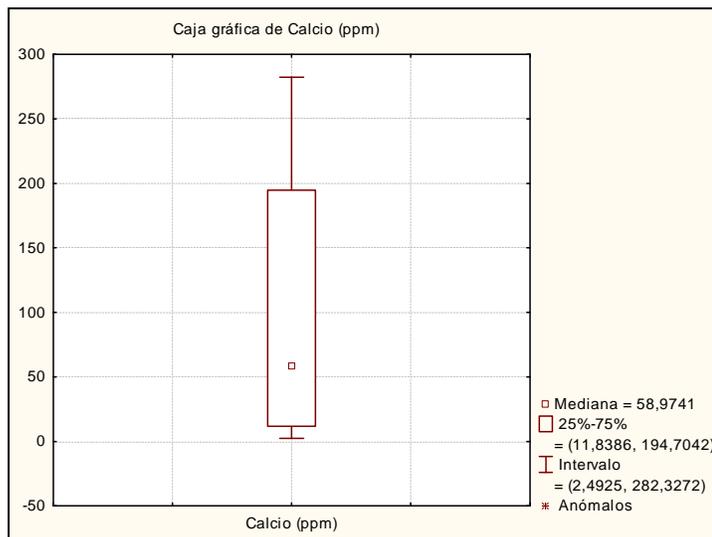


Figura 32: Caja gráfica del Calcio (mg/L).

Las concentraciones de calcio son presentadas en la tabla F del apéndice E y se caracterizan por presentar alta variabilidad según la escala arbitraria ($\%CV > 90$). Nevado ⁽⁵⁷⁾ presenta datos similares a los obtenidos en esta investigación, ubicados por encima de los encontrados por Yanes (1997) ⁽⁶⁴⁾ para los ríos del escudo de Guayana. Nevado ⁽⁵⁷⁾ sugiere que esta diferencia es asociada a la influencia que tiene el mayor tiempo de residencia de las aguas subterráneas en comparación con las aguas superficiales. Sin embargo, esta variabilidad obtenida para los resultados posiblemente sea debido a la contribución de varias fuentes de aporte de este elemento. Esta contribución puede deberse a la alteración de calizas, dolomías y anhidrita, así como plagioclasa cálcica, permitiendo en casos la formación de minerales secundarios como la caolinita. ⁽¹⁸⁾

Para el pozo “El Manguito”, ubicado al pie de la mina de Manganeso, se logró extraer material de suelo durante la excavación y construcción del pozo de 12-14 metros de profundidad. Se tomaron cuatro porciones, nombradas del 1 al 4, siendo 1 el material de suelo más superficial y el 4 el más profundo.

Las muestras presentaron distintas características de coloración y reactividad con HCl (10%) (Mostradas en la tabla L del apéndice I). Por su parte, la muestra 2 fue analizada por Difracción de Rayos X, obteniéndose el espectro mostrado en la figura 33.

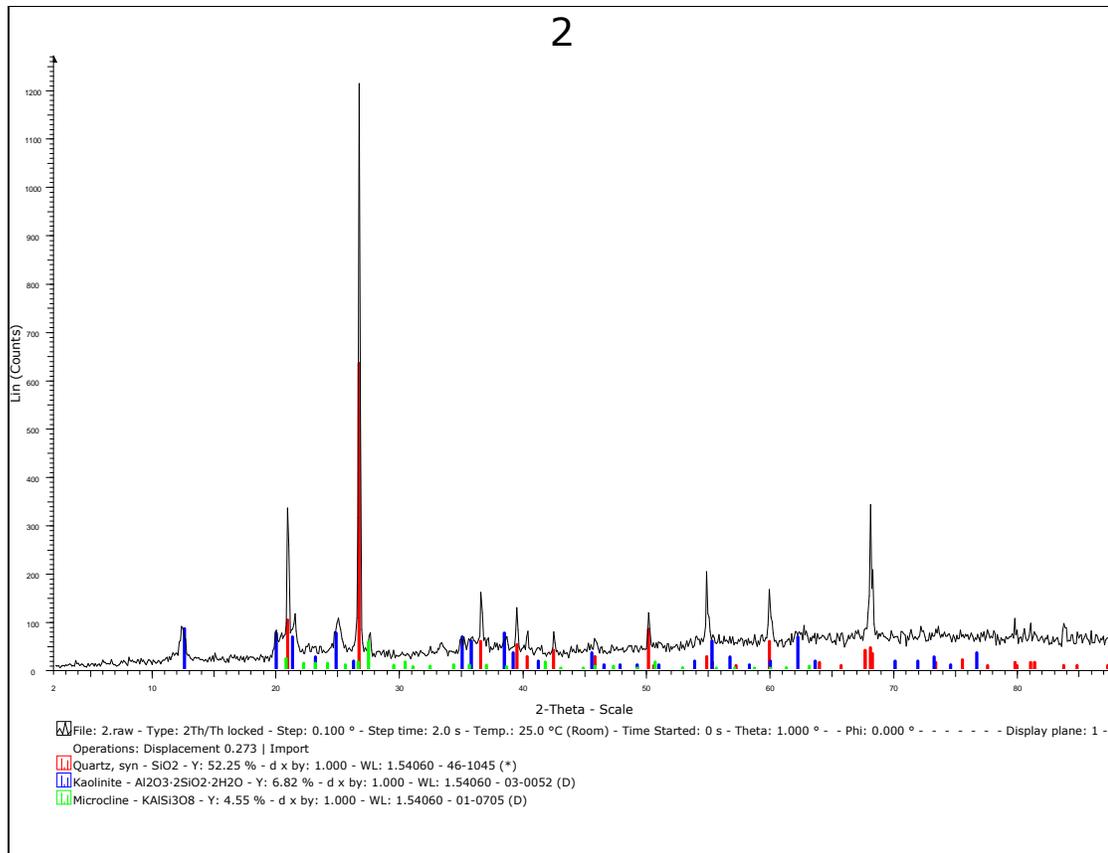


Figura 33: Difracción de Rayos X obtenido para la muestra 2 captada en el pozo El Manguito, ubicado en el sector El Manganeseo.

Puede observarse que la muestra 2 está constituida por material alterado y neoformado como la caolinita, producto de la alteración de aluminosilicatos y plagioclasas (sódica y/o cálcica). Aproximadamente a los (8) ocho metros de excavación, es extraída la porción de suelo N°3 y fue analizada por la técnica de Difracción de Rayos X, arrojando el espectro mostrado en la figura 34.

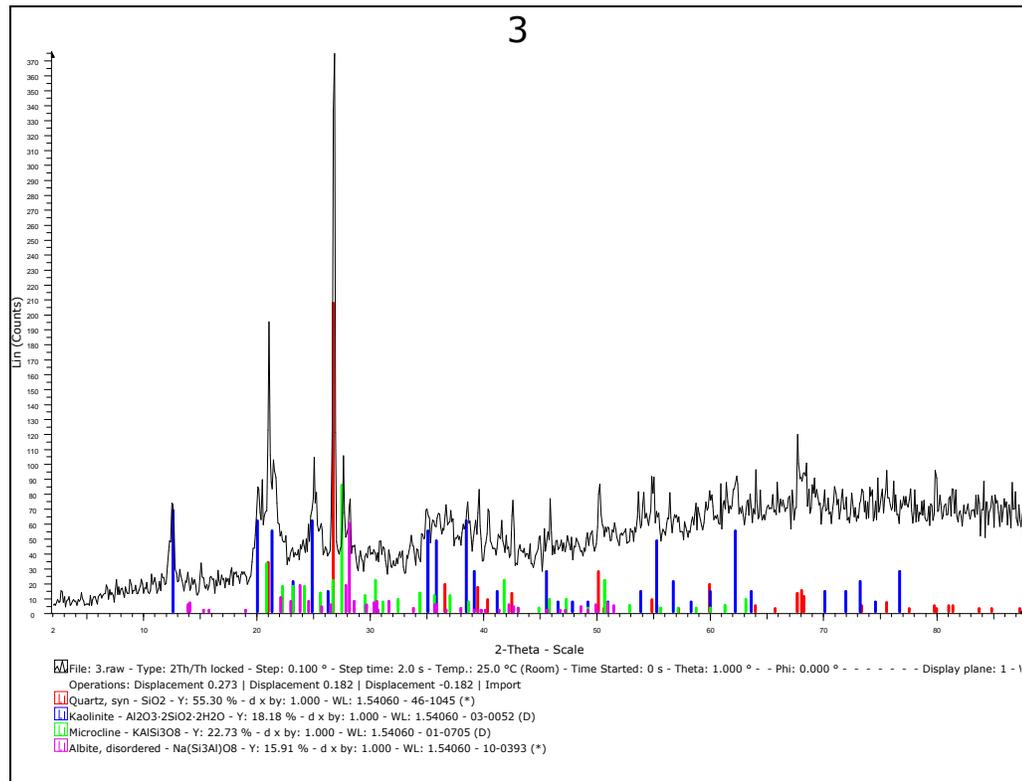


Figura 34: Difracción de Rayos X obtenido para la muestra 3 captada en el pozo El Manguito, ubicado en el sector El Manganeso.

En la misma línea de ideas, la figura 34 muestra estructuras minerales primarias (albita, microclino) ricas en las especies sodio y potasio, principalmente. Sin embargo, la reactividad que presenta esta porción de suelo ante HCl al 10%, evidencia la presencia de fragmentos carbonáticos dispersos que posiblemente estén influenciando directamente a los cuerpos de agua.

Por otra parte, en el mapa de distribución espacial mostrado en la figura 35, puede observarse que la tendencia resulta similar a la presentada por el magnesio, ubicando en este caso el mayor valor para el pozo “Dr.Eduardo”, cercano al sector el Perico, mientras se ubican los menores valores en los pozos comunales “San José” y “El Edén Aljibe”, ubicados en el Palmar y Gualpa, respectivamente.

7.3.8.- Bicarbonato

En la caja gráfica mostrada en la figura 36, el ión bicarbonato presenta un promedio de 360 mg/L, con valores que oscilan entre 44 y 936 mg/L, sin mostrar datos anómalos asociados. Por otra parte, el valor de la mediana es de 252 mg/L, con un valor de fondo ubicado entre 119 mg/L y 598 mg/L. Los resultados obtenidos para las concentraciones de bicarbonato en cada una de las muestras son presentados en la tabla G del apéndice E.

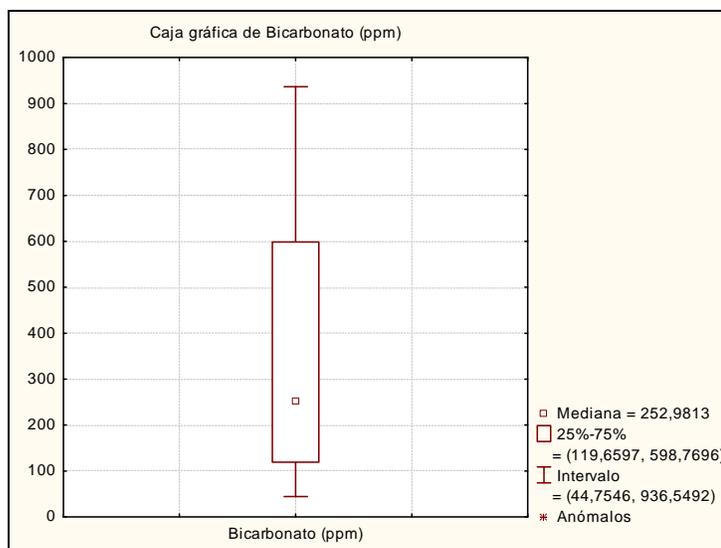


Figura 36: Caja gráfica del bicarbonato (mg/L).

Los valores de concentración obtenidos resultan variables en función de los intervalos propuestos por Yanes ⁽⁶⁴⁾ ($70\% < \%CV < 89\%$), lo que permite proponer que las mismas deben su origen a la contribución de distintas fuentes de aporte para la composición química resultante.

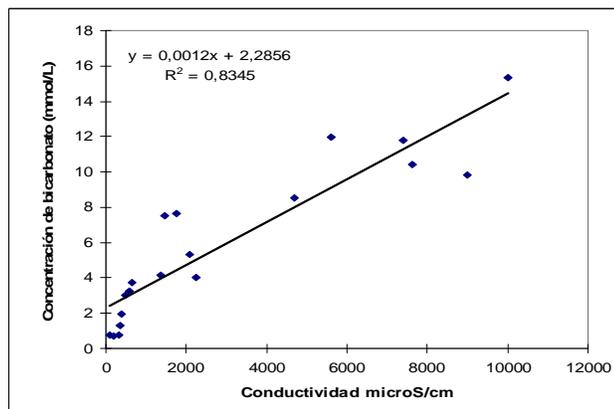


Figura 37: Relación entre la conductividad medida en campo y la concentración de bicarbonato obtenida (mmol/L).

En la figura 37 se evalúa la contribución que tiene el ión bicarbonato en el valor de la conductividad, parámetro con el cual presenta una buena relación lineal, expresada por un $R^2 = 0,8345$. Sin embargo, el valor obtenido permite sugerir que la diferencia con el valor de la unidad, es debida a la contribución de otras especies a la conductividad.

La distribución espacial (figura 38) muestra una tendencia preferencial, ubicando las mayores concentraciones para los pozos pertenecientes al área central del área de estudio. La menor concentración (44 mg/L) es ubicada en el pozo Juan de Dios ubicado en el sector el Palmar, mientras que la mayor concentración (936 mg/L) la presenta el pozo N°7, pozo La Reforma, ubicado en el sector El Manganeso.

Al establecer una relación entre los parámetros pH y concentración de bicarbonato (mmol/L) (ver figura 39) pueden observarse dos comportamientos, donde el primero presenta concentraciones de bicarbonato hasta de 6 mmol/L con valores de pH comprendidos entre 5 y 8 unidades de pH, asociándose a un origen meteórico. El segundo grupo presenta mayores concentraciones de bicarbonato (mmol/L) asociado al mismo intervalo de pH, asociándose a la meteorización de fases sólidas minerales susceptibles ante condiciones exógenas.

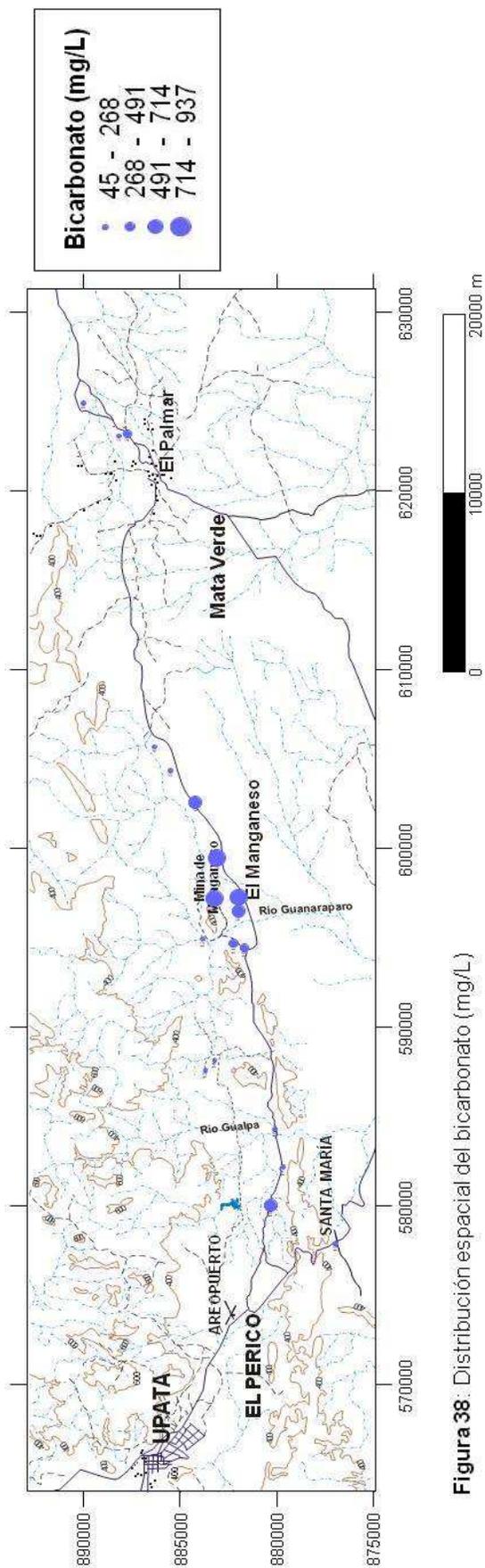


Figura 38: Distribución espacial del bicarbonato (mg/L)

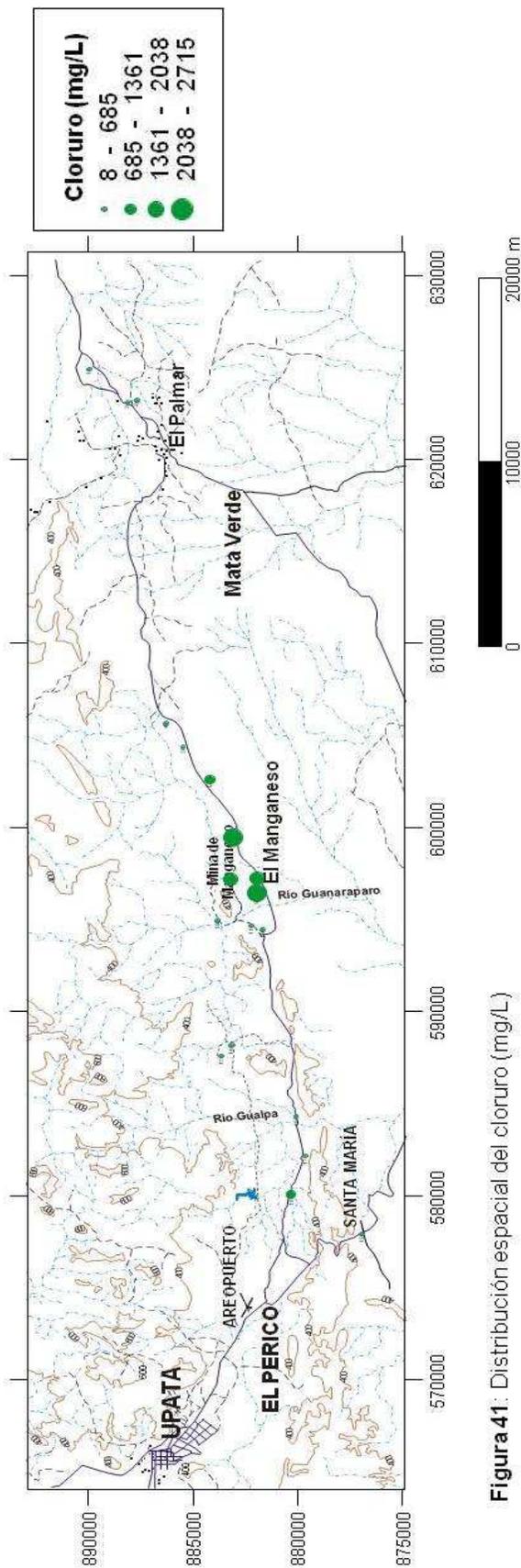


Figura 41: Distribución espacial del cloruro (mg/L)

La figura 39 presenta la relación antes descrita entre los parámetros fisicoquímicos pH y concentración de bicarbonato, expresado en mmol/L.

