

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ciencias  
Escuela de Química  
Departamento de Geoquímica

**FACTORES Y PROCESOS QUE DETERMINAN LA CALIDAD QUÍMICA  
DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL SECTOR SUR-CENTRAL DEL  
ÁREA JUNÍN DE LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO**



Trabajo especial de grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela, por la Br. Joselyn R. Jiménez A., como requisito para aprobar la asignatura proyecto geoquímico II y optar al título de Licenciada en Geoquímica

CARACAS, SEPTIEMBRE DE 2009

## **ACTA**

APROBADO EN NOMBRE DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA por los  
Miembros del Jurado Examinador.

---

Prof. Ramón Montero  
(Tutor)

---

Prof. Armando Ramírez  
(Jurado)

---

Prof. Paulino Betancourt  
(Jurado)

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por ser infinitamente poderoso y a la Virgen del Valle, por no desampararme en ningún momento de mi vida, por escuchar mis suplicas y permitirme culminar satisfactoriamente este trabajo y la carrera que decidí estudiar.

Agradezco a la ilustre Universidad Central de Venezuela, por abrirme sus puertas y permitir realizarme como profesional; así como a la Facultad de Ciencias y al ICT. Todo comenzó como un sueño, siguió como una meta y hoy día ya es un hecho, estude en la mejor universidad del mundo.

Gracias a mis padres por darme la vida y todo el apoyo del mundo, en todo momento, por ser mis amigos, mis ejemplos y los motores que mueven mi vida. Eternamente agradecida por su dedicación y por ser los mejores padres del universo, ¡los amo!

Agradezco a toda mi gran familia, son tantos y tan unidos que pueden ser descritos como uno solo, yo se lo que significa para ellos este logro. Con su bulla y su escandaloso reunir, sin duda, son un gran pilar en mi vida, los ¡adoro! Especialmente a mis hermanos, por creer en mí ciegamente y ser mis grandes admiradores, eso me da fuerzas para seguir adelante y no defraudarlos, al igual que mis sobrinos que son mi mayor distracción, sus sonrisas me hacen salir un poco de la rutina, y durante la realización de éste trabajo, sencillamente me hacían olvidar los momentos de stress. A Jean por ser mi primo, mi hermano y mi amigo, la persona con la que mejor me entiendo en el mundo, por estar siempre conmigo y ser incondicional.

Gracias a mi tutor y amigo, el profesor Ramón Montero por brindarme la posibilidad de ser su tesista durante este año, por su tiempo y dedicación al proyecto.

Muy agradecida con el profesor Manuel Martínez, por su atención, presión y regaños en el momento adecuado, al igual que al profesor Carlos Barrios, por su amistad, colaboración y apoyo incondicional; extendiendo este agradecimiento al profesor Santiago Marrero, por apoyarnos siempre y brindarnos su alegría.

Agradezco a mis compañeros de tesis, Ender y Sinaí, hicimos buen equipo y nos entendimos muy bien, y en los momentos difíciles supimos salir adelante, al igual que a Jennifer; estoy muy complacida de haber vivido esta experiencia con ustedes.

Un especial agradecimiento a mis amigas Indra, Angie y Greivis, la primera, mi conciencia, un acelerador, capaz de tranquilizarme, de brindarme su hospitalidad, al igual que su tía y su abuela, que me recibieron en su casa de la mejor forma posible. La segunda, la persona más

paciente que conozco, con la disposición de ayudarme ciegamente. La tercera, a pesar de no saber de geoquímica me escuchaba y seguía de cerca todo el proceso, dándome ánimo y apoyo. Estaré siempre agradecida con todas.

Gracias a David y a Geomar por estar allí, en los momentos más difíciles nos apoyamos y creímos en nosotros, en que lo lograríamos en gran forma. Al igual que a Edwin, Ronald y Jos, por su amistad y apoyo, llegar a este punto sin un grupo de estudio como el que forme con ustedes, habría sido difícil.

Muy a agradecida con el personal técnico y administrativo que labora en el Instituto de Ciencias de la Tierra, y que de algún modo tuvieron que ver en la realización de este trabajos, al igual que al Instituto de Zoología Tropical por facilitar material necesario para la elaboración del proyecto.

Gracias a todos mis compañeros y amigos, que no menciono, pero que estuvieron presente y apoyándome de algún modo, y que al igual que el resto hicieron posible este logro.

## **RESUMEN**

En éste trabajo se determinó la calidad química de las aguas subterráneas del sector sur-central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco. Para ello, fueron analizadas 31 muestras, distribuidas de la siguiente manera: 18 de aljibes, 12 de río y 1 muestra de morichal, de las cuales se realizó mayor énfasis en las muestras de aljibes. Cabe destacar que el muestreo fue realizado en el mes de julio de 2007, a través de una campaña llevada a cabo por el Instituto de Ciencias de la Tierra, el Instituto de Zoología Tropical y PDVSA.

Se determinaron las concentraciones de las especies mayoritarias, a través de diferentes técnicas analíticas, los datos obtenidos fueron analizados a través del uso de diferentes herramientas graficas, como diagramas de Piper, cajas graficas, y distribución espacial, entre otras. Los resultados obtenidos indican que el 78% de las muestras de aljibes corresponden a aguas del tipo  $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$  mientras que un 11% son  $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-HCO}_3^-$  y el resto corresponden al tipo  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$  y  $\text{K}^+\text{-SO}_4^{2-}$ . La composición de las aguas posiblemente esté controlada por diversos factores, entre los que se encuentran la interacción agua- roca, a través del intercambio iónico; precipitación atmosférica y actividades antropicas. Esta última posiblemente esté afectando sectores particulares del área de estudio.

En cuanto a la calidad química, atendiendo al decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005) el 93,5% de las muestras analizadas entran en la clasificación de buena a excelente, que pueden ser usadas para cualquier actividad; mientras que, el 6,5%, correspondiente a dos muestras, están por debajo de la clasificación de buenas, es probable que tengan una mayor influencia de las actividades agrícolas, ganaderas e industriales de la región.

**Palabras claves: aguas subterráneas, calidad química, Junín, aljibes, Decreto 883.**

## **INDICE**

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
<b>MARCO TEÓRICO</b>	4
Ciclo hidrológico	4
Precipitación	4
Evaporación	4
Infiltración	4
Aguas subterráneas	5
Clasificación de las aguas subterráneas	6
Según su origen	6
Aguas meteóricas	7
Aguas marinas	7
Aguas fósiles	7
Aguas congénitas	7
Aguas juveniles	8
Aguas metamórficas	8
Aguas magmáticas y volcánicas	8
Aguas minerales	8
Aguas saladas y salmueras naturales	8
Según sólidos disueltos	8
Según composición química	9
Factores que controlan los procesos hidrogeoquímicos sobre las aguas subterráneas	9
Clima	10
Topografía	10
Litología	10

Fenómenos modificadores de la composición química de las aguas subterráneas	10
Reducción de sulfatos de hierro	11
Intercambio iónico	11
Fenómeno de reducción –oxidación	11
Proceso de concentración y precipitación	12
Actividad antrópica	12
Contaminación de aguas subterráneas	12
Contaminaciones puntuales	12
Contaminaciones lineales	12
Contaminación dispersa	12
Calidad de las aguas	13
Antecedentes de la investigación	14
Área de estudio	18
Geología	18
Formación Freites	18
Formación La Pica	19
Formación Piedra	19
Formación Mesa	19
<b>METODOLOGÍA</b>	21
Etapa de campo	21
Etapa de pre-laboratorio	22
Etapa de laboratorio	22
Etapa de post-laboratorio	23
<b>PRESENTACIÓN Y DISCUSION de RESULTADOS</b>	25
Validación de resultados	25
Caracterización geoquímica	26
pH	27

Eh	29
Sodio	30
Potasio	31
Magnesio	34
Calcio	35
Bicarbonato	37
Sulfato	39
Cloruro	41
Nitrato	43
Sílice	45
Clasificación de las aguas subterráneas	46
Según sólidos disueltos totales (SDT)	46
Según su origen y tiempo de contacto	47
Según su composición química	47
De acuerdo a la calidad química de las aguas	48
Relaciones iónicas	53
Diagramas de Gibbs	53
Relación $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$	55
Correlación $\text{HCO}_3^-$ / sumatoria de cationes	56
Relación $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$	57
Relación de intercambio iónico	58
<b>CONCLUSIONES</b>	59
<b>RECOMENDACIONES</b>	61
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	62
<b>APÉNDICE</b>	65



## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Clasificación de las aguas según la concentración de SDT	47
Tabla 2. Tabla comparativa entre los parámetros que determinan los diferentes tipos de agua de acuerdo a su calidad y los intervalos obtenidos como resultados en el presente estudio.	49
Tabla 3. Datos obtenidos en campo para muestras de aljibes	69
Tabla 4. Datos obtenidos en campo para muestras de río	70
Tabla 5. Datos obtenidos en campo para muestra de morichal	70
Tabla 6. Concentración de los cationes y su respectiva desviación estándar para muestras de aljibes	71
Tabla 7. Concentración de cationes y su respectiva desviación estándar para muestras de río	72
Tabla 8. Concentración de cationes y su respectiva desviación estándar para muestra de morichal	72
Tabla 9. Concentración de especies aniónicas y otras especies en muestras de aljibes	73
Tabla 10. Concentración de especies aniónicas y otras especies en muestras de río	74
Tabla 11. Concentración de especies aniónicas y otras especies en muestra de morichal	74
Tabla 12. Principales aportes de los cationes a las aguas del sector sur-central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco ( $\mu\text{mol/L}$ )	76
Tabla 13. Concentración de bicarbonato en las aguas correspondientes al sector sur-central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco	77

Tabla 14. Calculo del balance iónico	78
--------------------------------------	----

Tabla 14. Parámetros químicos para aguas con calidad excelente	79
--	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del agua	5
Figura 2. Diagrama de Piper	9
Figura 3. Área de estudio	18
Figura 4. Correlación de la Cuenca Oriental de Venezuela (CECPV, 2007)	20
Figura 5. Metodología seguida en éste estudio	24
Figura 6. Relación cationes contra aniones	26
Figura 7. Porcentaje de balance iónico	26
Figura 8. Caja de bigote para pH	28
Figura 9. Distribución espacial de pH	28
Figura 10. Diagrama de bigote para Eh	29
Figura 11. Distribución espacial de Eh.	30
Figura 12. Caja de bigote para la concentración de Na <sup>+</sup>	32
Figura 13. Distribución espacial de Na <sup>+</sup>	32
Figura 14. (a)Diagrama de bigote para la concentración de K <sup>+</sup> ; (b) Diagrama de bigote para K <sup>+</sup> , sin los valores anómalos	33
Figura 15. Distribución espacial de K <sup>+</sup>	33
Figura 16. (a) Diagrama de bigote para la concentración de Mg <sup>2+</sup> ; (b) Diagrama de bigote para la concentración de Mg <sup>2+</sup> , sin los valores anómalos	34
Figura 17. Distribución espacial de Mg <sup>2+</sup>	35
Figura 18. Diagrama de bigote para la concentración de Ca <sup>2+</sup>	36
Figura 19. Distribución espacial de Ca <sup>2+</sup>	37
Figura 20. Diagrama de bigote para la concentración de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	38
Figura 21. Distribución espacial de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	39
Figura 22. (a) Diagrama de bigote para la concentración de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> . (b)	40

Figura 23. Distribución espacial de $\text{SO}_4^{2-}$	41
Figura 24. Diagrama de bigote para la concentración de $\text{Cl}^-$	42
Figura 25. Distribución espacial de $\text{Cl}^-$	42
Figura 26. Diagrama de bigote para las concentraciones de $\text{NO}_3^-$	44
Figura 27. Distribución espacial de $\text{NO}_3^-$	44
Figura 28. Caja de bigote para $\text{SiO}_2$	45
Figura 29. Distribución espacial de $\text{SiO}_2$	46
Figura 30. Diagrama de Piper para aguas de aljibes y aguas de río	48
Figura 31. Diagrama de Gibbs, Relación $\text{SDT}/(\text{Na}^++\text{K}^+)/(\text{Na}^++\text{K}^++\text{Ca}^{2+})$	54
Figura 32. Diagrama de Gibbs. Relación $\text{SDT}/\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$	55
Figura 33. Correlación $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ (meq/L)	56
Figura 34. Relación entre $\text{HCO}_3^-$ y sumatoria de cationes	57
Figura 35. Correlación $\text{Ca}^{2+}$ contra $\text{HCO}_3^-$	57
Figura 36. Diagrama de correlación para la determinación de intercambio iónico	58
Figura 37. Curva de calibración de $\text{Na}^+$ , para bajas concentraciones	66
Figura 38. Curva de calibración de $\text{Na}^+$ para altas concentraciones	66
Figura 39. Curva de calibración para $\text{Mg}^{+2}$	67
Figura 40. Curva de calibración para $\text{K}^+$	67
Figura 41. Curva de calibración para $\text{Mg}^{+2}$	68

## **INTRODUCCIÓN**

El agua subterránea es aquella que está situada por debajo de la superficie del suelo (Davis y De Wiest, 1971). Es conocido que éstas aguas, ocupan a penas el 0,06% del agua total en el globo terráqueo; no obstante, su aprovechamiento es de gran importancia económica, debido a que poseen diversas características, como ausencia de organismos patógenos, temperatura y composición química constante, entre otros, que la diferencian de las aguas superficiales (Gil, 2000).

Existen diversos factores que determinan la composición química de las aguas subterráneas, a saber: el clima, la litología, las actividades antrópicas y el tiempo entre otros. Estos a su vez, particularmente la litología, ejercen un fuerte control sobre los procesos, afectando directamente parámetros como calidad. De acuerdo al Decreto Presidencial 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005), la calidad de un cuerpo de agua, es el conjunto de características físicas, químicas y biológicas de las aguas naturales que determinan su composición y utilidad al hombre y demás seres vivos.

Cada factor y proceso no actúa de forma aislada, sin embargo puede existir predominancia de uno sobre otro, dependiendo de las condiciones físicas y químicas existentes. En ese sentido, el factor climático ejerce una marcada influencia, ya que determina la zona de recarga del acuífero; mientras que, la interacción agua-sustrato poroso influye directamente sobre los procesos químicos desarrollados. El tiempo determina el grado e intensidad de los procesos, así como la actividad antrópica está manifestada a través de la actividad industrial, ganadera, agrícola, petrolera y doméstica, que pueden tener un fuerte impacto sobre la calidad química de las aguas.

El acelerado desarrollo demográfico experimentado en Venezuela, ha conllevado al aumento de las actividades antrópicas, de las cuales la que ha mostrado un mayor auge es la asociada con la actividad petrolera. Esto es debido a que en el país se encuentra la mayor reserva de crudo de Venezuela y el mundo, donde el escenario más dinámico en la industria petrolera venezolana del nuevo siglo, está representado por la Faja Petrolífera del Orinoco. Esta ocupa la franja meridional de la Cuenca Oriental de Venezuela, al sur de los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro,

paralelo al curso del río Orinoco. Abarca una extensión de 600 Km, dividida en cuatro zonas o bloques, a saber: Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo (PDVSA, 2005).

PDVSA en conjunto con la UCV está llevando a cabo un proyecto en la Faja Petrolífera, dentro del marco del Plan Siembra Petrolera. En el contexto de éste macro proyecto está enmarcado el subproyecto “Evaluación Sistemática de las Condiciones Socio-Ambientales del Área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco a escala 1:100.000” el cual comprende estudiar diversos aspectos entre los que se encuentran la calidad de las aguas subterráneas y superficiales. Esto con el fin de determinar el probable impacto ambiental de las diversas actividades llevadas a cabo en el área.

El Bloque Junín, está ubicado en la parte centro-occidental de la Faja Petrolífera del Orinoco, específicamente ocupa parte de los estados Guarico y Anzoátegui. Este bloque que tiene un área de 2.170 Km<sup>2</sup>, está dividido a su vez en nueve subgrupos. En ese sentido, el área donde se llevó a cabo el presente estudio ocupa parte de los subgrupos mencionados, particularmente el sector sur-central.

El agua subterránea a diferencia del agua superficial, no se encuentra expuesta al ambiente exógeno, por lo cual es un recurso natural vital para el suministro económico y seguro de agua potable y el desarrollo de las comunidades en áreas urbanas y rurales (Paris, 2009). Debido a ello, se le realizan menos tratamientos antes de ser utilizadas para cualquier actividad, sin embargo existen agentes externos que pueden alterar la composición química de las mismas, incluso afectando la calidad de las aguas en general, habitualmente asociados a factores antrópicas, entre los que pueden mencionarse, la agricultura, la ganadería, la actividad domestica, la industria petrolera y demás tipos de industrias.

En la Faja Petrolífera del Orinoco, es llevada a cabo una intensa actividad petrolera, además de agrícola y ganadera. Ésta zona está en actual crecimiento poblacional, encontrándose específicamente en el bloque Junín, la presencia de más de 40 pozos petroleros (PDVSA, 2005). Se desconoce si todas éstas actividades desarrolladas en ésta área, están afectando de algún modo la composición de las aguas subterráneas, es por ello que se plantean las siguientes interrogantes ¿Cuál es la composición química de las aguas subterráneas? , ¿Cuáles son los factores y procesos que

determinan la calidad química de las aguas subterráneas en éste sector?, ¿Cuál es el uso apropiado para éste tipo de agua?.En ese sentido, el presente trabajo de investigación con el propósito de dar respuesta a estas interrogantes a través de la realización de un estudio para determinar la calidad química de las aguas subterráneas en esta zona.

Debido a lo anteriormente señalado, en el presente trabajo se propone el siguiente objetivo general:

Identificar los factores y procesos que afectan la calidad química de las aguas subterráneas del Bloque Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco, en los estados Anzoátegui y Guarico.