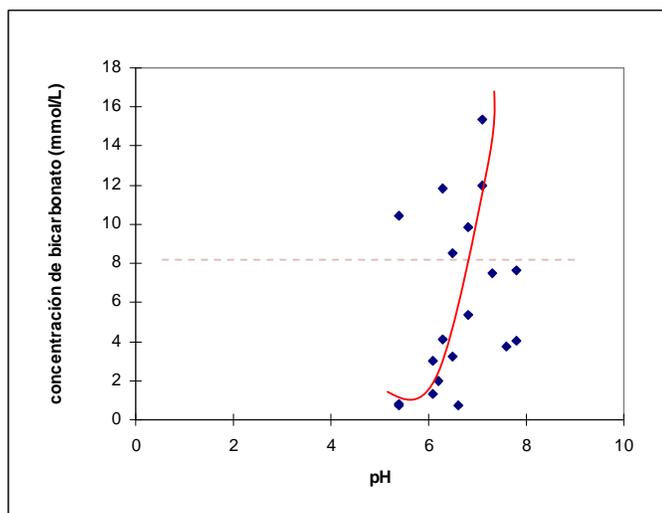


Figura 39: Relación entre el pH y la concentración de bicarbonato (mmol/L)

7.3.9.- Cloruro

El ión bicarbonato presenta un valor en la mediana de 250 mg/L, con un valor de fondo comprendido entre 67 y 1349 mg/L. La caja gráfica mostrada en la figura 40 presenta un valor promedio para la concentración de cloruro igual a 680 mg/L, con valores que oscilan entre 8 y 2714 mg/L, sin mostrar datos anómalos asociados. Los resultados obtenidos para las concentraciones de cloruro, para cada una de las muestras, son presentados en la tabla G del apéndice E.

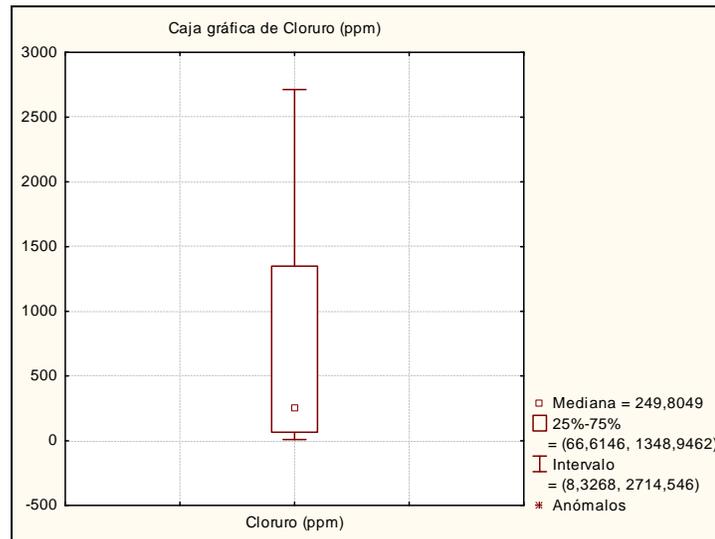


Figura 40: Caja gráfica del cloruro (mg/L).

Por su parte, el mapa de distribución espacial presentado en la figura 41, muestra una tendencia preferencial para las mayores concentraciones obtenidas, donde el mínimo valor es ubicado en el sector el Palmar, en el pozo San José, mientras el mayor valor se ubica en el pozo La Reforma, ubicado en el sector El Manganeso.

Los valores de concentración obtenidos presentan alta variabilidad según la escala arbitraria propuesta por Yanes ⁽⁶⁴⁾ ($90\% < \%CV$), permitiendo sugerir que las mismas deben su origen al aporte que ejerce la meteorización de distintos cuerpos litológicos.

En busca de evaluar la contribución del ión cloruro en el valor obtenido para la conductividad determinada en campo, se procedió a graficar la relación entre ambos parámetros, la cual es mostrada en la figura 42.

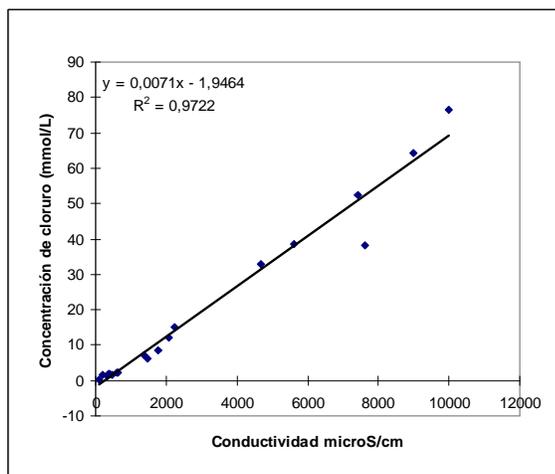


Figura 42: Relación entre la concentración de cloruro (mmol/L) y la conductividad ($\mu\text{S/cm}$).

La figura obtenida permite visualizar una buena relación lineal entre ambos parámetros, expresada con un valor de $R^2 = 0,9722$, indicando así que el ión cloruro es uno de los principales contribuyentes al valor obtenido en campo para la conductividad.

La relación interiónica entre las especies bicarbonato y cloruro se presenta en la figura 43 y es definida por una buena tendencia lineal, descrita por un coeficiente de relación $R^2=0,8029$, dato que logra diferir del valor de la unidad debido al aporte de estos elementos por parte de distintas fuentes naturales y antrópicas. Por su parte, la diferencia del valor obtenido para la pendiente con el valor de la unidad, sugiere que para la zona de estudio las concentraciones del ión cloruro prevalecen frente a los valores obtenidos para las concentraciones de bicarbonato, hecho que se corresponde con los resultados obtenidos en la caracterización hidrogeoquímica descrita en el diagrama de Piper y las figuras de Stiff.

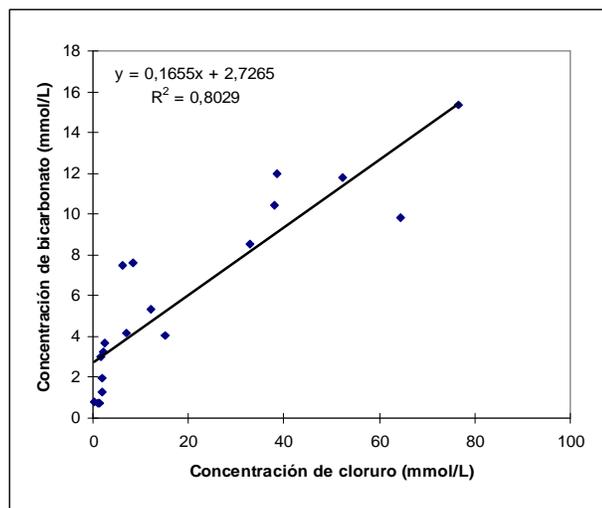


Figura 43: Relación entre el ión cloruro y el ión bicarbonato (mmol/L).

Custodio y Llamas ⁽²¹⁾ señalan que la relación entre estos iones (cloruro y bicarbonato) resulta útil para la caracterización de intrusiones marinas, ya que normalmente las aguas continentales suelen poseer valores comprendidos entre 0,1 y 5 unidades, mientras las aguas marinas presentan valores ubicados entre 20 y hasta 50 unidades, por lo que fue obtenida esta relación para las aguas captadas en el área de estudio, permitiendo así catalogar a las mismas como aguas de origen continental, presentando la menor relación (0,304) atribuida al pozo San José, ubicado en el Palmar, y el mayor valor ubicado (6,557) en el aljibe Santa Teresita, ubicada en el sector El Manganeso.

7.3.10.- Sulfato

La caja gráfica obtenida (figura 44) muestra una mediana de 74 mg/L, un promedio de 190 mg/L, un valor de fondo comprendido entre 17 y 225 mg/L y valores mínimo y máximo de concentración de 4 y 307 mg/L, respectivamente. Adicionalmente, la caja gráfica muestra tres datos anómalos asociados a los pozos La Reforma y Santa Teresita, junto con el aljibe Santa Teresita, ubicados en el sector El Manganeso.

Los valores obtenidos para las concentraciones de sulfato son presentados en la tabla G del apéndice E.

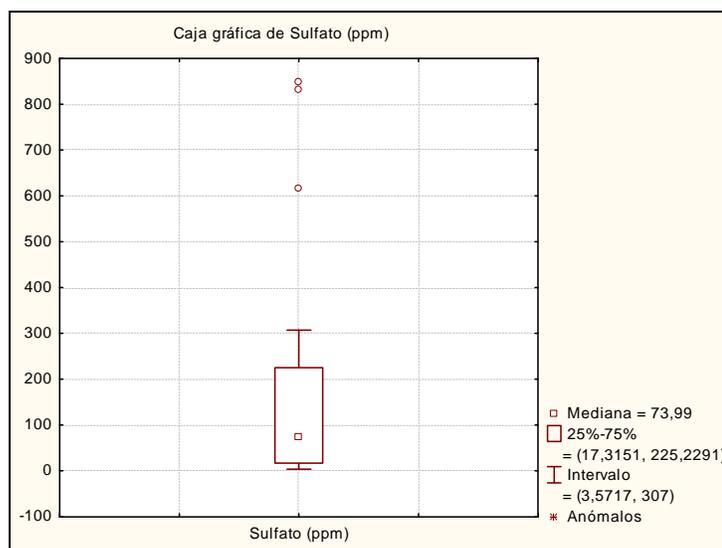


Figura 44: Caja gráfica del sulfato (mg/L).

El mapa de distribución espacial muestra una tendencia preferencial para las mayores concentraciones obtenidas, ubicándolas en el sector El Manganeso, donde adicionalmente se observan los valores anómalos detectados. Las concentraciones anómalas pueden deber su origen al aporte proveniente del uso de fertilizantes y plaguicidas, empleados para la optimización de cosechas y calidad de los suelos. Esta fuente de aporte no solo genera elevadas concentraciones en el ión sulfato, sino que también conlleva a un aumento de las especies iónicas potasio, magnesio y nitrato, las cuales coinciden con el comportamiento esperado. Sin embargo, los procesos de oxidación de minerales ricos en sulfuros, como por ejemplo la pirita (sulfuro de hierro), asociados frecuentemente a procesos de alteración hidrotermal⁽⁵⁷⁾, pueden tener un gran peso en la incorporación de esta especie (sulfato) a las aguas subterráneas pertenecientes a la zona de estudio. El mapa de distribución espacial es presentado en la figura 45.

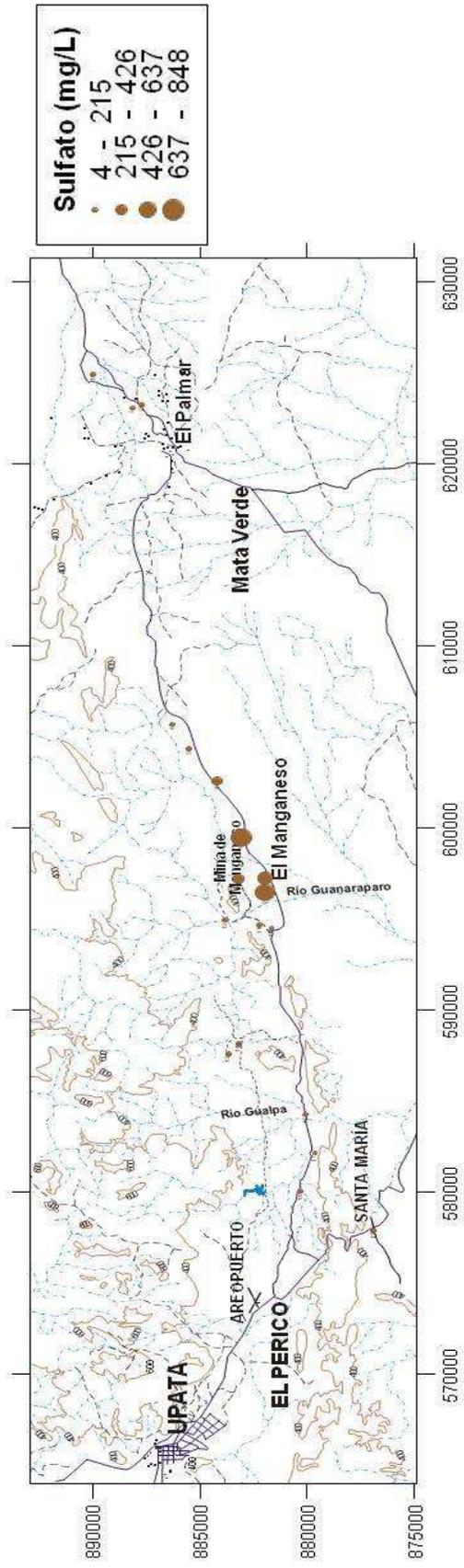


Figura 45: Distribución espacial del sulfato (mg/L)

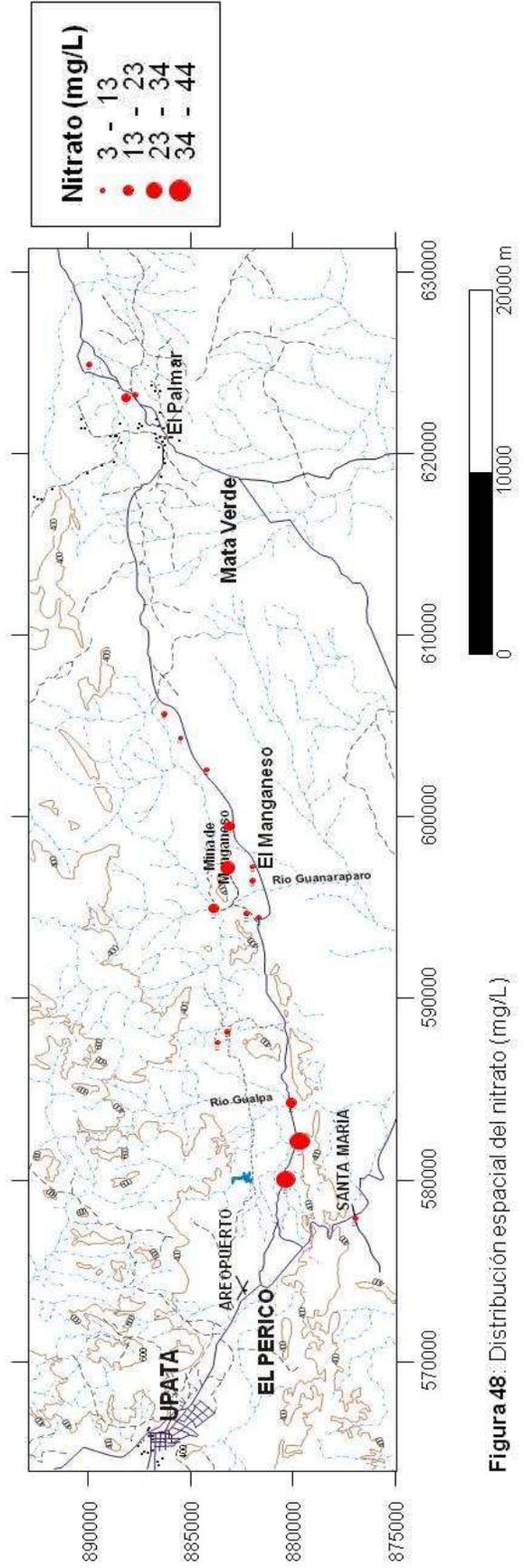


Figura 48: Distribución espacial del nitrato (mg/L)

La variabilidad de los datos obtenidos, resulta alta según la escala arbitraria propuesta por Yanes ⁽⁶⁴⁾ ($90\% < \%CV$), permitiendo sugerir que la composición química obtenida para las aguas captadas en la zona de estudio, debe su origen al aporte de distintas fuentes naturales y/o antrópicas.

En busca de evaluar el impacto que puede tener el proceso de evaporación y precipitación de sales, se obtuvo la relación entre las especies calcio y sulfato, en donde pudo observarse la distribución de dos grupos de datos, los cuales son presentados en la figura 46, mostrada a continuación.

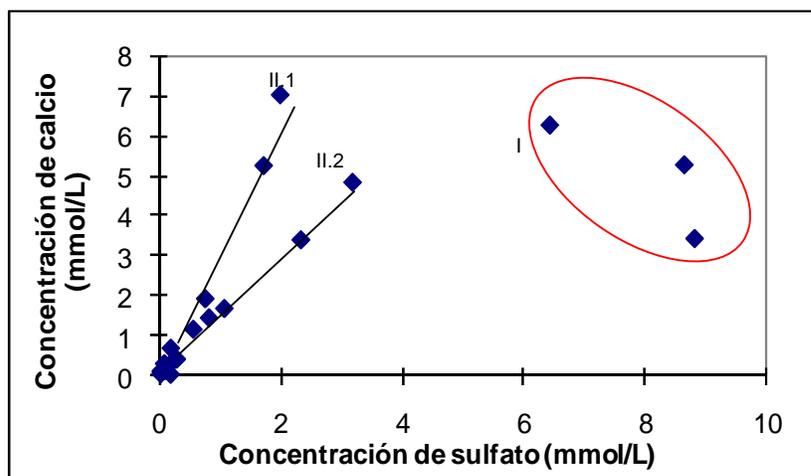


Figura 46: Relación entre las especies calcio y sulfato (mmol/L).

El primer grupo está conformado por los pozos La Reforma y Santa Teresita, incluyendo el aljibe Santa Teresita. Este primer grupo corresponde al descrito por los tres datos anómalos obtenidos y se caracteriza por presentar un comportamiento disperso, permitiendo así sugerir un origen principalmente antrópico y atmosférico, donde el empleo de productos de preservación y optimización de cultivos y suelos como fertilizantes y plaguicidas, aumenta la tasa de incorporación de esta especie a las masas de agua subterránea presentes en el área de estudio.

El segundo grupo presenta un comportamiento lineal representado por un valor de $R^2 = 0,978$ y se halla conformado por las muestras 2-11-14-15-16-17-18 y 19. De igual forma, presenta un segundo grupo de datos con un buen carácter lineal, descrito por un valor de $R^2 = 0,9865$ y se halla conformado por las muestras 1-3-4-5-6-10-12-13 y 19. Para ambos casos, el valor de la pendiente se ubica por encima de la unidad, permitiendo sugerir que las concentraciones de calcio resultan generalmente mayores a las presentadas por el ión sulfato, lo que podría estar atribuido a la alteración química del cuerpo de roca marmol dolomítico y plagioclasas (anortita), en función del aporte que pudiese estar presentando la oxidación de sulfuros así como la disolución de yeso y anhidrita.

7.3.11.- Nitrato

El valor promedio presentado por el ión nitrato es de 13 mg/L, con valores comprendidos entre 3 y 23 mg/L, siendo el valor de la mediana de 10 mg/L. El valor de fondo es comprendido entre 6 y 15 mg/L; adicionalmente, se puede observar la presencia de dos valores anómalos, ubicados al extremo oeste del área de trabajo, en las cercanías de Upata, correspondientes a los pozos Don Enrique y Dr. Eduardo. A continuación, en la figura 47 se presenta la caja gráfica obtenida para el ión nitrato.

Los datos obtenidos para las concentraciones de cada una de las aguas captadas en el área de estudio, resultan variables según la escala arbitraria propuesta por Yanes ⁽⁶⁴⁾ (%CV<89) y son presentadas en la tabla G del apéndice E.

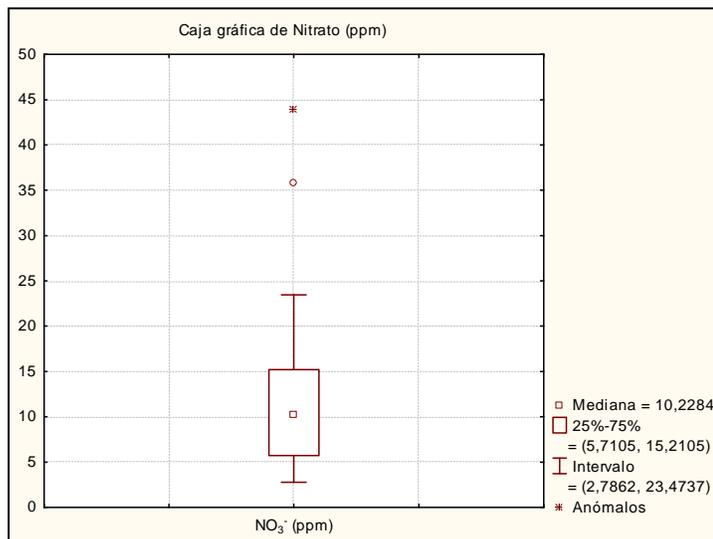


Figura 47: Caja gráfica del nitrato (mg/L).

La distribución espacial del ión nitrato se presenta en la figura 48, donde no se observa una tendencia preferencial, ubicando la menor concentración asociado al pozo El Santuario, ubicado en la vía que va hacia el Palmar. El mayor valor, por su parte, es observado al pie de la mina de Manganeso, ubicado en el pozo El Manguito, en el sector Manganeso, valor que no corresponde a los datos anómalos observados.

Custodio y Llamas ⁽²¹⁾ postulan que el mayor aporte del ión nitrato a las masas de agua proviene de la descomposición de materia orgánica ⁽⁵⁴⁾, procesos de oxidación y nitrificación debido a la acción de bacterias, hortalizas y legumbres; así como también, por la influencia que ejerce el factor antrópico. El uso de fertilizantes, plaguicidas y demás productos de preservación y mejora del rendimiento de suelos y cultivos, en conjunto con una tasa alta de evaporación frente al proceso de precipitación, permite la acumulación de sales inorgánicas en las capas superficiales de suelo, las cuales luego serán redisueltas e incorporadas en grandes cantidades a los cuerpos de agua subterránea que principalmente se destinan a consumo humano.

Es importante destacar que en la zona de estudio se desarrollan constantemente actividades de siembra, cultivo y cría de ganado, por lo que puede afirmarse que el factor antrópico incide directamente en el aporte de esta especie a las masas de agua; sin embargo, debido a la falta de información acerca de la permeabilidad de los suelos que permita evaluar la tasa de percolación o infiltración de las aguas meteóricas, tasa de precipitación actual para la zona y la periodicidad en el empleo de los productos químicos para los cultivos, no es posible indicar cual es y en qué magnitud se presenta el contribuyente mayoritario.

7.3.12.- Cobre, zinc y aluminio

Los elementos cobre y zinc no fueron detectados bajo la técnica y condiciones empleadas para el análisis de las muestras de agua del área. El aluminio por su parte, fue detectado solo en dos muestras, las cuales corresponden al aljibe El Edén y al río Gualpa. Es importante destacar que en el aljibe antes mencionado, el agua presentaba una coloración blanquecina con alto contenido de sólidos suspendidos (imagen 6), los cuales se presume según la información litológica existente en la zona de estudio, podría deberse a la presencia del mineral caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

Dicha arcilla se caracteriza por presentar un tamaño de grano muy fino, el cual posiblemente facilitó la percolación de la misma a través del papel de filtro, haciendo posible la detección de concentraciones anómalas, ubicadas incluso hasta 8 veces por encima del valor máximo permitido ($\approx 0.2 \text{ mg/L}$)⁽⁶⁶⁾.



Imagen 6: Aljibe El Edén.

7.3.13.- Hierro y manganeso

El hierro ferroso solo fue detectado en el pozo Santa Teresita, en la zona central del área de estudio, en las adyacencias de la mina de Manganeso. Dicho valor se presenta como un dato anómalo para el área. Su distribución espacial es influenciada principalmente por los parámetros pH y Eh, es por ello que se procedió a elaborar el diagrama de ambos parámetros para la zona de estudio, siendo presentado en la figura 49.

Davis y Wiest ⁽⁶⁷⁾ definen al Eh como la energía necesaria para lograr un desprendimiento de electrones de las especies iónicas presentes en un medio específico. Adicionalmente, los autores sugieren que dicho parámetro depende de los valores de pH, presencia o ausencia de oxígeno libre y de ciertas especies químicas entre las cuales destacan al hierro y manganeso.

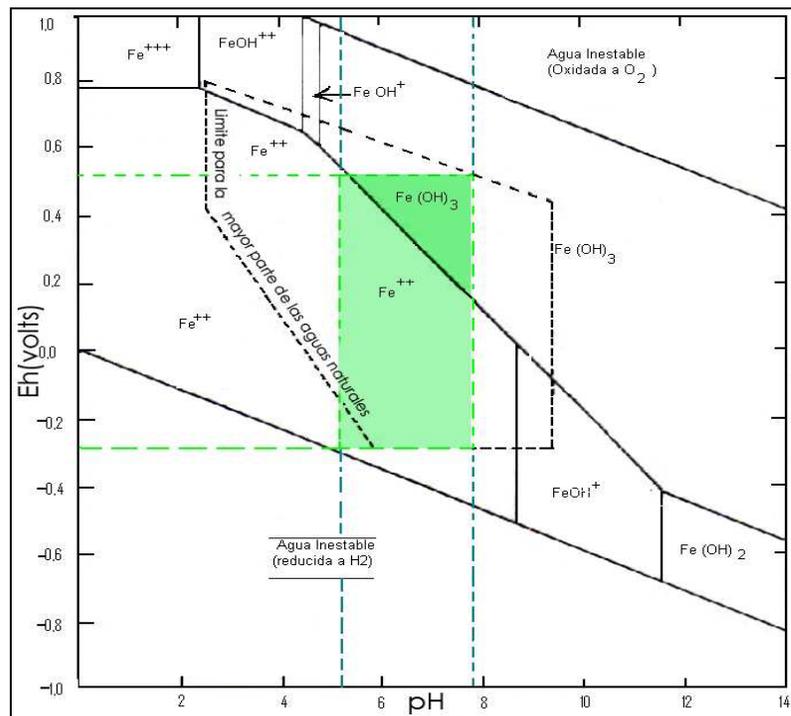


Figura 49: Diagrama pH-Eh obtenido para el sistema acuoso ferroso-férrico en las aguas captadas en la zona de estudio (Modificado de Davis y Wiest, 1971).

En la misma línea de ideas, los autores sugieren que para el sistema ferroso-férrico operante en masas de agua subterránea, los valores de pH están comprendidos entre 5 y 8, mientras que los valores de Eh se presentan en un rango comprendido entre 120 y 300 mV.

Para el área de estudio, los valores de pH obtenidos permiten sugerir un rango de Eh comprendido entre -0,3 mV y 0,5 mV, que delimita a las aguas captadas en la zona dentro de un campo oxido reductor, donde se establece un equilibrio entre la especie disuelta (reductor) y la especie precipitada (oxidante). Sin embargo, debido a que el hierro en solución fue observado en un solo pozo, se puede sugerir que el medio predominante es de carácter oxidante, atribuyendo la presencia del ión Fe⁺² en este pozo, a la percolación de especies coloidales y partículas de oxido de hierro a través del papel de filtro.

Por otra parte, Nevado ⁽⁵⁷⁾ señala que una alta relación entre los iones hierro y sulfato podría estar indicando la influencia directa de procesos de alteración mineral (pirita) en conjunto con la acción de fluidos hidrotermales, lo que parece observarse en este punto ya que la concentración de sulfato para este pozo y los pozos adyacentes resulta alta.

El ión manganeso resulta ausente para un 79% de las muestras, presentando valores en sólo cuatro pozos: Juan de Dios (escuela), La Reforma, Santa Teresita y Santa María, junto con el aljibe El Edén. Su distribución espacial es presentada en la figura 50 y las concentraciones obtenidas, presentadas en la tabla H del apéndice E.

Estos resultados coinciden con los de Nevado ⁽⁵⁷⁾, quien reporta las mayores concentraciones del elemento en las muestras 19 21 y 25, captadas dentro del área de estudio de esta investigación. La autora explica dichas concentraciones proponiendo, según las características geológicas presentes en el área, una posible mineralización de manganeso. Señala que la mayor concentración fue obtenida para una muestra captada en el sector El Palmar donde es explotada la especie mineral Pirolusita (MnO_2) y apunta que dicha mineralización puede ser el resultado de un proceso de alteración hidrotermal, evidenciado en las figuras de Stiff, Diagrama de Piper y anomalías presentadas principalmente en las concentraciones de los iones cloruro y sulfato.

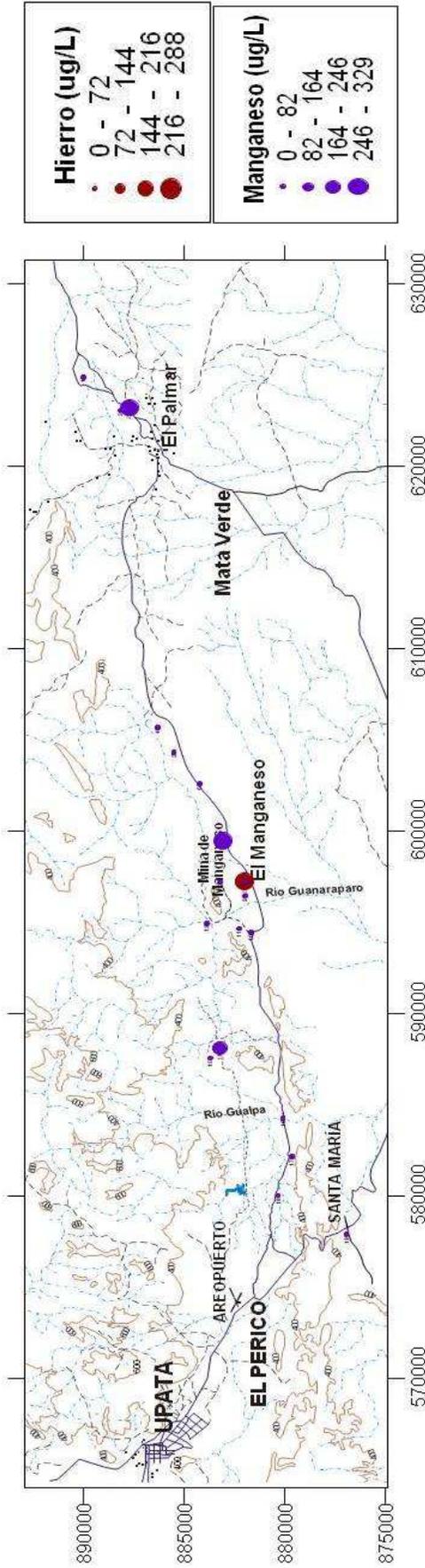


Figura 50: Distribución espacial del hierro y manganeso (ug/L)

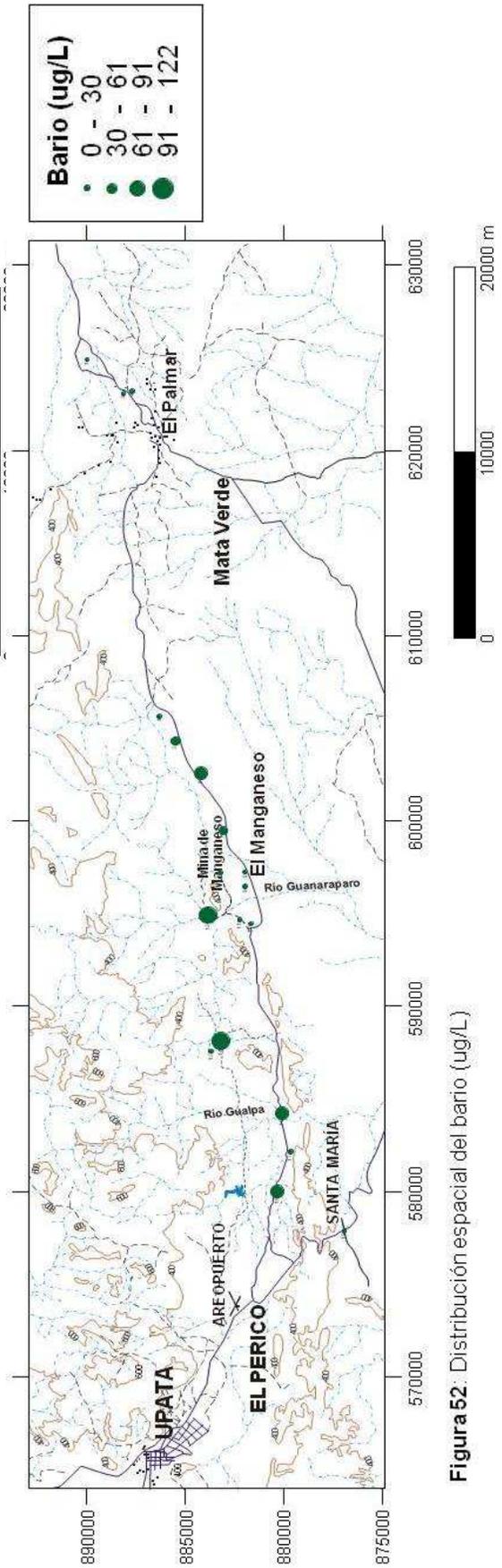


Figura 52: Distribución espacial del bario (ug/L)

7.3.14.- Bario y estroncio

Los valores de concentración obtenidos para el bario son presentados en la tabla H del apéndice E. Dichos valores presentan una alta variabilidad a lo largo de la zona de estudio según la escala arbitraria propuesta por Yanes ⁽⁶⁴⁾ (%CV<90%), sin embargo la zona no presenta valores anómalos. El valor promedio asociado al área de estudio es de 32 µg/L, con un valor para la mediana de 21 µg/L y valores mínimo y máximo de 0 y 121 µg/L, respectivamente. El valor de fondo es ubicado entre 0 y 64 µg/L y se representa en la caja gráfica presentada en la figura 51.

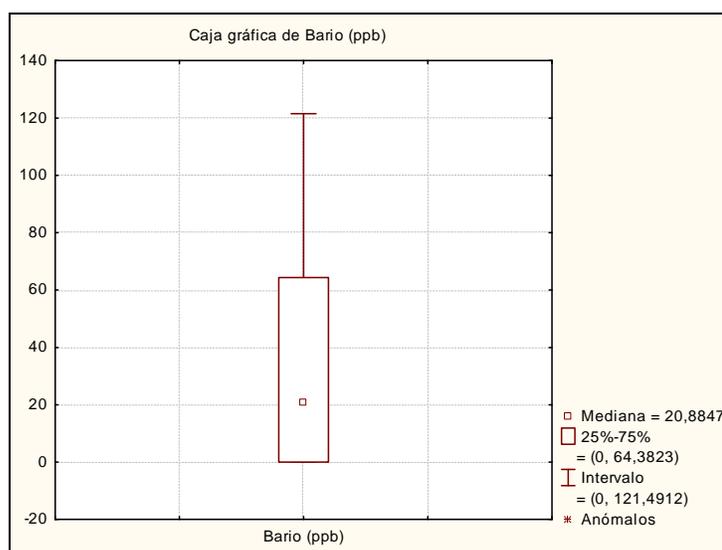


Figura 51: Caja gráfica del bario (µg/L).

La distribución espacial se presenta en la figura 52, donde puede observarse un comportamiento sin un patrón específico, ubicando el mayor valor en el aljibe El Edén, comportamiento que coincide con el presentado por los elementos potasio y calcio, con quienes el Bario presenta diadoquia ⁽¹⁸⁾.

En busca de poder establecer un origen único para el elemento en cuestión (bario) se procedió a ilustrar la relación entre las especies potasio y bario, para lo cual se obtuvo el siguiente comportamiento.

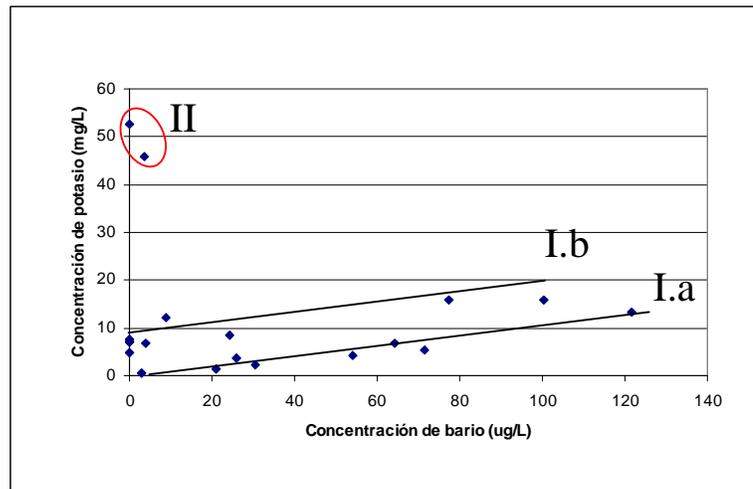


Figura 53: Relación entre las especies bario ($\mu\text{g/L}$) y potasio (mg/L).

En la figura 53 pueden observarse inicialmente dos grupos de datos. El grupo **I.a** se caracteriza por presentar un comportamiento lineal descrito por un valor de $R^2 = 0,935$, con un valor de pendiente bajo. Dicho grupo corresponde a las muestras 1-3-4-5-6-7-14 y 16, y esta relación puede deber su origen al proceso de meteorización de fases sólidas minerales. Nevado ⁽⁵⁷⁾ hace énfasis en la alteración del feldespato potásico presente en las rocas félsicas pertenecientes al grupo Supamo y de la Provincia de Imataca.

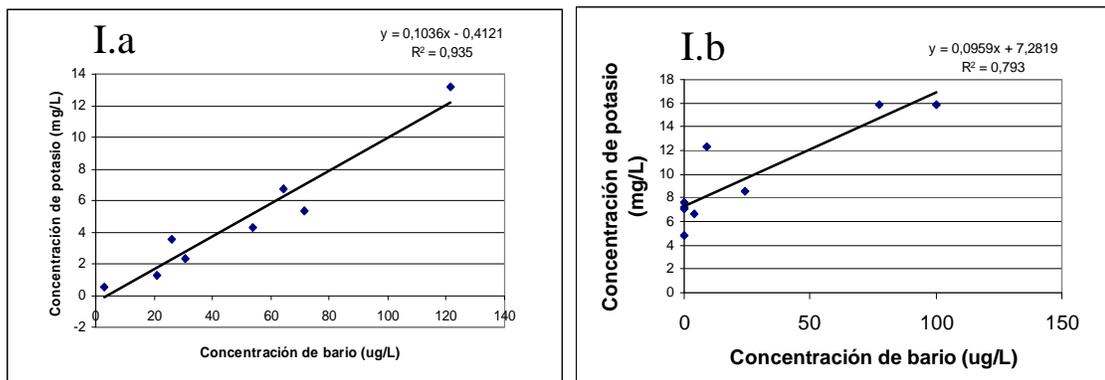


Figura 54: Grupo I obtenido en la relación Bario ($\mu\text{g/L}$) Potasio (mg/L).

El grupo **I.b** se caracteriza por presentar un comportamiento lineal descrito por un valor de $R^2 = 0,793$. Este grupo de datos presenta mayores concentraciones de potasio para un mismo intervalo de valores de bario, lo que posiblemente esté asociado a la alteración de distintas especies minerales (filosilicatos) presentes en la zona como especies minoritarias y accesorias. Este grupo está constituido por las muestras 2-11-12-13-15-17-18 y 19.

Por su parte, el tercer grupo está conformado por las muestras 8-9 y 10 y se caracteriza por presentar elevadas concentraciones de potasio para bajos valores de bario, comportamiento que indica que posiblemente la red de las fases sólidas minerales presentes en el área, no se ven favorecidas para establecer diadoquia.

El estroncio presenta un valor promedio de 341 $\mu\text{g/L}$, con una mediana de 117 $\mu\text{g/L}$. Los valores son comprendidos entre 5 y 1145 $\mu\text{g/L}$, ubicando el valor de fondo entre 33 y 624 $\mu\text{g/L}$. Los datos presentan una alta variabilidad según la escala arbitraria propuesta por Yanes ⁽⁶⁴⁾ ($\%CV < 90\%$), sin presentar datos anómalos. La caja gráfica obtenida para el elemento es presentada en la figura 55, mostrada a continuación y su distribución espacial es ilustrada en la figura 56.