Para poder alcanzar éste objetivo, son planteados los objetivos específicos seguidamente indicados:

- Caracterizar las aguas subterráneas a través de las medidas de los parámetros fisicoquímicos Eh, pH y conductividad, así como de la determinación de las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ).
- Establecer la distribución espacial de las especies químicas determinadas, así como del tipo de agua.
- Identificar los probables procesos que intervienen en la interacción agua-sustrato poroso.
- Determinar la calidad química de las aguas estudiadas, a través de las concentraciones de las especies mayoritarias, minoritarias y trazas (Mn, Al, Fe), así como de los coliformes fecales y totales.

## **MARCO TEÓRICO**

A continuación se presentan una serie de conceptos y términos, obtenidos a través de la revisión bibliográfica, que conforman el basamento teórico de la presente investigación.

### **CICLO HIDROLÓGICO**

Actualmente, el ciclo del agua es visualizado como un sistema sencillo; sin embargo, durante siglos no fue de fácil su comprensión, de hecho muchos de los grandes pensadores de la historia, lo concebían al revés. Fue hasta la edad moderna cuando se estableció de forma general, como este proceso es capaz de mover una molécula de agua a través de globo terráqueo (Sánchez, 2004).

El ciclo hidrológico es un sistema complejo en el cual todas las aguas circulantes de la tierra se encuentran incluidas e interrelacionadas (Davis y De West, 1971). En un sentido general, dicha circulación se realiza de forma ascendente por evaporación y descendente por precipitaciones, seguido de la forma de escorrentía superficial y subterránea. En éste ciclo existen diferentes fases, a saber: precipitación, evaporación, infiltración y escorrentía superficial.

**Precipitación**, es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye a la lluvia, la nieve y el granizo. También es incluido el rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total (Sánchez, 2004).

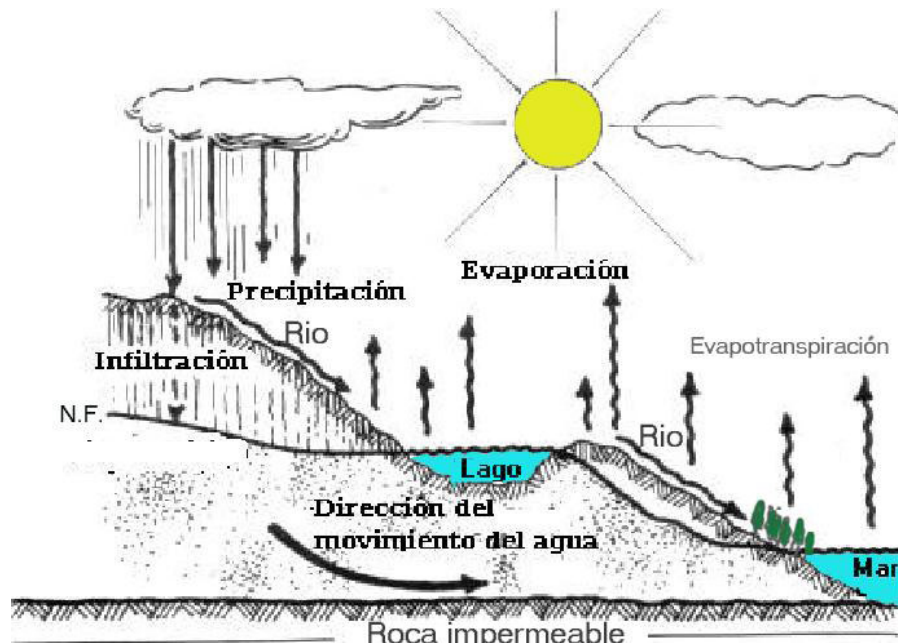
**Evaporación**, es el proceso mediante el cual las moléculas de agua de una superficie libre, adquieren mediante la radiación solar, la energía suficiente para escapar del estado líquido y pasar al estado gaseoso (Davis y De West, 1971).

**Infiltración**, se trata del agua que percola hacia el subsuelo. *Esta* agua infiltrada puede luego recorrer diversos caminos tales como:

- Evaporación: se trata del mismo mecanismo descrito anteriormente, pero desde el suelo húmedo, sin relación con la vegetación.

- Transpiración: proceso mediante el cual las plantas desde las raíces seden agua a la atmósfera.
- Escorrentía subsuperficial o hipodérmica, es el flujo lateral, de poco tiempo de contacto, que es expuesto rápidamente a la superficie.
- Escorrentía subterránea: es aquella proveniente de la superficie que alcanza la zona saturada y que continúa su recorrido debajo de la superficie (Sánchez, 2004).

**Escorrentía superficial**, es aquella agua proveniente de las precipitaciones, la cual transcurre por la superficie del suelo, sin ser infiltrada.



**Figura 1.** Ciclo hidrológico (Gil, 2000).

## AGUAS SUBTERRÁNEAS

Davis y De West (1974) indican que las aguas subterráneas son aquellas que se encuentran por debajo de la superficie del suelo; sin embargo, este es considerado un concepto general, quedando claro que éstas al igual que las aguas superficiales, forman parte del ciclo hidrológico, solo que están situadas debajo de la superficie terrestre. Así mismo, puede señalarse que una vez infiltradas a través del subsuelo, sufren una serie de procesos que le confieren características químicas particulares que



están controladas por factores tales como: el clima, la litología, tiempo de residencia y actividad antropica.

En cuanto a su origen, la casi totalidad de las aguas subterráneas se pueden considerar como parte del ciclo hidrológico, incluyendo la atmosférica y el agua meteórica. No obstante, una cantidad de agua subterránea menor puede entrar a formar parte de este ciclo por otros conductos diferentes. Puede ocurrir por el entrapamiento del agua entre los poros de las rocas sedimentarias que a lo largo del tiempo fueron acumuladas allí. Esta agua puede proceder del océano o de las fuentes de agua dulce que a lo largo del correr de los años, ha sido mineralizada de una forma típica que dependerá de los factores predominantes en el sector (Keith, 1973).

Las aguas subterráneas se encuentran en formaciones geológicas con características particulares conocido como acuíferos. Este puede ser definido como la formación, grupo de formaciones o parte de una formación que está saturada y que es lo suficientemente permeable, para transmitir cantidades de aguas económicamente rentables a manantiales o de ser capturadas mediante algún sistema de explotación como galerías, zanjas, pozos y sondeos, entre otros (Gil, 2000).

Así mismo, un acuífero es una formación geológica que contiene agua, que permite su movimiento fácilmente. Junto a los acuíferos propiamente dichos, aparecen otras formaciones geológicas que reciben nombres de acuerdo con sus posibilidades de contener agua y de permitir su circulación, tales como los acuicludos, los acuitardos y los acuífugos (Saavedra, 2002).

## **CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Las aguas subterráneas pueden clasificarse según su origen y tiempo de contacto, su concentración de sólidos disueltos totales (SDT) y su composición química.

### **Según su origen y tiempo de contacto con el acuífero**

Atendiendo a su origen y tiempo de contacto, las aguas subterráneas pueden ser clasificadas como meteóricas, marinas, fósiles, connatas, juveniles, metamórficas, magmáticas y volcánicas, minerales, saladas y salmueras (Custodio y Llamas, 1976).

### Aguas meteóricas

Son las incluidas en el ciclo del agua en la hidrosfera-litosfera-atmósfera. Se pueden caracterizar fácilmente por poseer algunos radiostopodos de vida no muy larga, de origen atmosférico y una composición similar al agua de lluvia. Son consideradas aguas meteóricas la que actualmente intervienen en el ciclo hidrológico y su composición está influenciada por el agua de infiltración y el material del acuífero (Custodio y Llamas, 1976).

### Aguas marinas

Referidas a las aguas del mar que han invadido recientemente sedimentos costeros, similares en composición, a las aguas oceánicas pero quizás con mayor dureza; mientras que, su composición isotópica puede ser similar (Custodio y Llamas, 1976).

### Aguas fósiles

Son aguas atrapadas en el subsuelo, que permanecen en él durante miles de años. Son de movimiento lento y largo recorrido, por lo que adquieren una alta salinidad debido a su prolongado contacto con el terreno (Custodio y Llamas, 1976).

### Aguas connatas

Son las aguas atrapadas en el momento de la acumulación de los sedimentos. Esta agua es expulsada después del proceso de litificación, pero si la roca final es aun porosa, puede quedar algo del agua de imbibición en ella, conocida como el agua connata (Custodio y Llamas, 1976).

Las aguas connatas no son necesariamente aguas fósiles, pues pueden corresponder a sedimentos muy recientes. Dichas aguas y también las fósiles y las emigradas, pueden ser fuertemente cloruradas y suelen estar, en relación con el agua de mar de otras épocas, enriquecidas en  $I^-$ , B,  $SiO_2$ ,  $NO_3^-$  o  $NH_4^+$  y  $Ca^{2+}$  y empobrecidas en  $SO_4^{2-}$  y  $Mg^{2+}$  (Davis y De West, 1971).