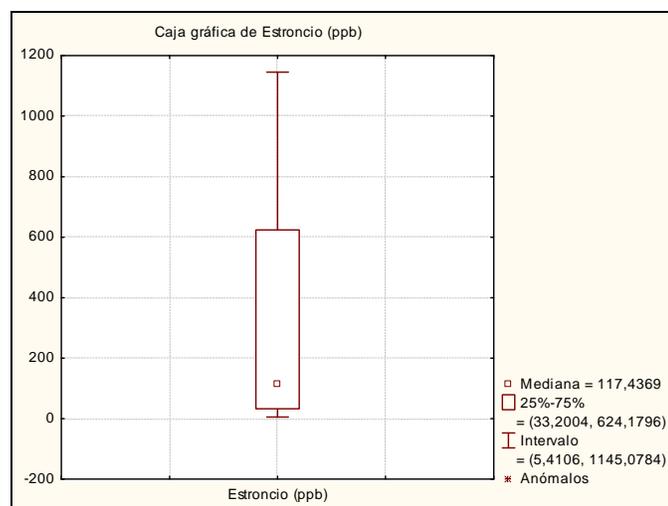


Figura 55: Caja gráfica del estroncio ($\mu\text{g/L}$).

La distribución espacial del estroncio está altamente relacionada con la obtenida para el calcio, hecho que puede ser explicado por la facilidad que poseen ambas especies catiónicas para establecer diadoquia en fases minerales como plagioclasa o carbonatos. Este comportamiento coincide con el encontrado por Nevado ⁽⁵⁷⁾ para las muestras 2 19 y 21, pertenecientes a su vez a nuestra área de estudio.

7.3.15.- Uranio

Los datos obtenidos para las concentraciones de uranio presentan una alta variabilidad según la escala arbitraria propuesta por Yanes ⁽⁶⁴⁾ (%CV>90%) y son presentados en la tabla H del apéndice E. Dicho elemento posee una mediana de 13 $\mu\text{g/L}$, con un valor de fondo comprendido entre 10 y 30 $\mu\text{g/L}$. El promedio es de 33 $\mu\text{g/L}$ y los valores mínimo y máximo son 0 y 42 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. Por su parte, la caja gráfica obtenida para la especie en solución se halla ilustrada en la figura 57 y muestra un valor anómalo, correspondiente al pozo Dr. Eduardo, ubicado en las cercanías de Upata, al extremo oeste de la zona de estudio.

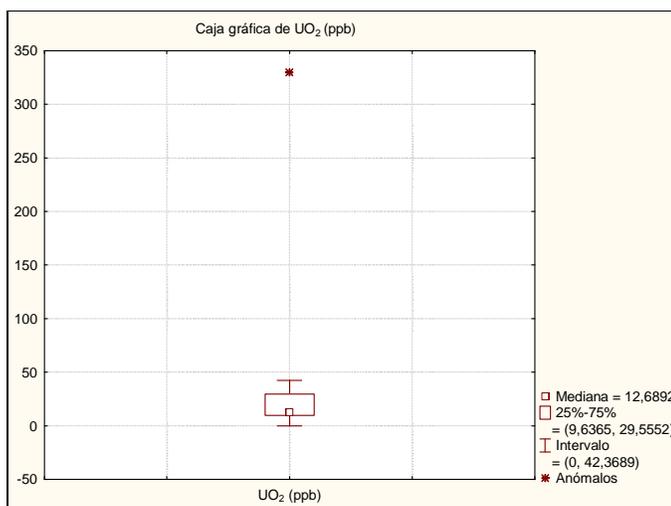


Figura 57: Caja gráfica del uranio.

La figura 58, mostrada a continuación, presenta la distribución espacial del uranio. Puede observarse un único valor, correspondiente al dato anómalo obtenido para la muestra 18 “Dr. Eduardo”.

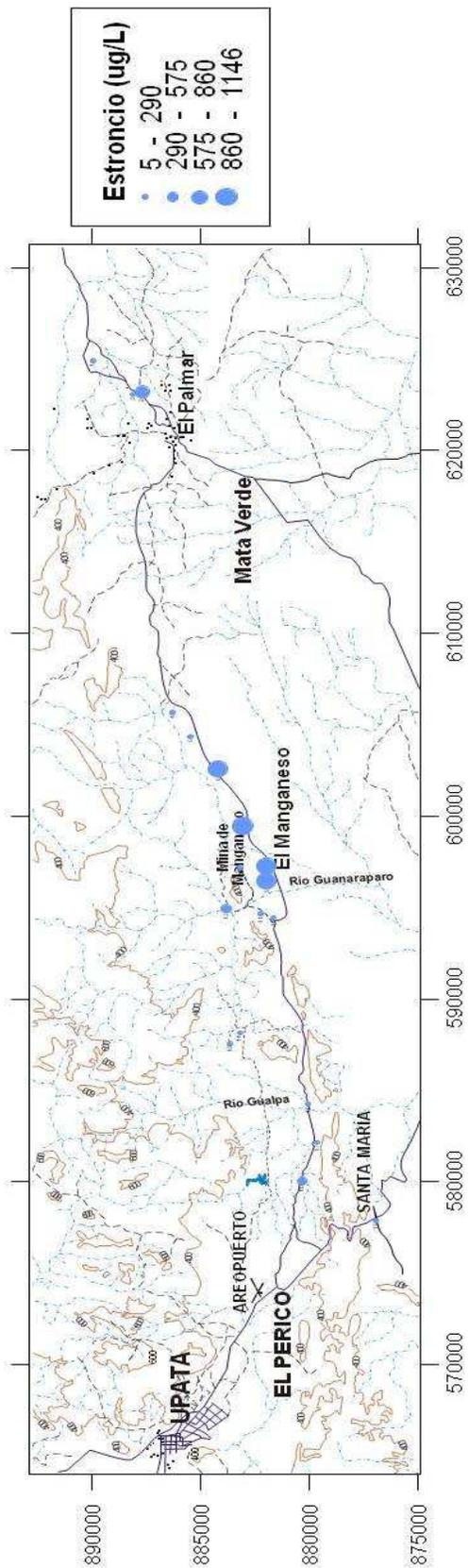


Figura 56: Distribución espacial del estroncio (ug/L)

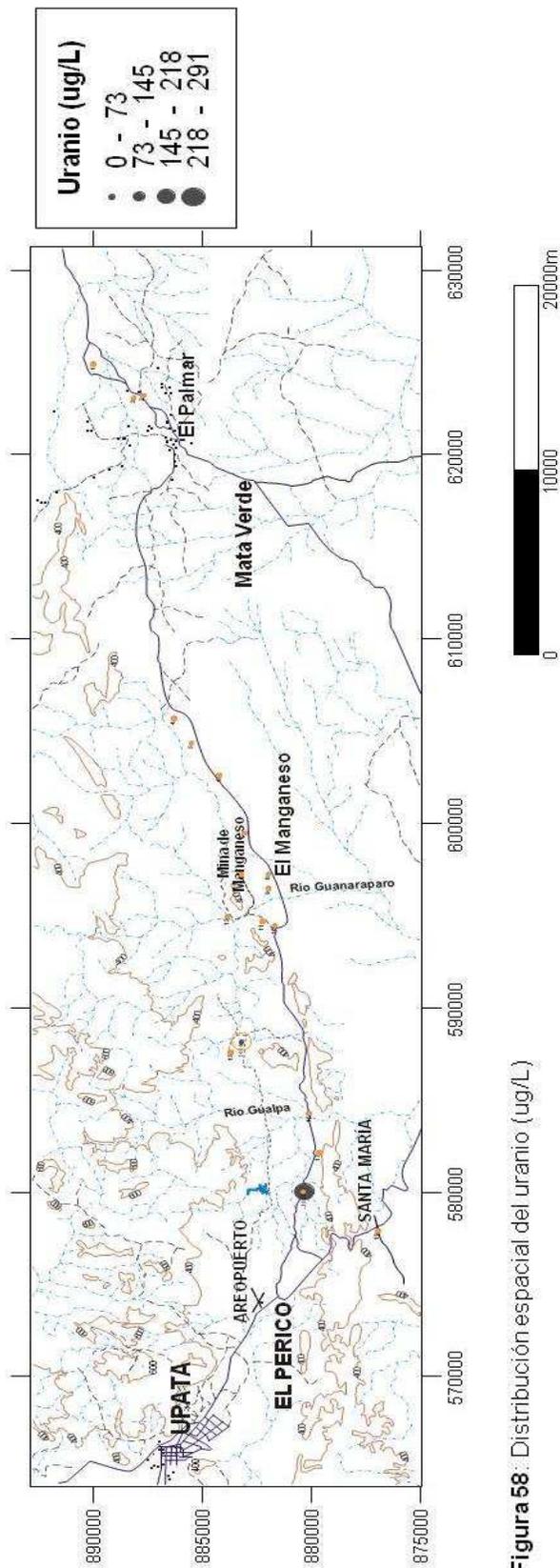


Figura 58: Distribución espacial del uranio (ug/L)

8.- Proceso de intercambio iónico

El proceso de intercambio iónico representa la cantidad de calcio y magnesio ganado o perdido suministrado por la disolución de fases sólidas minerales como yeso, calcita y dolomita, respecto a la cantidad de sodio y potasio suministrado por la disolución de sales cloruradas, principalmente ⁽⁴⁹⁾⁽⁴⁸⁾.

En busca de evaluar el impacto que puede ejercer este proceso en las aguas bajo estudio, se procedió a graficar la relación $(Ca^{+2}+Mg^{+2}-SO_4^{-2}-HCO_3^{-})$ en función de $(K^{+}+Na^{+}-Cl^{-})$, expresada en meq/L. Jalali (2004) ⁽⁴⁸⁾ propone una relación lineal con un valor de pendiente igual o cercana a -1 para una dependencia entre las concentraciones de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} y HCO_3^{-} con la disolución principalmente de especies minerales como dolomita, calcita y yeso.

En la figura 59, puede observarse la existencia de un grupo de valores que presenta ligera dispersión (muestras 7-8-9-10-12-13 y 18), junto a un segundo grupo que presenta una relación lineal descrita por un coeficiente de correlación igual a 0,9894 y un valor de pendiente de -1,46. Este último comportamiento sugiere que el proceso de intercambio iónico resulta prevalente para el área de estudio.

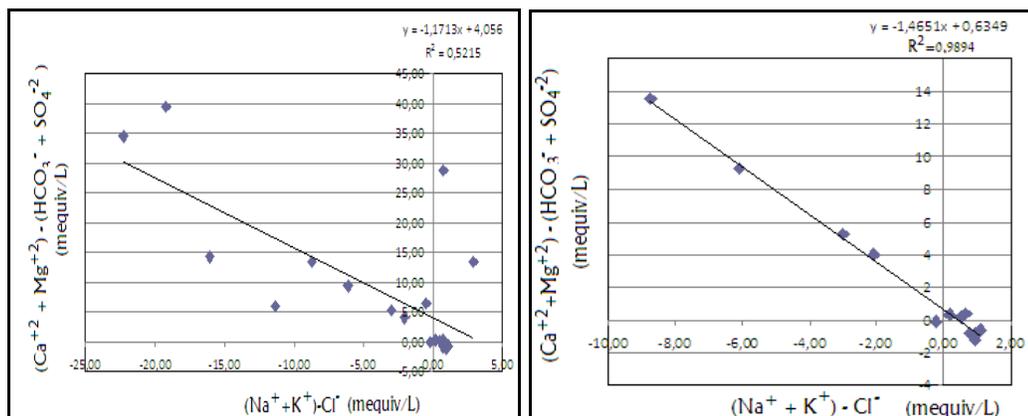


Figura 59: Proceso de Intercambio Iónico.

Jalali ⁽⁴⁸⁾ indica que una disminución progresiva en los valores de concentración de las especies $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, resulta un factor indicador de que dichas especies están participando en reacciones de intercambio catiónico. Las propiedades fisicoquímicas de las arcillas permiten proponer una posible sustitución de sodio por iones divalentes como calcio y magnesio, facilitando así un enriquecimiento de las aguas subterráneas con la especie monovalente desplazada (sodio).

9.- Área de influencia del cuerpo mármol-dolomítico

Dentro de los objetivos planteados en esta investigación, se incluye determinar el área de influencia del cuerpo de roca mármol-dolomítico ubicado en el área de estudio, sobre las aguas captadas en la zona de estudio.

La determinación del impacto se llevó a cabo por medio de la determinación de los elementos minoritarios y traza estroncio y uranio. Rankama ⁽¹⁸⁾ describe una fuerte relación entre los elementos calcio y estroncio, presentando una mayor afinidad en fases carbonáticas. En esta línea de ideas, fue obtenida la relación entre ambos elementos y la misma se muestra a continuación en la figura 60.

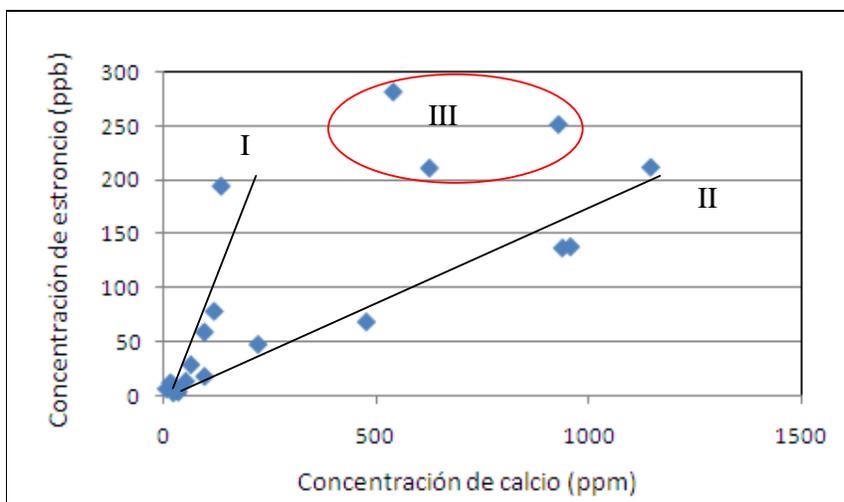


Figura 60: Relación entre el calcio (mg/L) y el estroncio (µg/L).

La figura antes mostrada permite identificar tres comportamientos presentados por las aguas captadas en el área de estudio, donde el primer grupo tiene un buen carácter lineal descrito por un $R^2 = 0,978$ y una pendiente de 0,839 y se distribuye preferencialmente en la zona central del área de estudio (cerca de la zona de falla), en las cercanías del afloramiento del mármol, en donde la percolación de fluidos hidrotermales podría jugar un papel importante en el proceso de mineralización de

las aguas. Este grupo de datos guarda relación con el proceso de alteración de fases minerales, específicamente el cuerpo carbonático, en donde el enriquecimiento de estroncio se ve favorecido por la afinidad que presenta con las fases carbonáticas. ⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾

Un segundo grupo de datos, el cual presenta un comportamiento lineal descrito por un $R^2 = 0,965$, sugiere la existencia de otra fuente mineral susceptible en condiciones exógenas, que pudiese estar aportando estroncio a las aguas de la zona. Estudios realizados en el área ⁽⁵⁷⁾ ⁽⁶⁵⁾ señalan la existencia de especies minerales como plagioclasa cálcica, que pudiese estar enriquecida con estroncio debido a la capacidad de presentar diadoquia con el calcio. Adicionalmente, Saavedra ⁽⁵⁸⁾ señala en los resultados presentados en su estudio sobre el mármol, que las bajas concentraciones de estroncio en la roca pueden ser atribuidas a un alto grado de metamorfismo, debido a la capacidad que posee el estroncio para migrar de dicha fase mineral e incorporarse o formar otra. Este hecho permite suponer que el estroncio al ser liberado de la fase carbonática, no solo puede estar siendo incorporado directamente a las masas de agua subterránea en estudio, sino también podría estar siendo precipitado en otra fase mineral, la cual resulte menos susceptible a los procesos de alteración y por ende, induzca a una disminución en la tasa de aporte el ión (estroncio) a los cuerpos de agua.

El tercer grupo de aguas es conformado por las muestras 2-8 y 18, las cuales presentan un comportamiento disperso asociado a las mayores concentraciones de estroncio. Este grupo no presenta una distribución preferencial, lo que impide asociarlo directamente a una influencia litológica. Sin embargo, Nevado ⁽⁵⁷⁾ y Saavedra ⁽⁵⁸⁾ señalan que la zona de estudio ha estado sometida en repetidas oportunidades a la acción de fluidos hidrotermales, los cuales posiblemente se encuentren drenando sobre zonas altamente mineralizadas, favoreciendo la disolución de las mismas e induciendo un aporte prevalente del elemento a las masas de agua.

Por su parte, Saavedra ⁽⁵⁸⁾ presenta en sus resultados un valor reportado para el uranio por encima del establecido en una caliza a nivel mundial, atribuyó su origen a la existencia de fluidos enriquecidos con el mismo, presentes en el momento de formación de la caliza. Adicionalmente, la autora describe una asociación directa del uranio con fases carbonáticas, por lo que se procedió a obtener la relación entre los elementos magnesio y uranio, en busca de evaluar la relación entre la litología y los valores obtenidos para dicho elemento. La relación es presentada en la figura 61, mostrada a continuación.

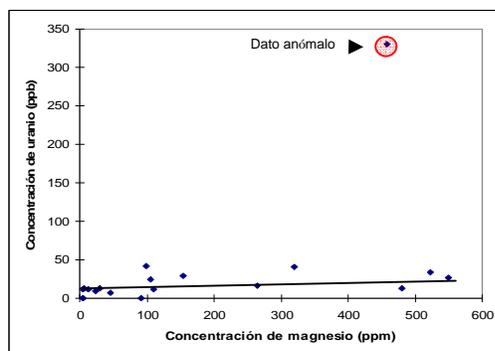


Figura 61: Relación entre los elementos uranio ($\mu\text{g/L}$) y magnesio (mg/L).

Se puede observar que existe un dato anómalo, para el cual la concentración del elemento uranio resulta cuatro veces por encima de los valores obtenidos para el resto de los pozos. Este valor es ubicado en las cercanías de El Perico, mientras las demás concentraciones obtenidas para este elemento se distribuyen preferencialmente en la zona central del área de estudio, en el sector El Manganeseo. A pesar de ello, los valores registrados en toda la zona resultan altos, por lo que resulta difícil delimitar un área de influencia específica; sin embargo, los datos obtenidos para el estroncio (favorecido en fase carbonática) concuerdan con los mayores valores de concentración obtenidos para las especies calcio y magnesio, especies distribuidas preferencialmente en las muestras 2-6-7-8-9-10-11-12-13 y 18, correspondientes a los pozos Juan de Dios (escuela), Las Moreas, La Reforma, Santa Teresita, El Manganeseo, La Esperanza, El Manguito, Guanaraparo y Dr. Eduardo, junto al aljibe Santa Teresita.

De acuerdo a los valores de concentración obtenidos en el análisis de estroncio, se puede concluir que el área de influencia de la litología carbonática posiblemente esté abarcando hasta los pozos Don Enrique y Dr. Eduardo, ubicados en las adyacencias del sector El Perico. Para estos pozos, la cantidad de estroncio (comparada con los valores obtenidos para el sector El Manganeso) se ve disminuida, permitiendo así realizar un posible planteamiento, esto apoyado en la observación de Saavedra ⁽⁵⁸⁾, sugiriendo una influencia del mismo cuerpo de roca mármol – dolomítico pero con un mayor grado de metamorfismo que el presentado para el sector El Manganeso.

Por otra parte, el pozo Juan de Dios (escuela), ubicado en el sector El Palmar, presenta concentraciones ubicadas por debajo de las reportadas en el sector El Manganeso y por encima de las encontradas en los pozos Don Enrique y Dr. Eduardo. Adicionalmente a este pozo le corresponde el más alto valor de concentración obtenida para el manganeso y uno de los más elevados para el calcio, el cual resulta el catión mayoritario en este caso. El comportamiento del agua de este pozo, parece estar indicando una influencia carbonática diferente a la imperante en el área, lo que pudiese estar asociado a la presencia de un cuerpo de roca carbonática distinta al mármol de estudio, o a una influencia del cuerpo mármol – dolomítico con mayor grado de metamorfismo que el presentado en el sector El Manganeso y un grado metamórfico menor al presentado por los pozos ubicados en las adyacencias del sector El Perico.

10.- Caracterización hidrogeoquímica

10.1.- Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es una herramienta utilizada para la clasificación e interpretación de los análisis químicos basados en la concentración que presentan las especies químicas principalmente mayoritarias, en estudios realizados a distintos tipos de agua. Adicionalmente, este diagrama permite inferir posibles procesos involucrados o responsables de dicha composición, así como procesos de mezclas de las masas de agua, tanto como procesos de evolución de las mismas. ^{(21) (55) (57)}

El diagrama de Piper obtenido para las (19) diecinueve muestras de agua superficiales y subterráneas captadas en la zona de estudio, es presentado en la figura 62, mostrada a continuación.

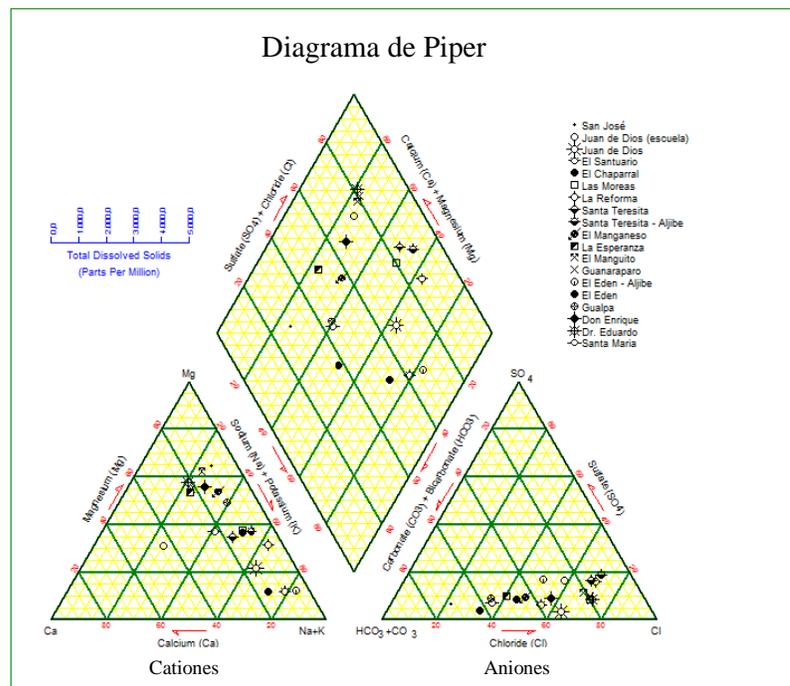


Figura 62: Diagrama de Piper.

En el presente diagrama se pueden observar (4) cuatro tipos de agua asociadas a la zona de estudio:

- a) Cloruro de sodio
- b) Cloruro de magnesio y/o calcio
- c) Bicarbonato de sodio
- d) Bicarbonato de magnesio y/o calcio.

La distribución de las mismas es presentada en la tabla 18 mostrada a continuación.

Tabla 18: Clasificación de las aguas captadas en el área de estudio según el Diagrama de Piper.

Bicarbonatadas	Bicarbonatadas	Cloruradas y/o Sulfatadas	Cloruradas y/o Sulfatadas
Sódica	Cálcica y/o Magnésica	Sódica	Cálcica y/o Magnésica
El Edén Aljibe	Santa María	Juan de Dios 3	Juan de Dios 2
	San José	El Santuario	El Manganeseo
	Gualpa	El Chaparral	El Manguito
		Las Moreas	Guanaraparo
		La Reforma	Dr. Eduardo
		Santa Teresita	Don Enrique
		Santa Teresita Aljibe	La Esperanza
		El Edén	

El tipo de agua predominante corresponde a **cloruro de sodio**, presentándose en un 42% del total de las muestras captadas en el área de estudio, distribuido preferencialmente en el sector El Manganeseo, en las cercanías del cuerpo dolomítico.

Estos resultados difieren de los presentados por Nevado ⁽⁵⁷⁾, quien describe que el grupo predominante de agua para la zona noreste del estado Bolívar es bicarbonatada cálcica y/o magnésica, con un bajo porcentaje de aguas tipo cloruro de sodio, correspondiente a sólo tres pozos de agua captados en zonas que coinciden con nuestra área de estudio. Adicionalmente, la autora atribuye las aguas

de tipo bicarbonato de calcio y/o magnesio a las que percolan a través de las rocas máficas de la Provincia de Pastora; mientras que las del tipo bicarbonato de sodio las atribuye a las que drenan sobre las rocas félsicas presentes en ambas provincias.

Por otra parte, Fritz y Frapé ⁽⁴⁷⁾ señalan que las aguas salinas son concentradas en el vértice inferior derecho del triangulo correspondiente al campo de los aniones. En base a esto, el diagrama de Piper obtenido para las muestras de agua captadas en la zona de estudio, permite proponer un posible proceso de mezclas entre masas de aguas subterráneas con aguas de origen salino con un amplio tiempo de residencia en el acuífero donde la tasa de recarga es baja. Nevado ⁽⁵⁷⁾, por su parte, sugiere un posible contacto entre las aguas de origen meteórico con sustratos previamente sometidos a arduos procesos hidrotermales.

10.2.- Figuras de Stiff

Las figuras de Stiff obtenidas para las aguas subterráneas captadas en la zona de estudio son presentadas en el apéndice J. Éstas permiten identificar principalmente dos orígenes para las masas de agua del área. El primer grupo de aguas corresponden a las muestras 2-6-7-8-9-10-11-12-13-17 y 18, mientras que las aguas pertenecientes al segundo grupo comprenden las muestras de agua 1-3-4-5-14-15-16 y 19.

El primer grupo de aguas se caracteriza por presentar altos valores de conductividad y cantidad de sólidos totales disueltos, con una relación molar entre las especies Na^+/Cl^- menor o muy cercano al valor de la unidad, indicando así la presencia de aguas salobres posiblemente con un origen asociado a mezclas entre fuentes de agua dulce con paleoaguas. Nevado (1997) ⁽⁵⁷⁾ añade que podría existir una percolación de las mismas a través de depósitos altamente mineralizados debido a actividad hidrotermal, causando la solubilización de los mismos. ⁽⁵⁷⁾

Por otra parte, el segundo grupo de aguas presenta un comportamiento característico de origen meteórico, con valores de conductividades distribuidos en un amplio rango, abarcando desde los 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta llegar a un valor de 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La cantidad de sólidos disueltos totales permite catalogarlas en su mayoría como aguas dulces.

Estos resultados presentan un comportamiento similar al presentado por Nevado ⁽⁵⁷⁾, quien concluye que la variedad de figuras generadas para el área de estudio, indican que los procesos involucrados son diversos y deben manejarse de acuerdo a los grupos de agua generados.

11.- Calidad del agua para uso potable.

Los datos obtenidos fueron comparados por los valores establecidos en el Decreto 475 (98) del Ministerio de Salud ⁽⁶⁶⁾, en donde se expiden normas técnicas referidas a la calidad del agua potable, desde un punto de vista físico, organoléptico, microbiológico y químico.

Las especies Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , NO_3^- , Ca^{+2} y Mg^{+2} muestran una afección en el área de estudio. Según los máximos permitidos en la norma, las aguas captadas en el área de estudio presentan la siguiente cualidad.

Tabla 19: Características del agua captada en el área de estudio, para fines domésticos.

Parámetro	Valor ideal (mg/L)	Muestra Excedente	Condición
Calcio	60	2-6-7-8-9-11-12-13-18	No aptas para uso potable
Alcalinidad	100	2-5-6-7-8-9-10-11-12-13-15-16-17-18-19	No aptas para uso potable
Cloruro	250	2-6-7-8-9-10-12-13-18	No aptas para uso potable
Hierro	0,3	-	Aptas para uso potable
Magnesio	36	2-6-7-8-9-10-11-12-13-16-17-18	No aptas para uso potable
Manganeso	0,1	2-7-14	No aptas para uso potable
Sulfato	250	7-8-9-12	No aptas para uso potable
Aluminio	0,2	14-16	No aptas para uso potable
Bario	0,5	-	Aptas para uso potable
Nitrato	10	3-5-6-7-10-12-13-16-17-18	No aptas para uso potable

Debido a la existencia de muestras de agua no aptas para el uso potable, se procedió a comparar los valores de concentración obtenidos para los parámetros determinados con la norma establecida en el Decreto 883 del Ministerio del Ambiente y de Recursos Naturales, a fin de sugerir un destino apto para las mismas.

12.- Uso del agua según su calidad.

La calidad de las muestras de agua captadas en el área de estudio es evaluada atendiendo a los intervalos de concentración obtenidos para cada una de las especies químicas determinadas, tomando como valores estándar los presentados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales.

En el capítulo II - Sección II del **Decreto 883 de la Gaceta Oficial** se encuentran establecidas los criterios de calidad para el uso del agua. La clasificación de las mismas en base al uso se presenta a continuación.

- a) **Clase 1 o excelente**
- b) **Clase 2 o muy buena**
- c) **Clase 3 o buena**
- d) **Clase 4 o aceptable.**

Las concentraciones determinadas para las especies Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} y la magnitud de los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad muestran una afección para todas las especies localizadas.

El ión bicarbonato presenta una concentración ubicada por encima del límite máximo permitido (370 mg/L) para las aguas de clase 1, 2, 3 y 4, lo que conlleva a clasificar estas aguas **por debajo del límite aceptable** para un total de 8 muestras (6-7-8-9-10-11-12-18)

Por su parte, el ión cloruro presenta una concentración ubicada por encima del límite superior permitido por la norma (300 mg/L para agua tipo clase 1) para un total de 8 muestras de agua (2-6-7-8-9-10-12-13-18), ubicando a las mismas por encima del máximo permitido para aguas clase 2 o 3, lo que permite clasificar a las mismas como aguas **clase 4 o Aceptables**. Es importante resaltar que siete de las muestras coinciden con el comportamiento presentado por el ión bicarbonato.

En la misma línea de ideas, al comparar las concentraciones del ión sodio con el máximo permitido por la norma (140 mg/L), se encuentra un número de seis muestras (6-7-8-9-10-12-18) ubicadas por encima del mismo, el cual es presentado como máximo para aguas clase 1, 2 o 3. Esto conlleva a clasificar a estas aguas como **clase 4 o Aceptables**. Estas muestras presentan un comportamiento similar para las especies químicas bicarbonato y cloruro.

El ión magnesio, por su parte, presenta un valor de concentración ubicado por encima del máximo permitido por la norma (70 mg/L) para la clasificación de aguas clase 1,2 y 3, en un total de once muestras, lo que permite clasificar a estas aguas como **clase 4 o Aceptables**. De igual forma, el magnesio presenta un comportamiento similar al presentado por el bicarbonato, cloruro y sodio. Es importante resaltar que para los dos pozos comunitarios principales (San José y El Edén) son atribuidos los menores valores de concentración de la especie, lo que permite caracterizar a estas aguas como las más blandas en la zona de estudio. Este hecho tiene gran relevancia en esta investigación debido a la relación establecida (aún no bien definida) entre la dureza del agua y la adquisición y/o desarrollo de enfermedades cerebro y cardiovasculares ^{(14) (15) (29) (50)}, las cuales representan un importante índice de morbilidad.

Por otra parte, el ión calcio presenta concentraciones ubicadas por encima del límite superior permitido por la norma (200 mg/L como máximo permitido en aguas clase 1, 2 o 3) para un total de cuatro muestras, por lo que las mismas se clasifican como aguas **clase 4 o Aceptables**. Las cuatro muestras ubicadas por encima del máximo presentan un comportamiento semejante al observado para los iones bicarbonato, cloruro, sodio y magnesio. Adicionalmente, es importante resaltar que para los dos pozos comunitarios principales (San José y El Edén) se atribuyen los menores valores de concentración de la especie (comportamiento similar presentado por el magnesio), lo que permite caracterizar a estas aguas como las más blandas en la zona de estudio, hecho asociado de forma no bien definida al desarrollo de enfermedades con un alto índice de morbilidad. ^{(14) (15) (29) (50)}

El ión potasio, para dos de las muestras captadas en la zona de estudio (9-10), presenta valores de concentración ubicados por encima del máximo permitido por la norma (20 mg/L) para la clasificación de aguas clase 1, 2 y 3, por lo que las mismas son definidas como aguas **clase 4 o Aceptables**. Estas aguas aceptables también presentan elevadas concentraciones para los iones bicarbonato, cloruro, sodio, magnesio y calcio.

En la misma línea de ideas, los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad, así como la concentración de sólidos disueltos, presentan muestras por encima y por debajo de los máximos y mínimos permitidos. Por su parte, el pH presenta para un total de 8 muestras (1-3-4-5-6-8-15-17), valores ubicados por debajo del límite inferior presentado por la norma (6,5) para la clasificación de aguas clase 1, 2 y 3, por lo que las mismas son catalogadas como aguas **clase 4 o Aceptables**.

La conductividad, por su parte, presenta para un total de 8 muestras (2-6-7-8-9-12-13-18) con valores ubicados por encima del máximo permitido por la norma para la clasificación de aguas clase 1 y 2 (valor máximo 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que conlleva a clasificar a estos cuerpos de agua entre la **clase 3 o Buena y clase 4 o Aceptable**.

Por su parte, la concentración de los sólidos disueltos totales presenta como máximo permitido para la clasificación de aguas tipo 1, 2 o 3 un valor de 1300 mg/L, sin embargo para el área de estudio, un total de 8 muestras (2-6-7-8-9-10-12-18) presenta valores de concentración ubicados por encima de la norma, lo que conlleva a clasificar a las mismas como aguas **clase 4 o Aceptables**.

La norma establece que para clasificar las aguas como clase 1 o 2, la concentración del ión nitrato no debe exceder de 10 mg/L; sin embargo, en diez de las muestras captadas para la zona de estudio (3-5-6-7-10-12-13-16-17-18) los valores de concentración obtenidos se ubican por encima del máximo permitido, lo que conlleva a clasificar estas aguas entre **clase 3 o Buenas y clase 4 o Aceptables**.

Los valores de concentración obtenidos para el ión sulfato muestran la existencia de dos pozos y un aljibe (7-8-9) ubicados por encima del máximo valor permitido (340 mg/L) para la clasificación de los mismos como aguas clase 1, 2 o 3, lo que conlleva a clasificar a estas muestras como de **clase 4 o Aceptables**. Es importante destacar que estas muestras de agua también presentan un alto contenido en los iones cloruro, bicarbonato, sodio, magnesio, calcio y potasio, así como elevados valores en el parámetro conductividad y contenido en sólidos disueltos.

Únicamente las muestras Edén Aljibe y Santa María, presentan valores obtenidos que se encuentran dentro de los máximos permitidos por la norma, lo que conlleva a clasificar a estas aguas como **clase 1 o Excelentes**, lo que establece que las mismas resultan ser óptimas en cuanto a calidad, para un uso de consumo y doméstico principal. A continuación, en la tabla 20 se presenta la clasificación de las aguas pertenecientes a la zona de estudio según la norma establecida en el Decreto 883 de la Gaceta Oficial.

Tabla 20: Clasificación de las aguas captadas en la zona de estudio según su calidad.

Muestra	Parámetro fuera del límite permitido	Tipo de Agua
San José	pH	Aceptable o Clase 4
Juan de Dios (Escuela)	Conduct/TSD/HCO ₃ ⁻ /Cl ⁻ /Mg ⁺² /Ca ⁺²	Por debajo del límite Aceptable
Juan de Dios	pH/NO ₃ ⁻	Aceptable o Clase 4
El Santuario	pH	Aceptable o Clase 4
El Chaparral	pH/NO ₃ ⁻	Aceptable o Clase 4
Las Moreas	pH/Conduct/TSD/HCO ₃ ⁻ /Cl ⁻ /Na ⁺ /Mg ⁺² /NO ₃ ⁻	Por debajo del límite Aceptable
La Reforma	Conduct/TSD/HCO ₃ ⁻ /Cl ⁻ /Na ⁺ /Mg ⁺² /NO ₃ ⁻	Por debajo del límite Aceptable
Santa Teresita	pH/Conduct/TSD/HCO ₃ ⁻ /Cl ⁻ /Na ⁺ /Mg ⁺² /Ca ⁺²	Por debajo del límite Aceptable
Santa Teresita Aljibe	Conduct/TSD/HCO ₃ ⁻ /Cl ⁻ /Na ⁺ /Mg ⁺² /Ca ⁺² /K ⁺	Por debajo del límite Aceptable
El Manganeseo	TSD/HCO ₃ ⁻ /Na ⁺ /Mg ⁺² /K ⁺ /NO ₃ ⁻	Por debajo del límite Aceptable
La Esperanza	HCO ₃ ⁻ /Mg ⁺²	Por debajo del límite Aceptable
El Manguito	Conduct/TSD/HCO ₃ ⁻ /Cl ⁻ /Na ⁺ /Mg ⁺² /NO ₃ ⁻	Por debajo del límite Aceptable
Guanaraparo	Conduct/Cl ⁻ /Mg ⁺² /NO ₃ ⁻	Aceptable o Clase 4
El Edén Aljibe	Ninguno	Excelente o Clase 1
El Edén	pH	Aceptable o Clase 4
Gualpa	NO ₃ ⁻	Buena o Clase 3
Don Enrique	pH/Mg ⁺² /NO ₃ ⁻	Aceptable o Clase 4
Dr. Eduardo	Conduct/TSD/HCO ₃ ⁻ /Cl ⁻ /Na ⁺ /Mg ⁺² /Ca ⁺² /NO ₃ ⁻	Por debajo del límite Aceptable
Santa María	Ninguno	Excelente o Clase 1

13.- Conclusiones

- 1) Los sólidos disueltos totales (SDT) obtenidos para cada una de las muestras captadas en el área de estudio, permiten identificar dos grupos de agua principalmente: aguas dulces y aguas salobres. Las aguas dulces se ubican hacia los poblados El Perico y El Palmar, ubicados a los extremos este y oeste de la zona en estudio; mientras que las masas de agua salobre se distribuyen preferencialmente en el sector El Manganeso, en las adyacencias del cuerpo rocoso mármol-dolomítico.
- 2) En la zona de estudio se identificó la presencia de (4) cuatro tipos de agua presentes en el área de estudio: bicarbonatadas sódicas, cloruradas magnésicas y/o cálcicas, bicarbonatadas magnésicas y/o cálcicas y cloruradas sódicas, presentándose esta última en un 42% del total de las muestras.
- 3) Fueron identificados (2) dos grupos de agua, donde las mismas se describen como de origen fósil (o prolongado tiempo de residencia del agua en el acuífero) (muestras 2-6-7-8-9-10-11-12-13-17 y 18) y de origen meteórico (muestras 1-3-4-5-14-15-16 y 19).
- 4) Las relaciones interelementales permitieron proponer los procesos de interacción agua-roca y el aporte meteórico como principales responsables de la composición química de las aguas pertenecientes al área de estudio.
- 5) Para las muestras captadas en el área de estudio, el proceso de intercambio iónico presenta una buena contribución para la mayoría de las muestras, indicando que el proceso se encuentra operando.

- 6) Por medio del cálculo del coeficiente de variación, se estableció que el orden de variabilidad de las especies fisicoquímicas determinadas en el presente estudio es el siguiente: $\text{Na}^+ > \text{SO}_4^{-2} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Cond.} > \text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{+2} > \text{NO}_3^- > \text{SiO}_2 > \text{pH} > \text{Temp}$, lo cual es atribuido al control que ejercen las solubilidades relativas de las especies minerales presentes en el area de estudio, junto a la influencia de factores antrópicos, meteorización geoquímica de zonas altamente mineralizadas y procesos de evaporación y precipitación.
- 7) El área de influencia del mármol dolomítico fue evaluado por la relación interelemental entre las especies iónicas calcio y estroncio, junto a la presencia del elemento uranio, el cual fue determinado en grandes concentraciones (como valor anómalo) en el extremo oeste de la zona de estudio, en el pozo Dr. Eduardo, en las cercanías de Upata.
- 8) Finalmente, las aguas captadas en la zona de estudio resultan no ser aptas para uso potable según el Decreto 475, siendo en su mayoría de **clase 4 o Acceptables** según el Decreto 883 del MRNA, lo que las destina preferencialmente a usos industriales, comercio, paisaje y navegación.