### Aguas juveniles

Son aquellas que proceden del interior de la tierra sin haber estado antes en superficie, cuyo interés es limitado (Custodio y Llamas, 1976).

### Aguas metamórficas

Este tipo de agua, es considerada como las expulsadas desde los sedimentos en procesos de metamorfismo. Pueden tener concentraciones elevadas en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y B, algo elevado en  $\text{I}^-$ , pueden ser menos cloruradas que el agua de mar (Custodio y Llamas, 1976).

### Aguas magmáticas y volcánicas

Estas aguas se desprenden de las emisiones de lava, gases volcánicos, durante los eventos magmáticos. Frecuentemente son del tipo clorurado sódico, con concentraciones anormalmente elevadas de  $\text{Li}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SiO}_2$ , B,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$ , y bajos en  $\text{I}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$  (Davis y De West, 1971.).

### Aguas minerales

Las aguas minerales se caracterizan por poseer elementos en disolución en concentraciones notables o grandes, comparadas con las aguas meteóricas. Están generalmente asociadas a fenómenos volcánicos, orogénicos y termales (Custodio y Llamas, 1976).

### Aguas saladas y salmueras naturales

Son de origen marino y de larga permanencia en el terreno, con frecuencia de millones de años, por lo que han sufrido procesos modificadores que pueden haber alterado su facies original. Entre los procesos modificadores, se destacan la ultrafiltración, que es un proceso mediante el cual, un agua es forzada a pasar a través de niveles arcillosos continuos, permitiéndole dejar atrás gran parte de sus sales. A esto contribuye por su puesto, el largo tiempo de permanencia en el terreno y las elevadas temperaturas. (Custodio y Llamas, 1976).

### **Según los sólidos disueltos totales (SDT)**

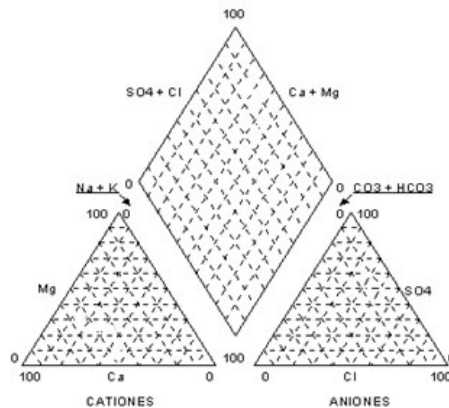
Las aguas subterráneas pueden ser clasificadas de acuerdo a su concentración de sólidos disueltos totales (SDT) como: salmueras, saladas salobres y dulces. Las salmueras tienen una concentración mayor a 100.000 mg/L de SDT; las aguas saladas están, entre 10.000 y 100.000 mg/L; las aguas salobres entre 1.000 y 10.000 mg/L;

finalmente, las aguas dulces son aquellas que poseen una concentración de SDT menor a 1.000 mg/L (Hem, 1985).

### Según su composición química

Esta clasificación es frecuentemente elaborada, mediante la construcción de una serie de gráficos, basados en las concentraciones de las especies mayoritarias determinadas, con el propósito de establecer el tipo de agua. Esta herramienta gráfica fue propuesta por Piper (1944), considerado éste como uno de los primeros sistemas creados para clasificar las aguas, tanto superficiales como subterráneas.

El diagrama de Piper está compuesto de dos diagramas triangulares, que permiten representar el porcentaje en meq/L de los cationes  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ; así como, de un romboedro central, que facilita expresar el carácter químico del agua, en función de las concentraciones relativas de sus constituyentes, a través de la proyección de los dos puntos obtenidos durante la proyección de los iones en los triángulos (figura 2).



**Figura 2.** Diagrama de Piper (Provincia de La Pampa- Recurso hídrico).

### FACTORES QUE CONTROLAN LOS PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los procesos hidrogeoquímicos son los responsables de la composición química de las aguas subterráneas, estos a su vez dependen de una serie de factores sujetos a las condiciones en las que se encuentre el acuífero, que no actúan de forma aislada, no obstante, en ocasiones puede existir predominancia de uno sobre otro. Entre estos

factores están el clima, la topografía, el proceso de interacción agua-roca, el tiempo y las actividades antrópicas.

### **Clima**

Durante ciertas épocas del año, es frecuente que en muchas regiones la evapotranspiración potencial sea mayor que la pluviosidad, en esos períodos de tiempo no ocurre recarga alguna y las sales aportadas por la lluvia son acumuladas en el suelo. Por el contrario, en la época húmeda ocurre la recarga debido a las frecuentes precipitaciones, de manera que las primeras fracciones de infiltración hacia el acuífero son notablemente más salinas que las siguientes, ya que éstas disuelven las sales solubles depositadas en la anterior época de sequía (Custodio y Llamas, 1976).

La variación en la salinidad del agua de recarga puede observarse anualmente, que va a depender de la pluviosidad entre un año y otro. Además, este es un fenómeno de mayor relevancia en los climas áridos y semi-áridos, debido a que la infiltración es baja (Custodio y Llamas, 1976).

### **Topografía**

La topografía de una zona condiciona la circulación del agua subterránea y la distribución de las áreas de recarga y descarga e incluso puede condicionar de forma importante la pluviometría y cantidad de agua de recarga profunda (Custodio y Llamas, 1976).

### **Litología**

Se podría considerar que la interacción-agua sustrato rocoso, es el factor más determinante en la composición química de las aguas subterráneas, puesto que generalmente, dicha composición es el reflejo del entorno geológico por donde el agua circula. El agua subterránea adquiere la composición de la litología infiltrada mediante una serie de procesos químicos, que serán desarrollados en los párrafos siguientes.

### **Fenómenos modificadores de la composición química del agua subterránea**

Dentro de los más importantes fenómenos que modifican la composición química de las aguas subterráneas están la reducción de sulfatos y de hierro, intercambio iónico, oxidación – reducción y concentración y precipitación de sales.

### *Reducción de sulfatos y de hierro*

El proceso de reducción de sulfato y de hierro, ocurre en ambientes anóxicos con abundante materia orgánica. Este fenómeno consiste en el paso de ion sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  a un estado inferior de oxidación, en general  $\text{S}^{2-}$  y a veces S o  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ . Este proceso es frecuentemente realizado a través de ciertas bacterias que viven en el terreno, incluso a grandes profundidades, que actúan como catalizadores químicos de una serie de reacciones que en su ausencia no se producen naturalmente con suficiente rapidez. Los iones  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{S}^{2-}$  pueden reaccionar dando  $\text{FeS}$  ó  $\text{S}_2\text{Fe}$ , insoluble. La reducción de sulfatos es en general un proceso mucho más rápido que su aporte por disolución de sales del terreno (Custodio y Llamas, 1976).

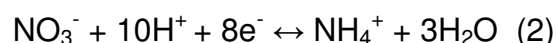
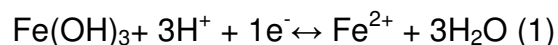
### *Intercambio iónico*

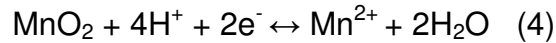
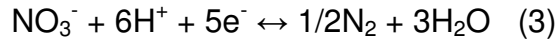
El proceso de intercambio iónico ocurre con mayor frecuencia entre los cationes, y los minerales de arcilla que poseen un grado de notable de capacidad de quimisorción. El cambio de base, como también es conocido el intercambio catiónico, afecta principalmente a los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , así como al  $\text{H}^+$ ,  $\text{Li}^+$  y  $\text{Sr}^{2+}$ ; mientras que, el  $\text{K}^+$  y el  $\text{NH}_4^+$  tienden a ser fijados irreversiblemente (Custodio y Llamas, 1976).

### *Fenómeno de oxidación- reducción*

Los fenómenos redox pueden modificar la composición del agua, ya sea llevando a solución ó precipitando iones que pueden presentarse en varios estados de valencia. En presencia de oxígeno, con o sin la participación de bacterias, el ion  $\text{S}^{2-}$  y los sulfuros del terreno pueden oxidarse a ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , aumentándose considerablemente la concentración del mismo (Custodio y Llamas, 1976).

Estos fenómenos son importantes para el proceso de solubilización del Fe y del Mn, ambos de similar comportamiento. Estos son solubles en medios reductores, precipitando fácilmente en medios oxidantes (Custodio y Llamas, 1976). Las reacciones redox son productoras o consumidoras de hidrógeno, como se describe en las siguientes reacciones:





### *Procesos de concentración y precipitación de sales*

Con el aumento del contacto del agua con el sustrato a través del cual percola, a medida que fluye y evoluciona a través de él, puede ir disolviendo más sales hasta alcanzarse los respectivos productos de solubilidad. Es de notar que el aumento de concentración permite en general, disolver nuevas cantidades de sales que estaban a nivel de saturación a consecuencia del aumento de la fuerza iónica (Custodio y Llamas, 1976).