14.- Recomendaciones

- 1) Realizar estudios que comprendan la aplicación de isótopos estables a fin de determinar el tiempo de residencia de las aguas en el acuífero.
- 2) Emplear técnicas y métodos geofísicos en el área de estudio, que permitan definir zonas de interconexión, recarga y descarga en y entre los acuíferos pertenecientes al área.
- 3) Realizar un análisis microbiológico en las aguas de la zona de estudio, a fin de evaluar si la calidad de las mismas resulta apta para los usos predestinados, específicamente el doméstico.

15.- BIBLIOGRAFÍA

- ¹ Earth's water distribution. U.S. Geological Survey. Consultado el 17 de mayo 2007.
- ² World water resources at the beginning of the 21st century. UNESCO. Consultado el 30 de abril de 2009.
- ³ Tarbuck, E.J. y Lutgens, F.K. (1999). Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física. Sexta Edición. Editorial PRENTICE Hall. 616p.
- ⁴ Tejada, G.A. (1993). Vocabulario Geomorfológico. Ediciones Akal. 184 p.
- ⁵ Méndez, J. (2003). Geología Física. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas-Venezuela.
- ⁶ Drever, J. (1997). The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments. Tercera edición. Editorial PRENTICE Hall, INC. 436 p.
- ⁷ Zaporozec, A. (1972). Graphical interpretation of water quality data. Groundwater. Vol. 10. N° 2.
- ⁸ Hem, J.D. (1970). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Segunda edición. Geological Survey Water supply. Paper 2254. 263p.
- ⁹ Roy, S., Gaillardet, J. Y Allegre, J. (1999). Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine River, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 63 N° 9. Pp. 1277-1292.
- ¹⁰ Doménico, P. Y Schwartz, F. (1990). Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons. 824 p.

-
- ¹¹ Gupta, D.C. (1999). Environmental aspects of selected trace elements with coal and natural waters of pench Valley coalfield of India and their impact on human health. *International Journal of coal Geology*. N° 40. pp. 133-149.
- ¹² Jin, L., Williams, E., Szramek, K., Walter, L. Y Hamilton, S. (2007). Silicate and carbonate mineral weathering in soil profiles developed on Pleistocene glacial drift (Michigan, USA): Mass balances based on soil water geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 72. Pp. 1027-1042.
- ¹³ Kim, K., Kim, S., Park, S., Kim, S. Y Choi, M. (2010). Processes controlling the variations of pH, alkalinity, and CO₂ partial pressure in the porewater of coal ash disposal site. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 181. Pp. 74-81.
- ¹⁴ Dissanayaka, C.B. y Chandrajith, R. (1999). Medical Geochemistry of tropical environments. *Earth- Science Reviews*. Vol. 47. Pp. 219-258.
- ¹⁵ Tommaso, T. (2008). Patologías asociadas a la distribución natural de selenio, calcio y magnesio sobre la corteza terrestre. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV). *INTERCIENCIA*. Vol. 33. N° 3.
- ¹⁶ Yang, C.Y., Chang, C.C., Tsai, S.S. y Chiu, H.F. (2006) Calcium and magnesium in drinking water and risk of death from acute myocardial infarction in Taiwan. Vol. 101.
- ¹⁷ Mason, B. Y Moore, C., (1966). Principles of Geochemistry. Tercera edición. John Wiley & Sons, INC. New York. 329 p.
- ¹⁸ Rankama, K. y Sahama, TH., (1954). Geoquímica. Tercera edición. Ediciones Aguilar, S.A. 862 p.

-
- ¹⁹ Lo Mónaco, S. y López, L. (2004). Apuntes personales (sin publicar). Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas-Venezuela.
- ²⁰ Todd, D., (1959). Ground Water Hydrology. Toppan Company. John Wiley & Sons, INC. 336p.
- ²¹ Custodio, E y Llamas, R., (1976). "Hidrología Subterránea". Tomo I y II.
- ²² Skoog, D., West, D., Holler, J. y Crouch, S. (2005). Fundamentos de Química Analítica, Octava edición.
- ²³ Langmuir, D., (1997). Aqueous environmental geochemistry. Editorial PRENTICE Hall. Colorado School of Mines. 600p.
- ²⁴ Pérez, I. y Rodríguez, D., (2006). Recursos Hídricos de Venezuela. Primera Edición. Sky Visión Publicidad.
- ²⁵ Drovenik, F., Krulc, Z., Tajder, M. y Talic, S., (1967). Menas manganesíferas de la región de Upata, Boletín de geología, Vol. 8. N°17,163p.
- ²⁶ Jirakova, H., Huneau, F., HKeal, Z. y Celle-Jeanton, H. (2009). Carbón isotopes to constrain the origin and circulation pattern of groundwater in the north-western part of the Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic). Applied Geochemistry. Vol.25. pp.1265-1279.
- ²⁷ Halim, M., Majumder, R., Nessa, S., Hiroshiro, Y., Sasaki, K., Saha, B., Saepuloh, A. y Jinno, K., (2010). Evaluation of processes controlling the geochemical constituents in deep groundwater in Bangladesh: spatial variability on arsenic and boron enrichment. Journal of Hazardous Materials. Vol. 180. Pp. 50–62.

-
- ²⁸ Bavera, G., Rodríguez, E., Beguet, H., Bocco, O. y Sánchez, J., (1979). Aguas y Aguadas. Primera edición. Editorial Hemisferio Sur. 284p.
- ²⁹ Kousa, A.; Havulinnab, A.; Moltchanovab, E.; Taskinenb, O.; Nikkarinena, M.; Salomaab, V. Y Karvonenb, M. (2007). Magnesium in well water and the spatial variation of acute myocardial infarction incidence in rural. Applied Geochemistry. Vol. 23. Pp. 632-640.
- ³⁰ Brown, T., LeMay, E. y Bursten Bruce., (1998). Química La Ciencia Central. Séptima edición. PRENTICE HALL, México. 1096 p.
- ³¹ <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/k.htm#ixzz15TBN7gll>
- ³² <http://www.natursan.net/potasio-que-es-el-potasio-y-sus-beneficios-en-la-salud/>
- ³³ Klein, C. y Hurlbut, C. (2001) Manual de Mineralogía, cuarta edición. España, Barcelona: Editorial Reverté, S.A. Vol. 2. 392p.
- ³⁴ Méndez, J. (2006). Petrología. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas-Venezuela. 363p.
- ³⁵ Pirastru, M. y Niedda, M. (2010). Field monitoring and dual permeability modelling of water flow through unsaturated calcareous rocks. Journal of hydrology. 47 p.
- ³⁶ Mastrocicco, M., Colombani, N., Salemi, E. y Castaldelli, G. (2010). Numerical assessment of effective evapotranspiración from maize plots to estimate groundwater recharge in lowlands. Agricultural Water Management. Vol. 97. Pp.1389-1398

³⁷ Yavuz, H., Altindag, R., Sarac, S., Ugur, I. y Sengun, N. (2006). Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Vol.43. pp 767-775.

³⁸ Birkeland, P., (1999). *Soils and geomorphology*. Tercera edición. New York: Oxford University Press. 346 p.

³⁹ Briceño, H., (1979). Meteorización y lateritas, Laterización del dique de Komoirán, Edo Bolívar. Trabajo de ascenso. Inédito. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Instituto de Ciencias de la Tierra. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas-Venezuela.

⁴⁰ Urrutia, M., Graña, J., García-Rodeja, R. y Macías, F., (1987). Procesos de oxidación de piritas en medios superficiales: potencial acidificante e interés para la recuperación de suelos de mina >> Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad Santiago- Santiago de Compostela.

⁴¹ Martínez, J.R., (2003). *Geología Estructural y Dinámica Global*. Departamento de geología universidad de Salamanca.

⁴² <http://www.ucm.es/info/diciex/programas/las-rocas/fotos/rocas/esquisto.jpg>

⁴³ <http://www.pdvsa.com/lexico/image/i3-11.gif>

⁴⁴ <http://edafologia.ugr.es/rocas/fotos2/marm72e.gif>

⁴⁵ Beaucaire, C; Gassama, N.; Tresonne, N. y Louvat, D. (1999). Saline groundwaters in the Hercynian granites (Chardon Mine, France): geochemical evidence for the salinity origin. *Applied Geochemistry*. Vol. 14. Pág. 67-84.

⁴⁶ Brousted, L.; Marlin, C.; Dever, L. (1997). Geochemisry and residence time estimation of groundwater from the upper aquifer of the Chihuahua Desert (Comarca Lagunera, Northern Mexico). *Applied Geochemistry*. Vol. 12. Pág. 775-786.

⁴⁷ Frape, S.; Fritz, P.; Mcnutt, R., (1984). Water-Rock interaction and chemistry of groundwaters from the Canadian Shield. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 48. Pág. 1617-1627.

⁴⁸ Jalali, M. (2007). Hydrochemical identification of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the Chah basin in Western Iran. *Environ Monit Assess*. Vol. 130. Pág. 347-364.

⁴⁹ Rajmohan, N. Y Elango, L. (2006). Hydrogeochemistry and its relation to groundwater level fluctuation in the Palar and Cheyyar river basins, Southern India. *Hidrogeological Processes*. Vol. 20. Pág. 2415-2427.

⁵⁰ Hirotoishi Morii, Ken-ichi Matsumoto, Ginji Endo, Mieko Kimura y Yoshimoto Takaishi (2006). Nuevas perspectivas en la búsqueda de Magnesio. *Nutrición y Salud*. Editorial Springer-Verlag. Capítulo II. Pág. 11-18.

⁵¹ Montero, R., (1996). Caracterización hidrogeoquímica de aguas subterráneas asociadas a zonas de explotación de hidrocarburos. Trabajo de ascenso. Facultad de Ciencias. Instituto de Ciencias de la Tierra. Universidad Central de Venezuela. 208 p.

⁵² Zambrano, F. (1999). Caracterización geoquímica de las Aguas Subterráneas en el estado Táchira. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela.

⁵³ Faublack, A. (2008). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de los sectores Barbacoas, Edo. Aragua y Cachamas, Edo. Guárico, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV). 109 p.

⁵⁴ Reina, V. (2011). Caracterización química inorgánica de los lixiviados del relleno sanitario "La Bonanza". Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 111p.

⁵⁵ Ferreira, L. (2007). Caracterización geoquímica de las aguas subterráneas del sector Monte Oscuro-Caño el Diablo y la zona central del sistema de riego del Río Guárico, estado Guárico, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV). 140 p.

⁵⁶ Fernández, M, (2006). Estudio de la distribución de Ca, Mg, Fe, Mn, Na, K, en rocas frescas y meteorizadas del mármol dolomítico de Guacuripia. Upata. Estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV).

⁵⁷ Nevado, N. (1999). Caracterización Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas asociadas a rocas ígneo-metamórficas en la región noreste del estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas-Venezuela.

⁵⁸ Saavedra, D. (2006). Estudio geoquímico del mármol dolomítico de Guacuripia y sus productos de alteración, Upata, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas-Venezuela.

⁵⁹ Godoy, M. (2007). Distribución vertical de los elementos Ca, Mg, Fe, Mn, Al, Si, Sr, Ti, P, y U en un horizonte laterítico desarrollado sobre el mármol dolomítico de Guacuripia, Estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas-Venezuela.

⁶⁰ Morantes, J., (1997). Estudio Hidrogeoquímico en la cuenca del Cuyuní, estado Bolívar, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 138 p.

⁶¹ González, C., Iturralde, P. y Picard, X., (1980). Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas. Tomo 1. Pp 31-38.

⁶² Léxico Estratigráfico de Venezuela (1999). PDVSA, Intevep.

⁶³ Rodríguez, D. (2000). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la zona La Fuente – Paraguachí, Isla de Margarita, Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela.

⁶⁴ Yanes, C. (1997). “Estudio geoquímico regional de los ríos del Escudo de Guayana, tesis doctoral”. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Instituto de Ciencias de la Tierra-Facultad de Ciencias y Escuela de Geología, Minas y Geofísica-Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas-Venezuela.

⁶⁵ Vargas, M. (1993). Estudio geoquímico y mineralógico de yacimientos auríferos en la región del Callao, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias, UCV, 100p.

⁶⁶ Decreto 475. (1998). Normas técnicas de calidad del agua potable. Capítulo III: Normas organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable. <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/waterquality/standards/current/index.cfm>

⁶⁷ Davis, S.; De Wiest, R. (1971). Hidrogeology. Ediciones Ariel. 563 p.

APENDICE A

Tabla A: Ubicación geográfica y parámetros fisicoquímicos de los puntos de muestreo.

Pozo	UTM N	UTM E	pH	Profundidad (m)	Temperatura (°C)	Conductividades (μS/cm)	SDT (ppm)
San José	889977	624903	5,4	36	27,65	104,65	145,46
Juan de Dios (escuela)	887705	623220	6,8	-	32,55	2084	1439,47
Juan de Dios	887499	622957	5,4	40	29,2	199,8	185,23
El Santuario	887177	607529	6,1	57	34,4	372,5	303,29
El Chaparral	885621	603873	6,2	-	31,5	396	371,68
Las Moreas	884143	601894	5,4	15	26,25	7615	3350,03
La Reforma	883070	599477	7,1	6-10	26,95	10000	7031,75
Santa Teresita	881957	596663	6,3	35	27,1	7410	4670,96
Santa Teresita Aljibe	881957	596663	6,8	13	27,2	8990	6052,72
El Manganeso	881662	594453	7,8	80	28	1768,5	1306,42
La Esperanza	882237	594672	7,3	12	27,1	1467	1100,34
El Manguito	883242	597204	7,1	12,5	27,8	5600	3575,17
Guamaraparo	883842	594943	7,8	SUPERFICIAL	26,85	2234	1193,94
El Eden Aljibe	883197	588148	6,6	6	27,1	324	238,41
El Eden	884032	587550	6,1	>100	25,95	477	426,71
Gualpa	880076	584263	7,6	SUPERFICIAL	26,1	642,5	517,95
Don Enrique	879650	582153	6,3	52	26,1	1354,5	906,95
Dr. Eduardo	880321	580275	6,5	30	26,7	4695	3046,38
Santa María	876936	577893	6,5	102	28,4	600	485,80

APENDICE B

Condiciones Experimentales

Tabla B: Condiciones experimentales empleadas en la técnica de espectrometría de absorción y emisión atómica con llama en el equipo Perkin Elmer AAnalyst200.

Elemento	λ (nm)	Ancho de la rendija	Corriente de la Lámpara	Combustible
Mg ⁺²	285	0.4	5 mA	Aire/Acetileno
K ⁺	766,49	0.4	-	Aire/Acetileno
Na ⁺	589,99	0.4	-	Aire/Acetileno

Tabla C: Condiciones experimentales empleadas en la técnica de cromatografía iónica en el equipo DX-100.

Fase Móvil	Carbonato/Bicarbonato
Proporción de Carbonato	1,8mM
Proporción de Bicarbonato	1,7mM
Columna Analítica	10 npack 4 x 250 mm
Modelo de Columna	AS4A-SC 10npack
Marca del Supresor	Dionex
Modelo del supresor	ASRS 300 P/N 064554
Flujo de fase móvil	1,5 μ L/min
Filtro de la jeringa	0,2 μ m
Elementos	Cl ⁻ SO ₄ ⁻² NO ₃ ⁻

Tabla D: Condiciones experimentales empleadas en la técnica de espectrometría de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado por el método analítico Agua-Trazas.

Nebulizador	Meinhard
Potencia	1000 W
Plasmógeno	12 L/min
Flujo del Nebulizador	0,02 L/min
Volumen de inyección	1 mL/L
Presión del Nebulizador	1 Bar
Velocidad de bombeo	20 L/min

Tabla E: Longitudes de onda empleadas en la técnica de espectrometría de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado.

Elemento	λ (nm)
Al	396,15
Ba	455,40
Cu	324,75
Mn	257,61
Fe	259,94
Sr	407,77
Si	251,61
Ca	422,67
U	385,96
Zn	202,55

APENDICE C

Método y Curvas de Gran

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
Licenciatura en Geoquímica
HIDROGEOQUIMICA

Determinación de la alcalinidad

Método de titulación con H_2SO_4 :

En un beacker de 100 mL se colocan 25 mL de muestra. Se verifica el pH con un pHmetro ajustado al sistema de titulación. Si el valor de pH es superior a 8,3, se titula con H_2SO_4 0,02 N hasta dicho valor, agitando constantemente. Se procede a anotar el volumen de ácido utilizado al alcanzar este valor de pH. Se continúa la titulación hasta alcanzar el pH de 4,5 y se anota el volumen gastado.

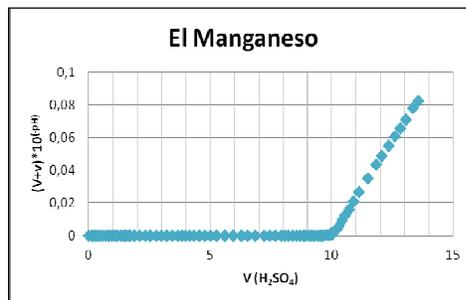
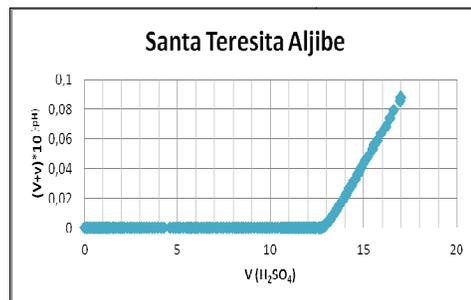
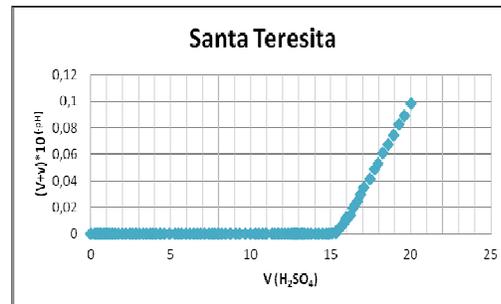
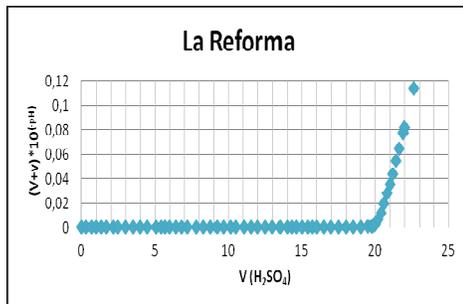
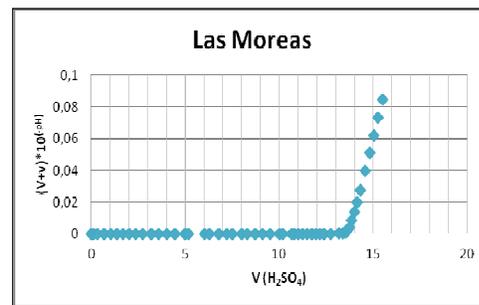
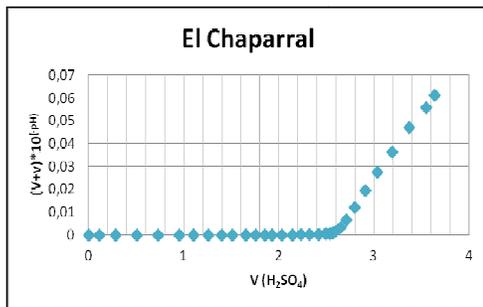
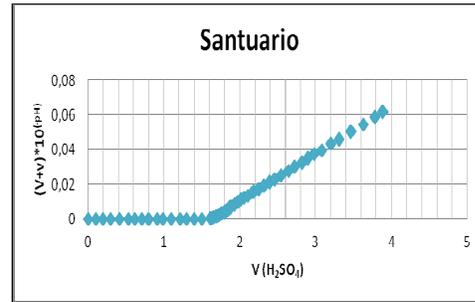
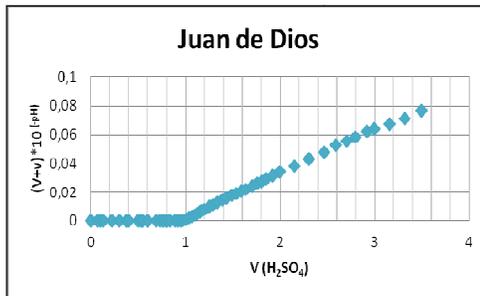
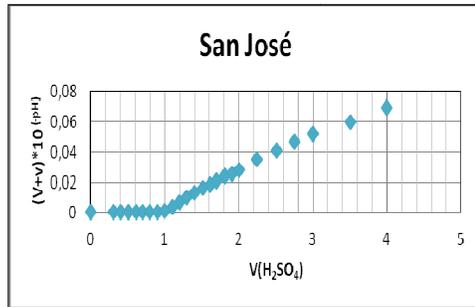
El gráfico de Gran presenta un valor para el punto final de la titulación cercano a 5, el cual es fácilmente visible al construir la gráfica $(V_{H_2SO_4} + V_{muestra}) \cdot 10^{(-pH)}$ frente a v , donde V es el volumen inicial de la muestra y v el volumen de ácido añadido. Por otra parte, la extrapolación hasta un valor de (0) cero en el eje de las ordenadas permite determinar el volumen de equivalencia en la titulación.

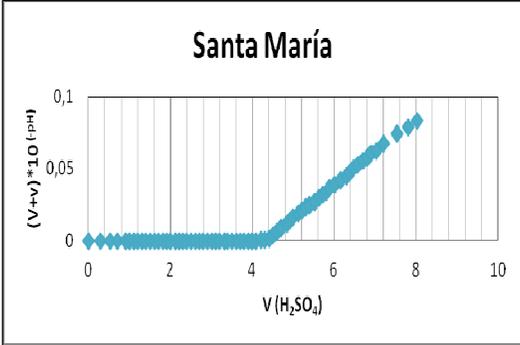
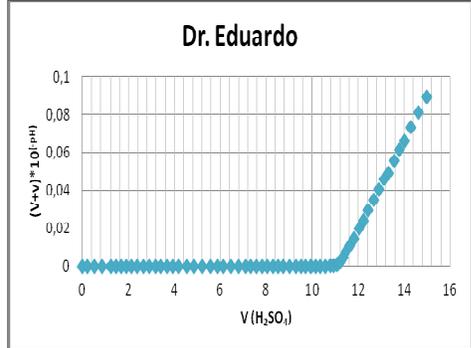
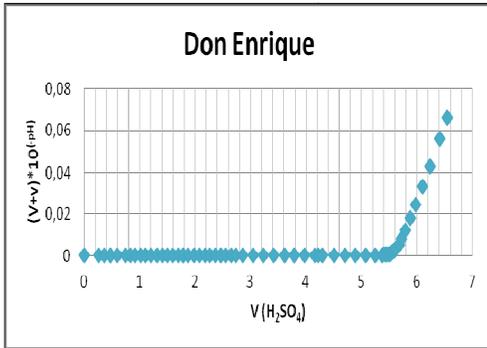
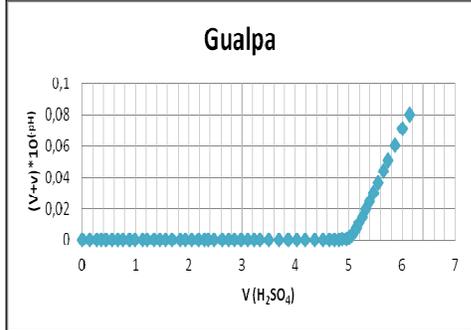
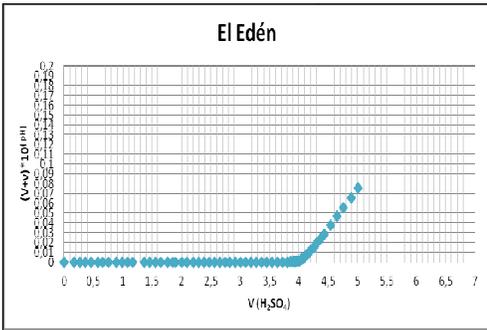
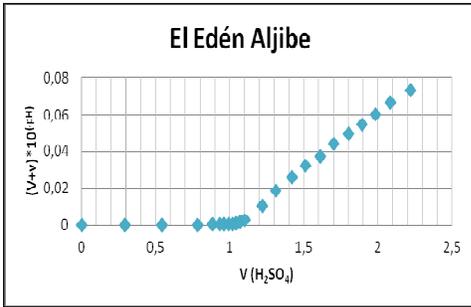
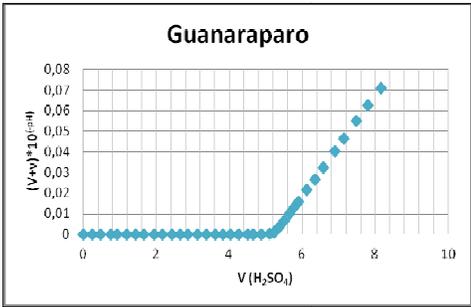
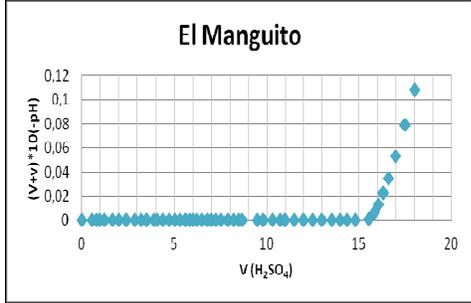
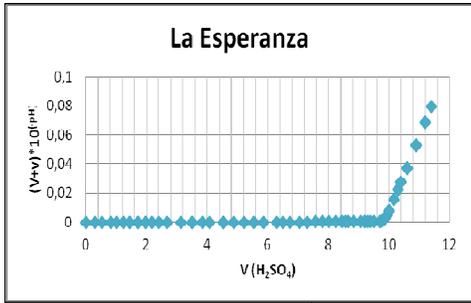
Una vez obtenido el volumen correspondiente al punto de equivalencia a través de la curva, se determina la alcalinidad total, expresada en mg $CaCO_3/L$, por medio de la sustitución del mismo en la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad mg } CaCO_3/L = ((A \cdot N \cdot 50000) / \text{mL de muestra})$$

Donde A representa los mililitros de titulante utilizados y N la normalidad del mismo.

Gráficas de Gran

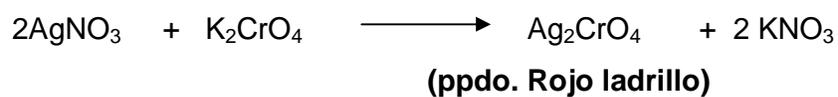
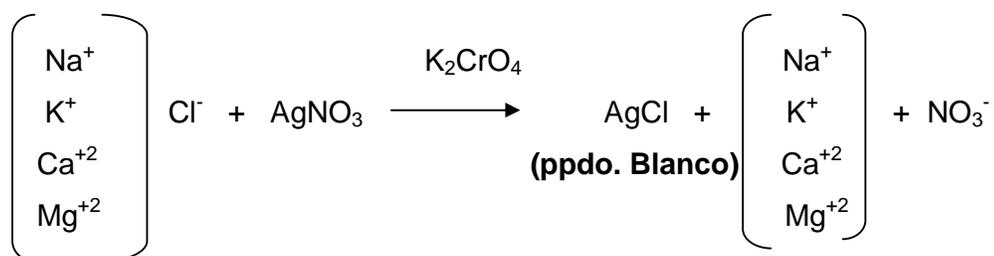




APENDICE D

Determinación de Cloruros

La reacción presentada a continuación muestra el proceso de formación del precipitado característico del punto final de titulación entre la muestra y el agente titulante AgNO_3 , utilizando K_2CrO_4 como indicador.



Una vez obtenido el punto de equivalencia, la concentración de cloruro presente en la muestra, expresada en miliequivalente por litro (meq/L), se obtiene por medio de la siguiente ecuación

$$\text{meq/L de Cl}^- = ((V * N * 1000) / (\text{mL de muestra}))$$

Donde V es la cantidad (en mL) de AgNO_3 y N la normalidad del mismo.

APENDICE E

Tabla F: Concentración de los cationes mayoritarios determinados para las muestras de agua captadas en la zona de estudio.

Estación	conductividad $\mu\text{S/cm}$	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	Ca ⁺² (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
San José	104,65	3,57	7,30	12,6	3,06	25,85
Juan de Dios (escuela)	2084	8,57	136,00	91,6	211,51	28,39
Juan de Dios	199,8	0,56	26,85	4,93	5,54	13,50
El Santuario	372,5	1,30	60,20	4,88	6,17	33,02
El Chaparral	396	2,32	63,80	5,61	11,84	33,56
Las Moreas	7615	6,74	670	265	137,21	22,04
La Reforma	10000	4,25	1825	480	138,34	32,04
Santa Teresita	7410	12,30	828,00	320	252,02	25,44
Santa Teresita Aijibe	8990	45,95	1470	549	212,21	24,90
El Manganeso	1768,5	52,60	152,00	154	58,97	15,78
La Esperanza	1467	7,12	88,7	111	78,28	29,97
El Manguito	5600	7,65	368,8	522,4	194,70	25,57
Guanaraparo	2234	15,90	75,55	105,55	68,46	14,85
El Edén Aijibe	324	13,20	43	4,05	2,49	28,12
El Edén	477	6,67	58,6	23,6	13,17	32,56
Gualpa	642,5	5,37	66,4	46,3	17,73	13,75
Don Enrique	1354,5	7,17	89	99,2	47,50	29,01
Dr. Eduardo	4695	15,90	305,00	458	282,33	32,11
Santa María	600	4,85	57,6	29,4	28,61	30,31

Tabla G: Concentración de los aniones mayoritarios determinados para las muestras de agua captadas en la zona de estudio.

Estación	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
San José	47,11	8,33	3,57	4,56
Juan de Dios (escuela)	325,06	433,00	166,33	5,71
Juan de Dios	44,75	49,96	3,74	19,97
El Santuario	80,56	66,61	10,12	2,79
El Chaparral	119,66	66,61	17,32	12,67
Las Moreas	636,93	1348,95	225,23	11,82
La Reforma	936,55	2714,55	848,00	15,21
Santa Teresita	720,31	1856,88	618,95	6,76
Santa Teresita Aljibe	598,77	2281,55	831,64	9,16
El Manganeso	464,98	299,77	80,00	10,23
La Esperanza	456,97	216,50	73,99	3,56
El Manguito	730,68	1365,60	307,00	23,47
Guanaraparo	245,91	532,92	104,16	13,13
El Edén Aljibe	46,64	41,63	19,36	5,79
El Edén	183,73	58,29	9,30	3,66
Gualpa	226,60	83,27	28,89	13,61
Don Enrique	252,98	249,80	55,07	43,92
Dr. Eduardo	521,51	1165,76	192,51	35,79
Santa María	198,33	74,94	19,61	7,56

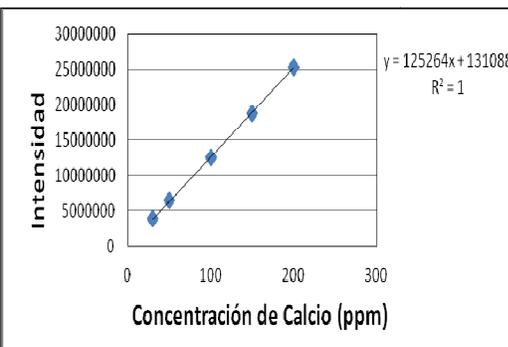
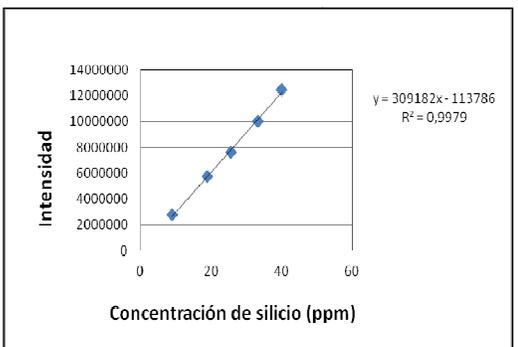
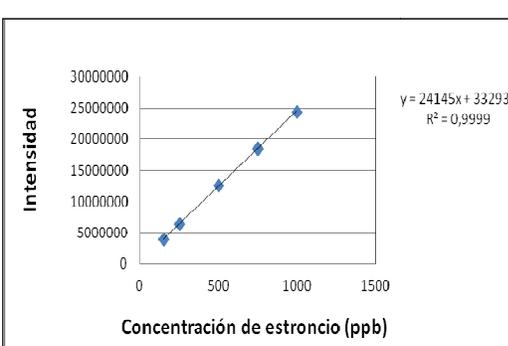
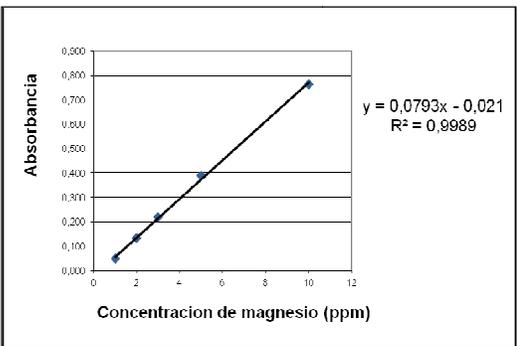
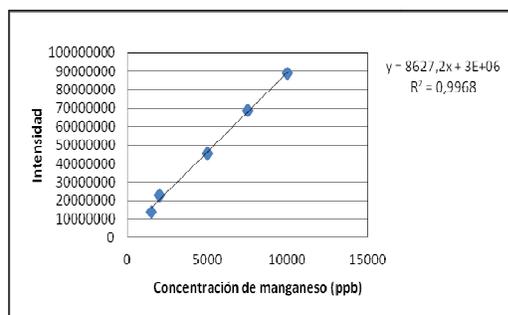
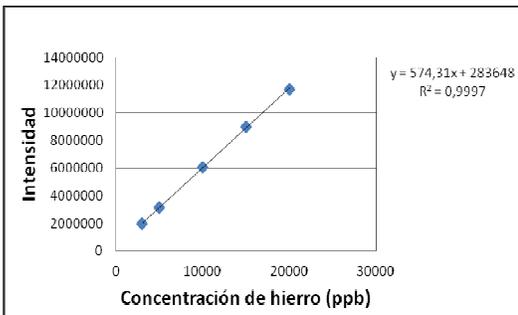
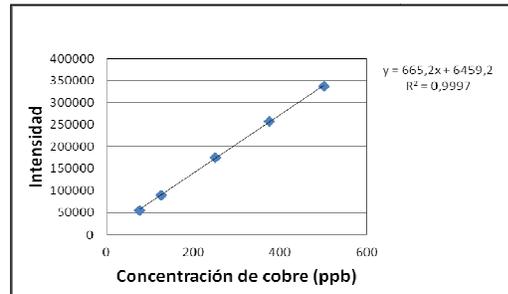
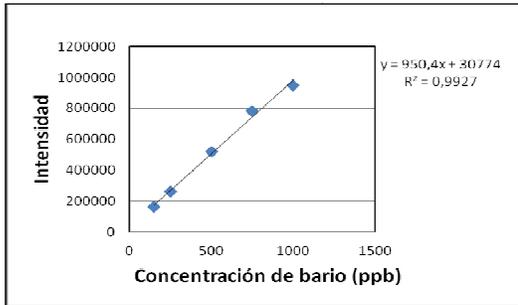
Tabla H : Concentración de los elementos traza determinados para las muestras de agua captadas en la zona de estudio.

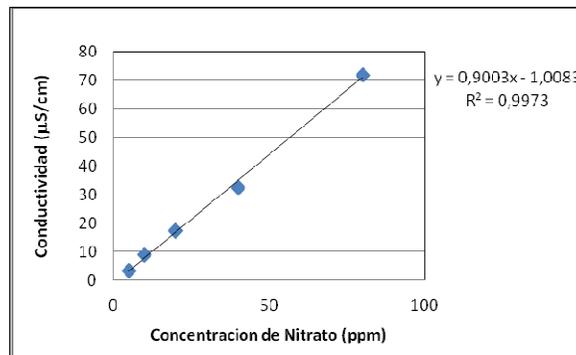
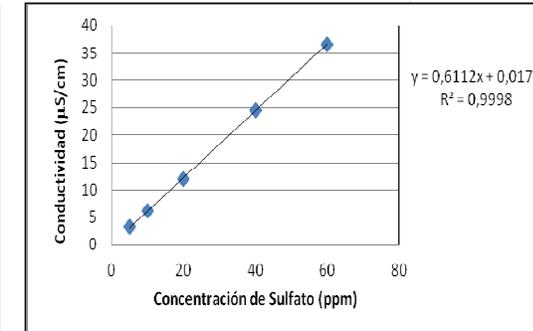
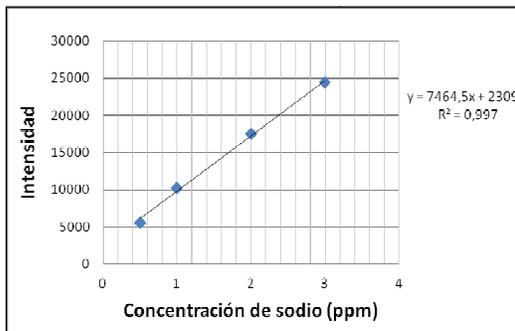
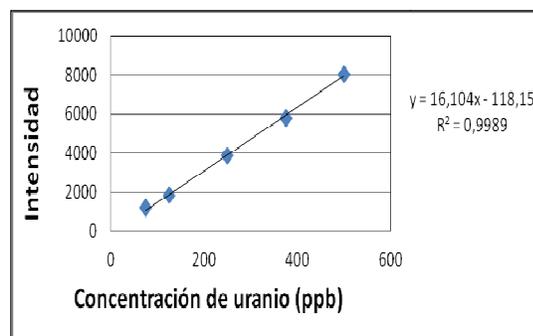
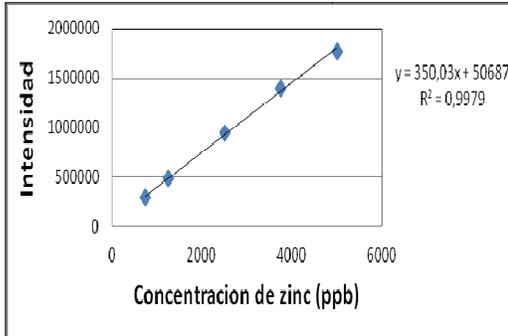
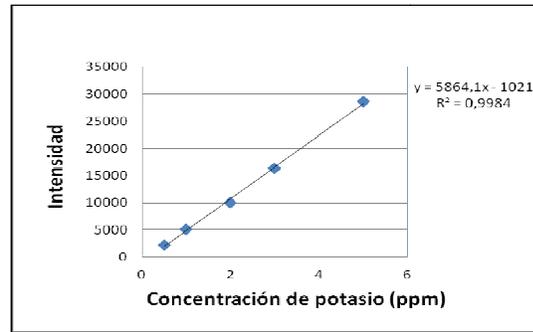
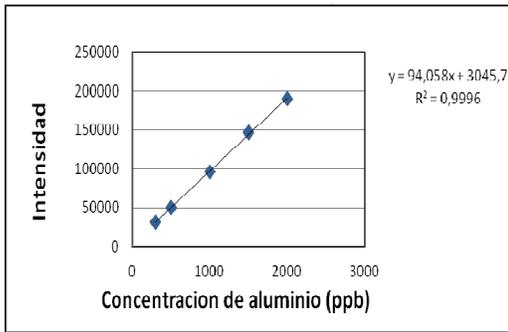
Estación	Al ⁺³ (µg/L)	Ba ⁺² (µg/L)	Fe ⁺² (µg/L)	Mn ⁺² (µg/L)	Sr ⁺² (µg/L)	U ⁺² (µg/L)
San José	<LD	26,05	<LD	<LD	33,20	11,60
Juan de Dios (escuela)	<LD	24,26	<LD	328,46	624,18	<LD
Juan de Dios	<LD	2,84	<LD	<LD	30,90	12,18
El Santuario	4,09	20,88	<LD	<LD	5,41	<LD
El Chaparral	9,09	30,65	<LD	<LD	15,09	12,76
Las Moreas	<LD	64,38	<LD	<LD	937,10	16,53
La Reforma	<LD	53,97	<LD	284,53	956,26	12,37
Santa Teresita	<LD	8,89	287,98	60,22	928,09	41,20
Santa Teresita Aljibe	<LD	3,76	<LD	<LD	1145,08	26,67
El Manganoso	<LD	<LD	<LD	<LD	94,50	29,56
La Esperanza	<LD	<LD	<LD	<LD	117,44	11,56
El Manguito	<LD	<LD	<LD	<LD	134,11	34,01
Guanaraparo	<LD	100,26	<LD	<LD	475,80	24,27
El Edén Aljibe	1762,05	121,49	<LD	190,52	21,51	<LD
El Edén	<LD	3,82	<LD	<LD	50,80	9,64
Gualpa	207,83	71,60	<LD	<LD	95,12	7,40
Don Enrique	<LD	<LD	<LD	<LD	220,90	42,37
Dr. Eduardo	<LD	77,42	<LD	<LD	539,22	329,80
Santa María	<LD	<LD	<LD	3,36	62,73	12,69

<LD= menor al límite de detección

Apéndice F

Curvas de Calibración





APENDICE G

Parámetros estadísticos

Los parámetros de estadística descriptiva se obtuvieron a partir de las siguientes ecuaciones

Límite de Detección (LD)

$$LD = Y + 3s$$

Donde Y representa al promedio del intersepto y s la desviación estandar asociada al intersepto.