Un factor importante involucrado en este proceso, es la velocidad de disolución. Ésta es tanto mayor cuanto mayor es el grado de división y superficie de contacto. Las rocas permeables por porosidad ceden más sales que las rocas permeables por fisuras. Para la identificación de cualquiera de los procesos antes descritos, es preciso tener en cuenta que dos procesos diferentes pueden arrojar aparentemente resultados parecidos, no obstante se analizan desde un único punto de vista (Custodio y Llamas, 1976).

### **Actividad antrópica**

Las actividades realizadas por el hombre, como la asociada a la agricultura, la ganadería, la actividad industrial y minera, ésta última usada para la extracción de recursos naturales para beneficios comunes, generalmente pueden introducir contaminantes en los diferentes sistemas naturales, conllevando a la alteración de su composición química original, en algunos casos hasta niveles que pueden llevar al solapamiento de los procesos geoquímicos que operan en el sistema subterráneo (Keith, 1973).

### Contaminación de las aguas subterráneas

La contaminación de los acuíferos raramente se producen de forma natural y espontánea, detrás siempre está la mano del hombre frecuentemente reflejada en las actividades mineras y de rocas industriales, las construcciones subterráneas, los colectores de aguas residuales de las urbanizaciones, la nula protección sanitaria de las

aéreas de recarga, los vertidos de desechos urbanos e industriales, la inyección de líquidos nocivos al medio permeable tales como fosas sépticas, entre otros (Gil, 2000).

Por otro lado, el aumento de la extracción de agua a través del bombeo producido por el incremento de la demanda, acelera el movimiento y la difusión de los contaminantes, paralelamente a la progresiva degradación de las aguas subterráneas y superficiales (Gil, 2000). La contaminación de un acuífero puede ser clasificada según su distribución espacial de la siguiente manera: puntuales, lineales y dispersa.

*Contaminaciones puntuales:* la mayoría están relacionadas con la eliminación de aguas residuales, los desperdicios urbanos (basureros) y los residuos industriales y mineros (Gil, 2000).

*Contaminaciones lineales:* los ríos y canales de riego con aguas contaminadas pueden pasar de efluentes a influyentes por inversión causada por la sobreexplotación de los acuíferos. Este fenómeno puede considerarse generalizado en los acuíferos lineales de los aluviones conectados al río (Gil, 2000).

*Contaminación dispersa:* este tipo puede ser apreciado a través de ciertas actividades agrícolas como abonar los cultivos, plaguicidas, insecticidas y herbicidas (Gil, 2000).

## **CALIDAD DE LAS AGUAS**

El Decreto Presidencial 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005), define a la calidad de las aguas como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas de las aguas naturales que determinan su composición y utilidad al hombre y demás seres vivos. En ese sentido, la calidad química está relacionada con la composición química de los cuerpos de agua.

La calidad del agua subterránea tiene casi tanta importancia como su cantidad. Debido a que el desarrollo y la utilización de dicha agua continua creciendo, se debe procurar proteger su calidad a través de normas y reglamentos que permitan su oportuno resguardo. La calidad requerida en un suministro de agua subterránea depende de los propósitos a los cuales se destine (Keith, 1973).

Una forma de medir la calidad de un cuerpo de agua en general, es a través del índice de calidad de agua, una unidad de medida que asocia un número de parámetros según



una ecuación de agregación definida. Generalmente se expresa como un porcentaje de la calidad deseada, basada en ponderación de importancia, donde valores cercanos a 100 reflejan una condición excelente (Gaceta Oficial N° 5021, 2005).

El apéndice F muestra una tabla con los parámetros químicos, como concentración de especies mayoritarias y traza, así como los intervalos de pH requeridos para clasificar las aguas subterráneas de una región determinada con calidad excelente.

## **ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

Debido a la importancia que tienen las aguas subterráneas para la sociedad moderna, han surgido estudios que han permitido su caracterización, con el propósito general de comprender su comportamiento y como actúan los factores que controlan la composición química de las mismas. En ese sentido, a continuación se presentan una serie de estudios realizados a nivel internacional que permiten ejemplificar el estado de ésta área del conocimiento.

**Rajmohan et al. (2004)** estudiaron el comportamiento de los procesos hidrogeoquímicos y su relación con la calidad de las aguas subterráneas en la cuenca del río Alar y Cheyyar al sur de la India. Estos autores determinaron que la composición de dichas aguas está fuertemente influenciada por la interacción agua-sustrato rocoso, disolución y precipitación de carbonatos y silicatos, intercambio iónico y las interacciones con aguas superficiales.

A través del análisis de algunas relaciones iónicas, los autores señalan que durante la época de lluvia, en las cuales predomina la recarga y el ascenso del nivel freático, ocurre un proceso de intercambio iónico inverso, donde el  $\text{Na}^+$  o el  $\text{K}^+$  es intercambiado por el  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ; mientras que en la época de sequía, el proceso es un intercambio iónico directo, donde el  $\text{Ca}^{2+}$  o el  $\text{Mg}^{2+}$  es reemplazado por el  $\text{Na}^+$  o el  $\text{K}^+$ .

**Tesoriero et al. (2004)** estudiaron algunos sectores ubicados al sureste de los Estados Unidos, correspondientes a una llanura costera externa e interna, con el objetivo de determinar las condiciones geoquímicas y los procesos que ocurren en estas áreas, con el propósito de evaluar su susceptibilidad a la contaminación de los acuíferos.

Estos autores determinaron las especies mayoritarias  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , y oxígeno disuelto en las aguas subterráneas, además de la concentración de carbono total ( $\text{C}_t$ ) y  $\text{NO}_3^-$  en los suelos. Los resultados obtenidos por Tesoriero *et al.* (2004) indican que la llanura externa es un ambiente geoquímico totalmente diferente a la llanura interna, con mayor concentración de especies disueltas producto de las mineralizaciones; mientras que, la llanura interna mal drenada, posee condiciones redox. Señalan además que las condiciones aeróbicas conllevan a que sea más susceptible a la contaminación, ya que aumenta la concentración de  $\text{NO}_3^-$  y sus productos de degradación.

**Jalali (2005)** investigó hidrogeoquímicamente las aguas subterráneas de la zona de Bahar en el oeste de Irán, con el propósito de determinar la composición química de las mismas. Dichas aguas han sido explotadas a lo largo de muchos años principalmente para riego y abastecimiento a las poblaciones, ya que se encuentra en un clima árido. Estos autores indican que éstas aguas muestran un amplio intervalo de variabilidad en cuanto a las facies hidrogeoquímicas, identificando facies del tipo bicarbonatada cálcica ( $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ), sulfatada cálcica ( $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ ), bicarbonatada magnésica ( $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ), sulfatada magnésica ( $\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ ) y bicarbonatada sódica ( $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ). Los investigadores señalan que estas facies son el reflejo de las litologías presentes en el sector, representadas por la presencia de carbonatos, dolomitas y diversos silicatos; además de la influencia asociadas al factor evaporación a consecuencia del clima.

**Anshumali y Ramanathan (2007)** realizaron un estudio de los patrones estacionales de las principales especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  con el objetivo de entender la influencia de los factores geoquímicos sobre la calidad de las aguas asociadas con el lago Pandoh. Sus resultados indican que la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  están controladas por la disolución de carbonatos y las precipitaciones atmosféricas, durante la época de invierno y verano. Anshumali y Ramanathan. (2007) señalan que durante la época de altas precipitaciones, la concentración de todas las especies disminuye por efecto de la dilución. Estas especies representan alrededor del 70% de todos los iones estudiados a lo largo del año.

Así mismo, los autores indican que la calidad de las aguas y su variación en tiempo y espacio es aceptable; así mismo agregan que no existe contaminación, sin embargo señalan que un posible enriquecimiento en nutrientes podría afectar la calidad de las aguas y por lo tanto recomiendan atención para preservar el recurso hídrico.

En el mismo orden de ideas, a nivel nacional también han sido realizadas una serie de investigaciones hidrogeoquímicas, que pueden ser utilizadas como sustento para el presente estudio.

**Montero *et al.* (2002)** estudiaron las aguas provenientes de siete manantiales ubicados en diferentes localidades de la cuenca de Falcón, con el objetivo de caracterizarlas y determinar cuales son los principales procesos hidrogeoquímicos involucrados en la interacción agua-roca. Para ello, determinaron las especies mayoritarias  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Así mismo, con el propósito de conocer los tipos de agua presentes, utilizaron diagramas como el de Piper.

Estos autores concluyen que la mayoría de las muestras estudiadas son de tipo bicarbonatada sódica ( $\text{Na}^+$ -  $\text{HCO}_3^-$ ) y la minoría de tipo sulfatada-sódica-cálcica ( $\text{Na}^+$ -  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{SO}_4^{2-}$ ). Apuntan además que dichas facies están controladas por la disolución de calcita, dolomita, yeso, cuarzo y pirita.

**Ayala (2006)** determinó la calidad química de las aguas subterráneas en la región de Santa Ana en la península de Paraguaná, a partir de datos obtenidos en 1973, aportados por el Ministro del Ambiente. Los datos cedidos fueron el inventario de los pozos existentes, así como los valores de los parámetros fisicoquímicos conductividad y pH medidos y la concentración de las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , determinadas en las aguas extraídas de los pozos reportados. El uso de herramientas geoquímicas como el diagrama de Piper, permitió no solo caracterizar geoquímicamente a las aguas de éste sector, si no además identificar los tipos de aguas y los procesos que controlan la composición química de las aguas de la región de Santa Ana.

Ayala (2006) determinó que atendiendo al decreto 883 (Gaceta oficial, 2005), el 6% de las aguas en la zona son de alta calidad; mientras que, el 94% se consideró de baja calidad debido a la alta concentración de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ . Esta autora indica además que la

facie predominante es de tipo  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ , que obedece a procesos de evaporación climatológica, así como, a la posible intrusión de aguas de mar provocadas por la sobreexplotación de pozos.

**Figueras (2007)** caracterizó geoquímicamente las aguas subterráneas de la región de Chigüichigüi y el sector sur del sistema de riego del río Guárico, en el estado Guárico, a través de la determinación de las especies mayoritarias  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , con el propósito de identificar los tipos de aguas y los procesos geoquímicos que controlan su composición; así como, establecer la posible contaminación de los acuíferos. La determinación de las especies químicas fue realizada mediante el uso de técnicas instrumentales como: espectroscopia de absorción y emisión atómica en llama, cromatografía iónica y espectrofotometría de UV-visible. El uso del diagrama de Piper, entre otras herramientas geoquímicas, le permitió a Figueras (2007), identificar tres tipos de aguas:  $\text{Mg-HCO}_3$ ,  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3$ ,  $\text{Ca-Mg-SO}_4^{2-}$ , producto de la disolución de carbonatos y yeso, así como por el proceso de intercambio cationico.

**Faublack (2008)** realizó un estudio sobre la caracterización geoquímica de aguas subterráneas de la región de Barbacoa, estado Aragua y Cachamas, estado Guarico, con el objetivo de determinar los procesos geoquímicos que controlan la composición química de dichas aguas. Para ello, determinó las siguientes especies:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2$ , Fe, Rb, Li, Sr, Cu, Ni, Zn, B y Ba, usando espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado y cromatografía iónica. Los resultados obtenidos le permitieron a ésta autora identificar dos grupos de agua en la zona:  $\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$  y otro  $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ .

Faublack (2008) concluye que ambos grupos de aguas están controlados por diferentes procesos hidrogeoquímicos; de este modo, las aguas del tipo  $\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$  está determinado por la interacción agua-roca, mientras que la composición química del agua tipo  $\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ , está controlado por el contacto con la atmósfera y el intercambio iónico.

## ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio está ubicada en la Faja Petrolífera del Orinoco, en el sector centro-occidental de la faja, en el bloque Junín, específicamente en el sector sur-central de dicho bloque, en el estado Anzoátegui, limitado al sur por el río Orinoco (figura 3).

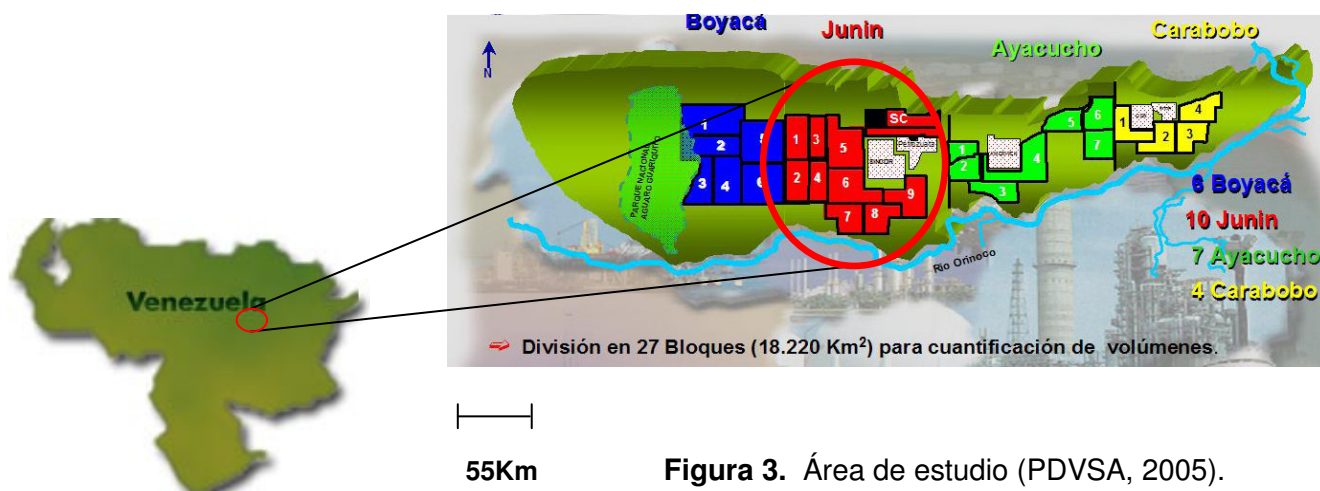


Figura 3. Área de estudio (PDVSA, 2005).

## Geología

El bloque Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco, está ubicado en el sector centro-occidental, de dicha faja, correspondiente al igual que toda la faja, a la Cuenca Oriental de Venezuela. Desde el punto de vista geológico, el subsuelo de la zona de interés está conformado por las formaciones Freites, La Pica, Las Piedras y Mesa; sin embargo existen otras formaciones geológicas más antiguas como Tigre, Merecure y Oficina, que en conjunto con las anteriores, conforman parte de la Cuenca Oriental de Venezuela (figura 4).

### La Formación Freites

Se extiende en el subsuelo, a través de todo el flanco sur de la subcuenca de Maturín casi hasta el río Orinoco. Aflora en los domos de Santa Ana y San Joaquín del área de Anaco y en una faja amplia al oeste del campo Santa Ana y al norte hasta Aragua de Barcelona. Se caracteriza principalmente por la presencia de arcillitas verdes a verdosas. Esta formación se divide en tres sectores, en la parte superior e inferior

consta de arcillas y en el medio de lutitas. El intervalo superior consta de areniscas delgadas arcillosas, de grano fino, ligeramente glauconítica, de color blanco verdoso. El intervalo inferior, además de las típicas lutitas gris verdosas, incluye areniscas verde amarillentas de grano medio a grueso, calcáreo o sideríticas muy fosilíferas. En toda la formación se presentan concreciones calcáreo-ferruginosas amarillentas en lutitas (González de Juana *et al.*, 1980).

### La Formación La Pica

Se extiende desde el Área Mayor de Santa Bárbara, al norte del estado Monagas hacia el este, hasta el Campo Posa hacia la parte sur central del Golfo de Paria. Hacia el sur, la formación llega hasta la porción norte de los campos del sur de Monagas (CECPV, 2007). Litológicamente está representada por una alternancia de lutitas y arenas. Las lutitas son blandas a medianamente duras, oscuras, típicamente limolíticas, micáceas y ligníticas, frecuentemente interlaminaadas con arenas y limos fino; las arenas son de grano fin a muy fino, no cementadas e intercaladas con limo y arcillas, ligníticas y micáceas (González de Juana *et al.*, 1980).

### La Formación Las Piedras

Esta formación aflora en la porción septentrional de los estados Anzoátegui y Monagas. En el subsuelo se extiende al este hasta Pedernales, Territorio Delta Amacuro y al Golfo de Paria. Hacia el sur, llega a las cercanías del río Orinoco en la Faja Petrolífera (CECPV, 2007). La localidad tipo de la Formación Las Piedras consiste en areniscas micáceas, friables, de grano fino y colores gris claro a gris verdoso, interlaminaada con lutitas gris a verdoso, arcillitas sideríticas, grises, lutitas ligníticas y lignitos. También se encuentran algunas calizas arenosas duras y de color verde (CECPV, 2007).

### La Formación Mesa

La Formación Mesa, de edad Cuaternaria, tiene sus representaciones en tres localidades geográficas, a saber: La Mesa de Guanipa (Anzoátegui), Tonoro y Santa Barbara (Monagas) y Santa Rosa (Anzoategui). Según *Gonzalez de Juana et al. (1980)* la Mesa de Guanipa consiste de arenas de grano grueso y gravas, con cemento ferruginoso, cementadas y muy duras; así como de conglomerado rojo a casi negro, arenas blanco-amarillenta, rojo y púrpura, con estratificación cruzada; además, contiene

lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita. Por su parte, en la Mesa de Tonoro se observan capas lenticulares de conglomerado, arenas y algunas arcillas (CECPV, 2007).

En Santa Bárbara, la parte superior consiste de gravas con intercalaciones de arena y arcilla roja y amarilla intenso; mientras que la parte inferior, formada por clásticos finos consiste de arenas gris y blanco, intercaladas con arenas arcillosas y arcillas gris abigarradas (CECPV, 2007).

Los sedimentos de la Formación Mesa, gradan de norte a sur, de más gruesos a más finos al alejarse de las cadenas montañosas del norte. Desde la parte central de Monagas al macizo de Guyana, gradan de más finos a más gruesos (CECPV, 2007).