Promedio (X)

$$X = (\sum Xi) / n$$

Donde Xi representa la concentración de cada especie química o parámetro determinado y n el número de muestras totales

Desviación Estandar (S)

$$S = \sqrt{\sum(Xi - X)^2 / (n - 1)}$$

Donde Xi representa la concentración de cada especie química o parámetro, X representa el valor promedio de los datos y n el número de muestras totales.

Coefficiente de Variación Porcentual (CV)

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

Mediana (μ)

Si n es par, la mediana viene determinada por $\frac{1}{2} n$.

Si n es impar, la mediana viene determinada por $\frac{1}{2} (n+1)$

APENDICE H

Balance Iónico

El balance iónico se obtuvo a partir de la siguiente ecuación

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

Donde $\Sigma^+ = Na^+ + K^+ + Mg^{+2} + Ca^{+2}$

$\Sigma^- = Cl^- + NO_3^- + SO_4^{-2} + HCO_3^-$

Tabla I: Balance iónico porcentual obtenido para las (19) diecinueve muestras captadas en la zona de estudio.

Estación	Σ^+	Σ^-	$\Sigma^+ + \Sigma^-$	$\Sigma^- - \Sigma^+$	%NCBI
San José	1,60	1,16	2,75	0,44	16
Juan de Dios (escuela)	24,23	21,10	45,33	3,13	7
Juan de Dios	1,86	2,54	4,41	-0,68	-15
El Santuario	3,36	3,46	6,82	-0,09	-1
El Chaparral	3,89	4,41	8,29	-0,52	-6
Las Moreas	57,97	53,37	111,35	4,60	4
La Reforma	125,90	109,83	235,73	16,07	7
Santa Teresita	75,24	77,18	152,43	-1,94	-1
Santa Teresita Aljibe	120,89	91,64	212,53	29,25	14
El Manganeso	23,57	17,91	41,48	5,67	14
La Esperanza	17,08	15,20	32,28	1,89	6
El Manguito	68,95	57,27	126,22	11,68	9
Guanaraparo	15,80	21,44	37,24	-5,65	-15
El Edén Aljibe	2,67	2,44	5,10	0,23	5
El Edén	5,32	4,91	10,23	0,41	4
Gualpa	7,72	6,88	14,61	0,84	6
Don Enrique	14,59	13,05	27,64	1,54	6
Dr. Eduardo	65,46	46,02	111,48	19,44	17
Santa Maria	6,48	5,90	12,37	0,58	5

Conductividad Teórica

La Conductividad Teórica se obtuvo a partir de la siguiente ecuación

$$\text{Cond.T} = [\text{Na}^+] \cdot 2.17 + [\text{K}^+] \cdot 1.89 + [\text{Ca}^{+2}] \cdot 3 + [\text{Mg}^{+2}] \cdot 4.34 + [\text{Cl}^-] \cdot 2.14 + [\text{HCO}_3^-] \cdot 0.74 + [\text{SO}_4^{-2}] \cdot 1.67 + [\text{NO}_3^-] \cdot 1.15 + (e^{-\text{pH}} \cdot 1000 \cdot 349.8)$$

Las unidades de concentración para las especies involucradas se representan en mg/L y la conductividad iónica equivalente de cada especie se expresa en $\mu\text{S}/\text{cm} \cdot \text{mg}$

Las conductividades iónicas de cada especie se hallan presentadas en la tabla J mostrada a continuación.

Tabla J: Conductividad iónica establecida para las especies químicas mayoritarias determinadas en esta investigación.

Especie iónica (mg/L)	Conductividad iónica Específica ($\mu\text{S}/\text{cm} \cdot \text{mg}$)
Na^+	2.17
K^+	1.89
Ca^{+2}	3.00
Mg^{+2}	4.34
Cl^-	2.14
HCO_3^-	0.74
SO_4^{-2}	1.67
NO_3^-	1.15

Los valores obtenidos para el cálculo de la conductividad teórica en cada muestra de agua captada en el área de estudio, se muestra en la tabla ilustrada a continuación.

Tabla K: Conductividad Teórica obtenida para las (19) diecinueve muestras captadas en la zona de estudio.

Estación	Conductividad teórica $\mu\text{S}/\text{cm}$	Conductividad en campo $\mu\text{S}/\text{cm}$
San José	151,70	104,65
Juan de Dios (escuela)	2794,13	2084
Juan de Dios	244,87	199,8
El Santuario	395,26	372,5
El Chaparral	477,55	396
Las Moreas	6765,29	7615
La Reforma	12511,15	10000
Santa Teresita	9506,57	7410
Santa Teresita Aljibe	13011,70	8990
El Manganeso	2405,49	1768,5
La Esperanza	1851,65	1467
El Manguito	7643,03	5600
Guanaraparo	2354,98	2234
El Edén Aljibe	322,34	324
El Edén	559,34	477
Gualpa	803,75	642,5
Don Enrique	1616,48	1354,5
Dr. Eduardo	6730,05	4695
Santa Maria	696,30	600

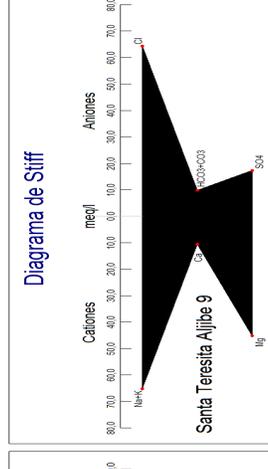
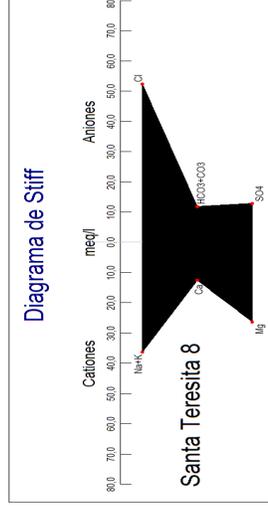
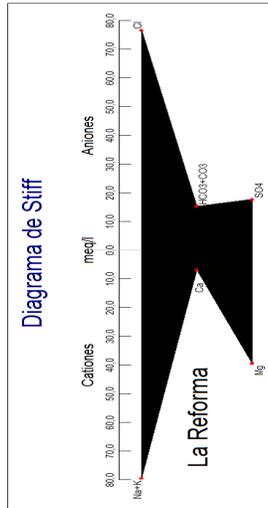
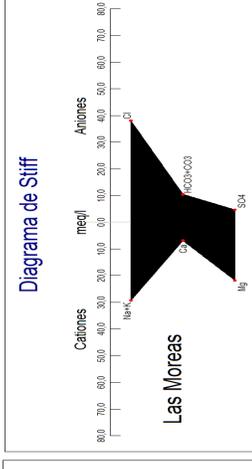
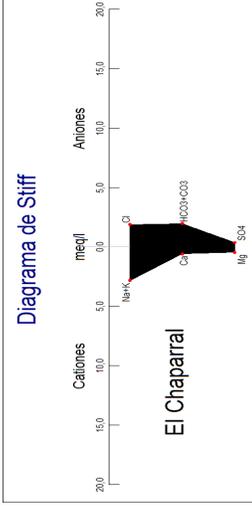
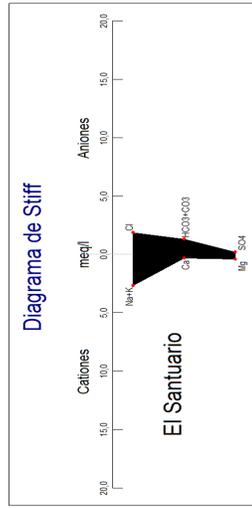
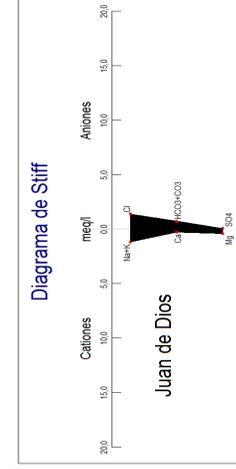
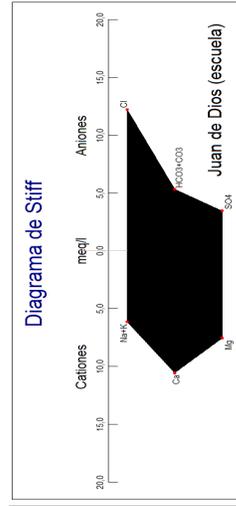
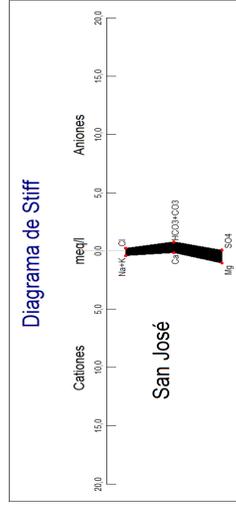
APENDICE I

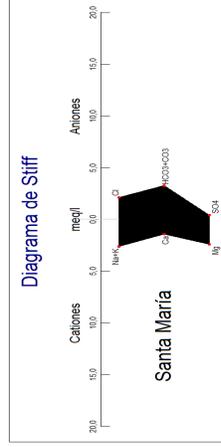
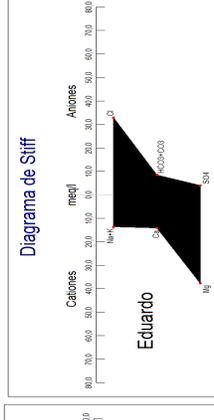
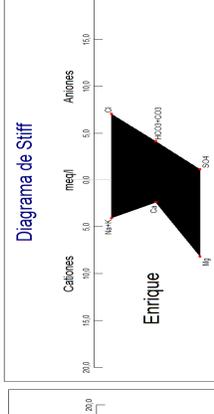
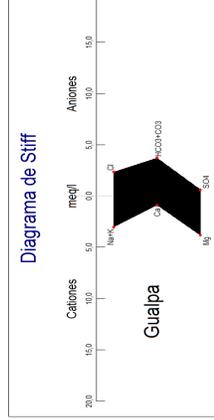
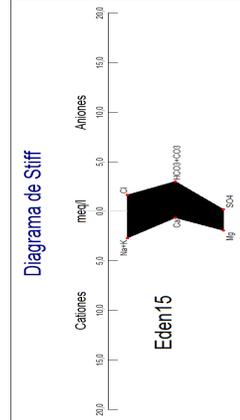
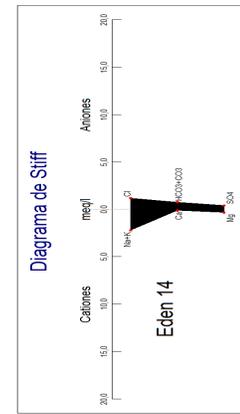
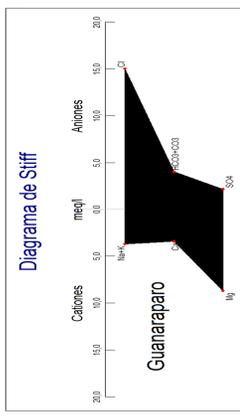
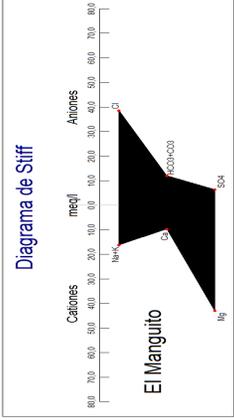
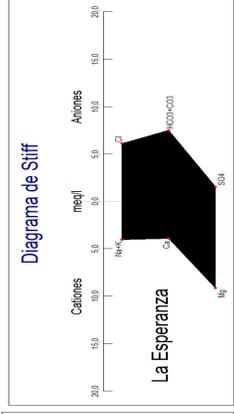
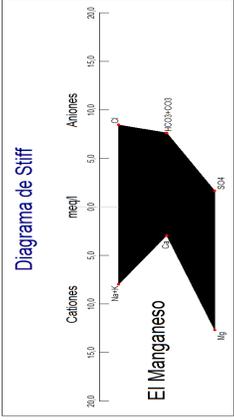
Tabla L: Características de los suelos extraídos del pozo El Manguito, ubicado en el sector El Manganeso

Extracción	Profundidad (m)	Color	Reactividad con HCl 10%
1	Superficial	Marrón	No
2	6	Marrón	No
3	8	Gris	Leve
4	12	Gris	Si

APENDICEJ

Figuras de Stiff





APENDICE K

Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales

Comisión Nacional de Normas Técnicas

Sub-Comisión de Aguas

(Revisión Decreto 883 Versión después de Consulta Pública 15-Feb-1995)

Capítulo II- Sección I. Gestión de la Conservación de las Aguas

Artículo 4: a fin de la gestión de la conservación y control de la calidad de los cuerpos de agua, el Ejecutivo Nacional, por órgano del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, los clasificará con el fin de controlar, mantener y mejorar la calidad del agua, sin comprometer los usos actuales y potenciales de los mismos.

Artículo 5: A fin de estas normas, el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales clasificará a los cuerpos de agua o sectores de estos, atendiendo a sus usos actuales y potenciales. Para ello, deberá establecer un sistema de manejo de información, pudiendo utilizar como herramienta de gestión y seguimiento los índices de calidad de agua – ICA.

Artículo 6: La clasificación de los cuerpos de agua o sectores de estos, se utilizará solo a efectos de la gestión de la calidad de las mismas, para garantizar sus usos mediante el control de los vertidos de efluentes líquidos. Esta clasificación atenderá a una condición de la calidad de los cuerpos de agua o sectores de estos, reconociendo que la mejor calidad es aquella que permite la mayor cantidad de usos ambientales y sociales.

Artículo 7: La clasificación de cada cuerpo de agua o sectores de estos, se realizará mediante Decreto, atendiendo a un orden de prioridades que determinará el Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales. Los cuerpos de agua que no han sido clasificados se regirán por las disposiciones generales establecidas en este Decreto.

Artículo 8 : El Ejecutivo Nacional, por órgano del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, podrá diseñar planes maestros de control y manejo de la calidad de las aguas, específicos para cada cuenca hidrográfica en el territorio nacional, a fin de mejorar o preservar la calidad de un determinado cuerpo de agua o parte de estos. Dichos planes se formularán atendiendo a los siguientes criterios:

- a) Relación causa-efecto entre los agentes contaminantes y los problemas de calidad de agua.
- b) Alternativas para el control de los efluentes existentes y futuros
- c) Condiciones en los que se permitirá los vertidos de efluentes, existentes y futuros, incluyendo los límites de carga másica permisible para cada fuente contaminante.
- d) Normas complementarias que se estimen necesarias para el control y manejo de la calidad de aguas.

Artículo 9: A fin de orientar el uso y reuso del agua, así como clasificar los cuerpos de agua o parte de ellos, se establecen los criterios de calidad.

Artículo 10 : Los usos asociados con la clasificación del agua establecidos en el artículo 5 son presentados a continuación.

Clase 1 o Excelente: aguas que desde el punto de vista sanitario pueden acondicionarse con el empleo de desinfectantes, tratamientos convencionales (coagulación, filtración y cloración) o procesos de potabilización no convencionales. Se hallan destinadas al uso doméstico, industrial, ganadero, agrícola para vegetación arbórea, cereales, hortalizas, legumbres y de forraje, comercio y navegación, protección de comunidades hidrobiológicas, recreación de contacto total y armonía paisajística.

Clase 2 o Muy Buena: aguas que con acondicionamiento previo son empleadas para uso doméstico, agrícola, protección de comunidades hidrobiológicas, recreación con contacto total, industrial, ganadero, comercio, navegación y armonía paisajística.

Clase 3 o Buena: previo acondicionamiento, es una fuente de abastecimiento doméstico, industrial, ganadero, agrícola para vegetación arbórea, cereales y de forraje, recreación de segundo contacto, comercio, navegación y armonía paisajística.

Clase 4 o Aceptable: Armonía paisajística, industria, comercio y navegación.

Parámetros físicos y químicos que definen los criterios para establecer el uso del agua

Tabla M: Máximos permitidos para las especies químicas y parámetros fisicoquímicos determinados por la norma establecida en el decreto 883 para definir el uso del agua.

Parámetro determinado	Excelente	Muy Buena	Buena	Aceptable
HCO ₃ ⁻	370 mg/L	370 mg/L	370 mg/L	370 mg/L
F ⁻	1,5 mg/L	1,5 mg/L	1,5 mg/L	1,5 mg/L
Cl ⁻	300 mg/L	250 mg/L	250 mg/L	-
NO ₃ ⁻	10 mg/L	10 mg/L	-	-
SO ₄ ⁻²	340 mg/L	340 mg/L	340 mg/L	-
Na ⁺	140 mg/L	140 mg/L	140 mg/L	-
K ⁺	20 mg/L	20 mg/L	20 mg/L	-
Ca ⁺²	200 mg/L	200 mg/L	200 mg/L	-
Mg ⁺²	70 mg/L	70 mg/L	70 mg/L	-
TSD	1300 mg/L	1300 mg/L	1300 mg/L	-
pH	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	3,8-10,5
Conductividad	2000 µS/cm	2000 µS/cm	-	-

Calidad del agua potable según el Decreto 475.

En las tablas X y Y son presentadas las normativas descritas en el artículo 8 del decreto antes citado, donde se establecen los criterios de calidad química que tienen un efecto indirecto sobre la salud.

Tabla N: Criterios de calidad química para características con implicaciones de tipo económico o acción indirecta sobre la salud

Características admisibles (mg/L)	Expresado como	Valor
Calcio	Ca	60
Cloruros	Cl	250
Hierro total	Fe	0.3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0.1
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	250

LD: límite de detección.

Tabla O : Criterios de calidad química establecidos para elementos que poseen un efecto adverso en la salud humana, al sobrepasar los valores establecidos (máximos permitidos).

Características admisibles (mg/L)	Expresado como	Valor
Aluminio	Al	0.2
Bario	Ba	0.5
Cobre	Cu	1.0
Nitritos	NO ₂	0.1
Nitratos	NO ₃	10