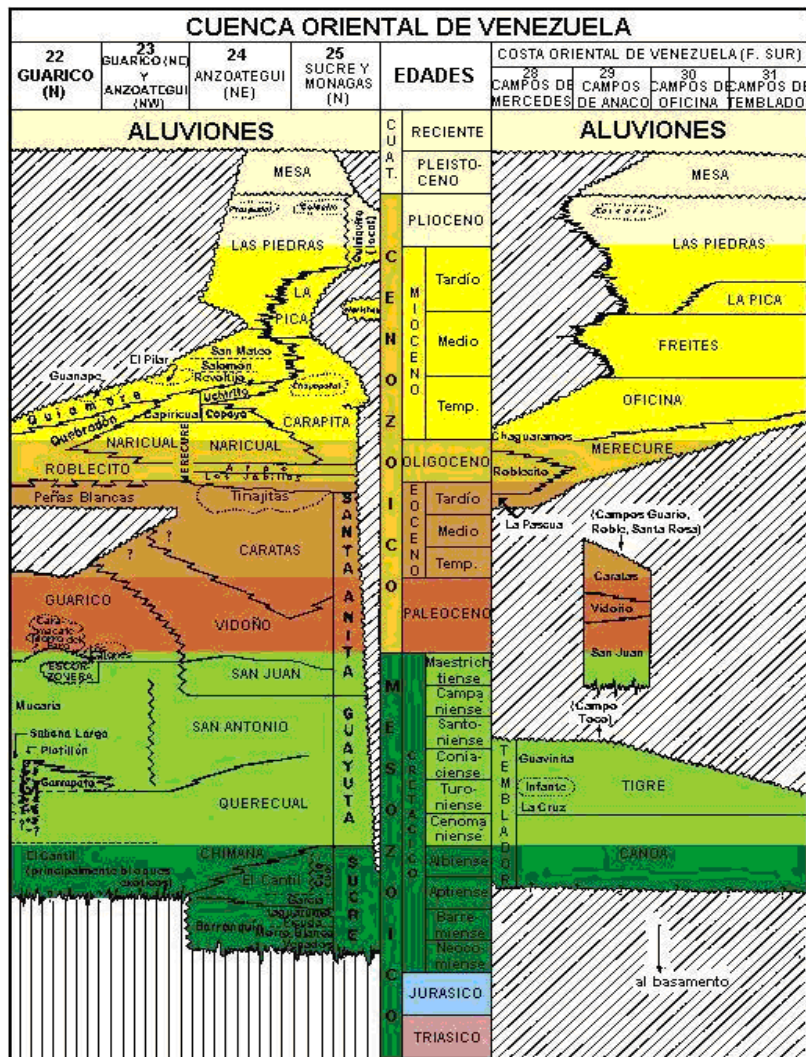


Figura 4. Correlación de la Cuenca Oriental de Venezuela (CECPV, 2007).

## **METODOLOGÍA**

El presente estudio se llevó a cabo en cuatro etapas, a saber: campo, que comprendió el proceso de captación de las muestras para su posterior análisis; pre-laboratorio, donde se realizó la revisión bibliográfica; laboratorio, correspondiente a la fase de análisis químicos, para la determinación de los elementos y especies químicas de interés; y finalmente, la interpretación de los resultados obtenidos. La figura 5 resume la metodología seguida en el presente estudio.

### **ETAPA DE CAMPO**

Esta etapa realizada entre el Instituto de Ciencias de la Tierra y el Instituto de Zoología Tropical, a través del proyecto “Evaluación sistemática de las condiciones socio-ambientales en el área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco” se llevó a cabo en el mes de julio del año 2007.

Es importante destacar que antes de la salida de campo, se llevó a cabo la preparación de la misma, que incluyó la logística, la ubicación de los posibles puntos de muestreo, el estudio preliminar de la zona y el tratamiento adecuado de los envases para la preservación de las muestras. Los envases de 500 mL de capacidad de polietileno, usados para contener el agua destinada a la determinación de las especies cationicas, fueron lavados previamente en el laboratorio con HNO<sub>3</sub> al 10% (v/v) y posteriormente con agua destilada y con agua deionizada. Para la captación de las muestras usadas para la determinación de la alcalinidad y las especies anionicas, los envases de polietileno de 250 mL de capacidad fueron lavados con agua destilada y con agua deionizada.

Durante la fase de campo se realizó la determinación “*in situ*” de los parámetros fisicoquímicos pH, Eh, conductividad y temperatura. Las medidas de estos parámetros fueron realizadas a través de una sonda multiparamétrica, mientras que las medidas de Eh se realizó mediante un electrodo acoplado a un potenciómetro. Simultaneamente, fueron colectadas 31 muestras de aguas, distribuidas de la manera siguiente: 18 corresponden a aguas de aljibes, 12 aguas de ríos y 1 de morichal.



Para el caso de las alícuotas destinadas a la determinación de aniones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  almacenadas en los envases de 250 mL, fueron preservadas a una temperatura aproximada de 5°C. Mientras que las muestras destinadas a la determinación de cationes, fueron envasadas en botellas de polietileno de 500 mL, previamente filtradas a través de membranas de 0,45  $\mu\text{m}$ , seguidamente preservadas con 2 mL de  $\text{HNO}_3$  concentrado y bidestilado. Esta información fue suministrada por el personal encargado de la campaña de muestreo.

### **ETAPA DE PRE-LABORATORIO**

Esta etapa comprendió la distribución de las muestras y la ubicación geográfica de los puntos muestreados, así como la documentación acerca del área de estudio. Esta incluyó la revisión bibliográfica, que comprendió la documentación acerca del área de la hidrogeoquímica, así como la búsqueda de información geológica correspondiente a la zona de estudio; además, de la organización de los parámetros fisicoquímicos correspondientes a cada muestra, tales como, conductividad, Eh y pH, medidos durante la campaña de muestreo.

### **ETAPA DE LABORATORIO**

Esta etapa fue llevada a cabo en el laboratorio de hidrogeoquímica del Instituto de Ciencias de la Tierra (ICT) de la Universidad Central de Venezuela (UCV). Durante esta fase se desarrolló el análisis de las muestras, que involucró la determinación de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ , usando espectrómetro Perkin Elmer modelo 2000. Para el caso del  $\text{Na}^+$  y el  $\text{K}^+$  se usó la técnica de emisión atómica en llama, mientras que para el  $\text{Mg}^{2+}$  se realizó a través de absorción atómica. Por su parte, para la determinación del  $\text{Ca}^{2+}$  se hizo uso de la técnica de espectrometría de emisión óptica con fuente de plasma (EEO-ICP). Es importante destacar, que para el empleo de cada una de las técnicas instrumentales fue necesario realizar patrones correspondientes a los elementos que fueron determinados y a partir de estos fue calibrado el instrumento (Apéndice A).

La determinación de los aniones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  fue realizada mediante la técnica de cromatografía iónica, usando un cromatógrafo iónico marca DIONEX, modelo DX-120.

Por su parte, la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  fue determinada teóricamente, por lo cual fue necesario establecer un modelo que involucró de la mineralogía presente en la zona y

la posible interacción de las aguas subterráneas con las mismas. Esto permitió conocer la concentración teórica del  $\text{HCO}_3^-$  en el sistema, producto de la interacción con el medio. En ese sentido y atendiendo a la litología dominante en la zona de estudio se propuso como asociación mineralógica, la presencia de albita, moscovita, feldespatos y caliza. El modelo desarrollado según Morantes (1997), así como los cálculos realizados son mostrados en el apéndice D.

### **ETAPA DE POST-LABORATORIO**

Esta etapa consistió en el ordenamiento, análisis, discusión e interpretación de los resultados obtenidos en la fase anterior. Para ello, fueron implementadas una serie de herramientas estadísticas y graficas como el diagrama de Piper, cajas graficas, mapas de isoconcentración y correlaciones elementales.

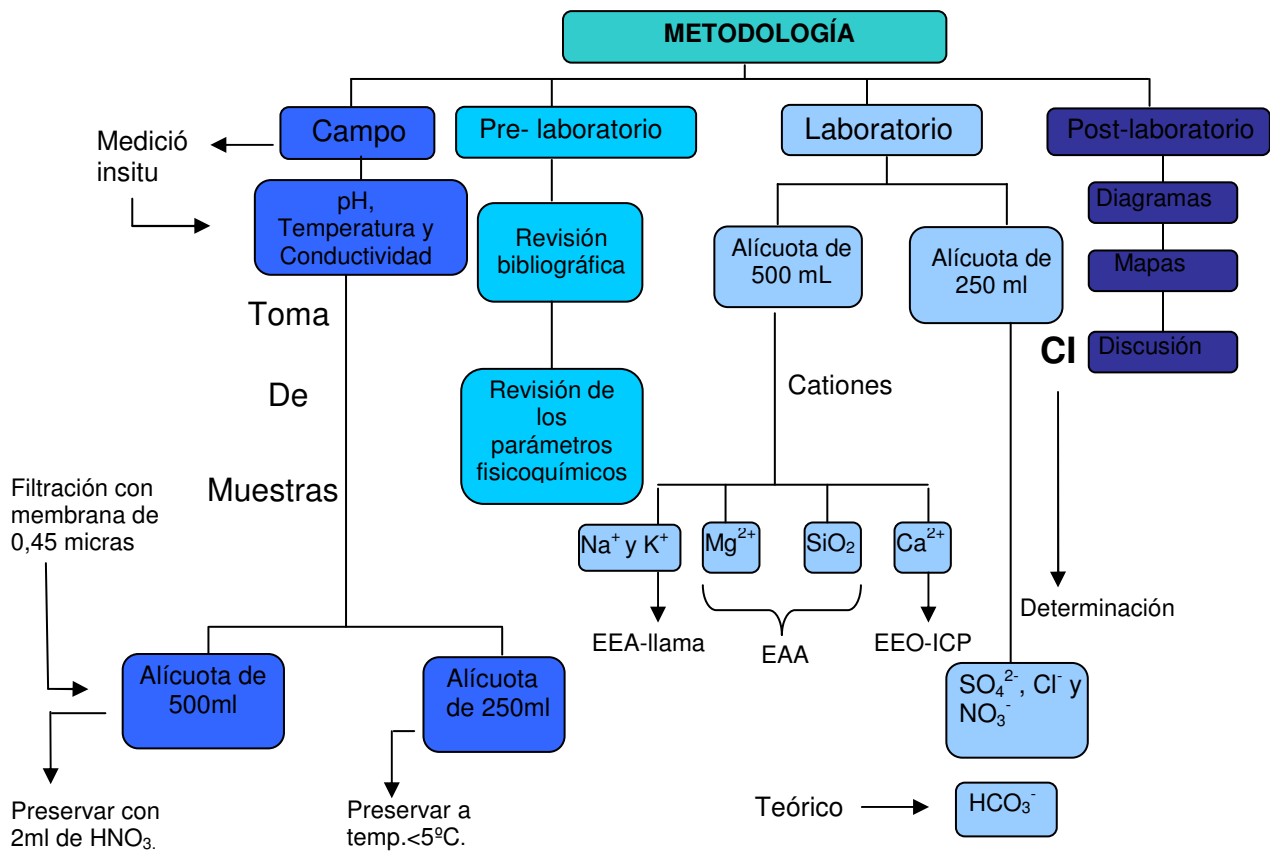


Figura 5. Metodología seguida en éste estudio.

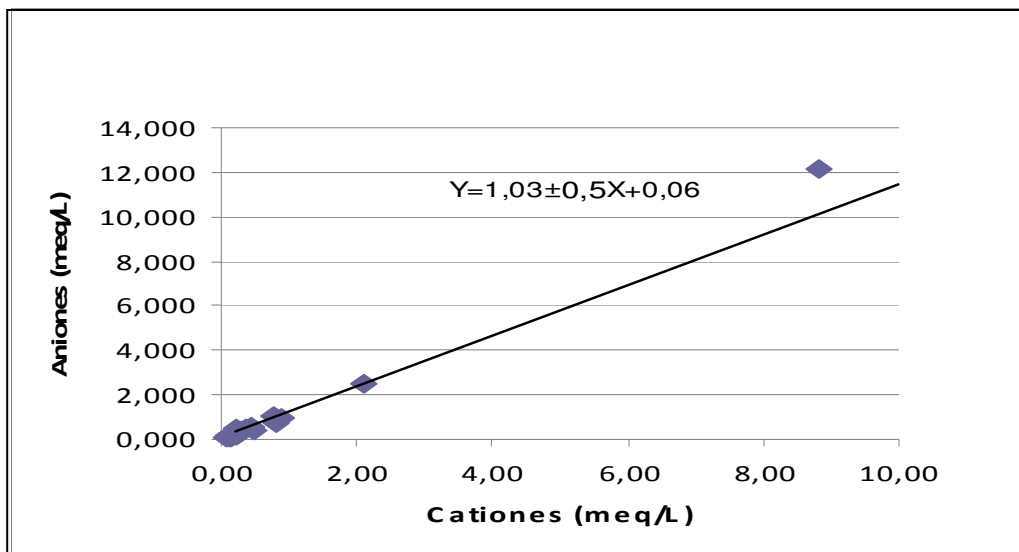
## ***PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS***

La presentación y discusión de resultados es desarrollada a través de la implementación de la validación de resultados, seguido de la caracterización geoquímica, usando los resultados obtenidos en las cajas gráficas y los mapas de distribución elemental; así como, la clasificación de los diferentes tipos de agua, atendiendo a diversas herramientas, como diagramas de Piper; finalmente son construidas algunas relaciones iónicas, así mismo y se clasifican las aguas subterráneas de acuerdo a la calidad química de las mismas.

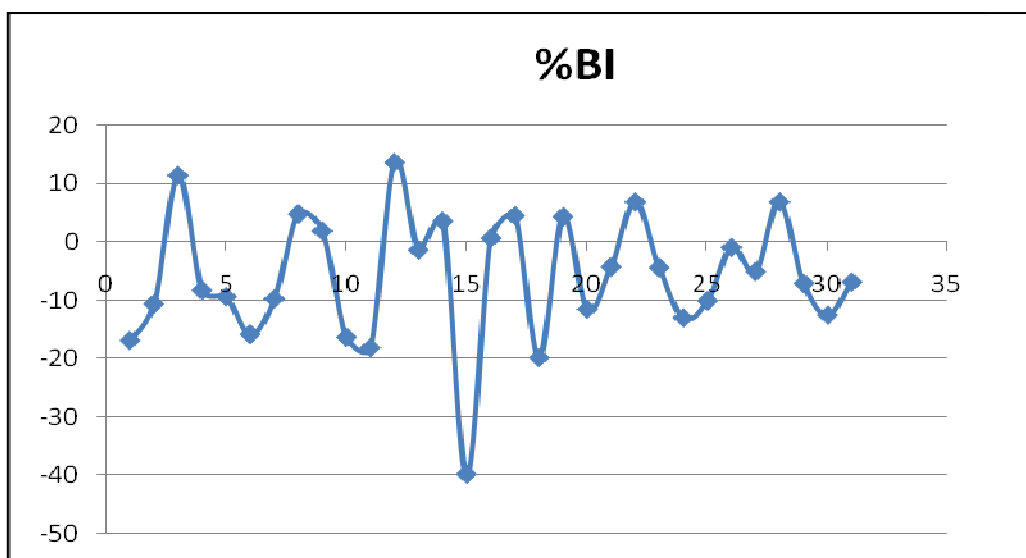
### **VALIDACIÓN DE RESULTADOS**

Los métodos de validación aplicados en este estudio, para corroborar los datos generados a partir de los respectivos análisis químicos, es implementada a través de la determinación de las relaciones cationes contra aniones; así como, mediante la distribución del balance iónico.

La relación entre la sumatoria de cationes (meq/L) y la sumatoria de aniones (meq/L) mostrada en la figura 6, es descrita a través de una ecuación que tiene una pendiente de  $1,0 \pm 0,2$  y un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,99$ , con un error porcentual promedio de 5,9%. En el mismo orden de ideas, nótese que ésta pendiente es muy cercana a 1, lo cual indica que a pesar de los errores cometidos durante el análisis de las muestras, o de la existencia de probables especies químicas no determinadas, los resultados pueden considerarse confiables para ser utilizados en las interpretaciones geoquímicas. Hem (1985) indica que un error menor a 10% en el balance iónico refleja que los resultados son confiables; sin embargo, existe un conjunto de muestras que se encuentran por encima de éste valor, (figura 7), superiores al 10%, que podrían atribuirse a errores en las determinaciones analíticas. De acuerdo a Montero (1996) los valores que se encuentran por encima son los responsables de la desviación de la tendencia general, o lo que es lo mismo se alejan de la línea de pendiente. Este mismo autor atribuye dichos valores a la probable presencia de especies orgánicas, déficit de aniones o cationes y a errores analíticos.



**Figura 6.** Relación cationes contra aniones.



**Figura 7.** Porcentaje de balance iónico.

## CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Es conocido que los datos geoquímicos frecuentemente no describen una distribución normal, es por ello que se acude a la estadística no paramétrica (Reinman et al., 2005). El uso de las cajas graficas, permiten representar el 50% de la población en cuartiles superiores e inferiores (75% y 25%); así como un valor ubicado dentro de la caja, representado por un punto que corresponde a la mediana de la población, que además describe la simetría o sesgo de la misma. Es importante destacar la ventaja de la mediana con respecto al promedio, puesto que éste no es afectado por la presencia de

valores extremos, lo cual es muy común cuando se trata de datos geoquímicos. Por su parte los bigotes reportados en las cajas corresponden al 50% restante de la población, como extremos mínimos y máximos. Los valores que se encuentren por encima de éstos umbrales son considerados anómalos.

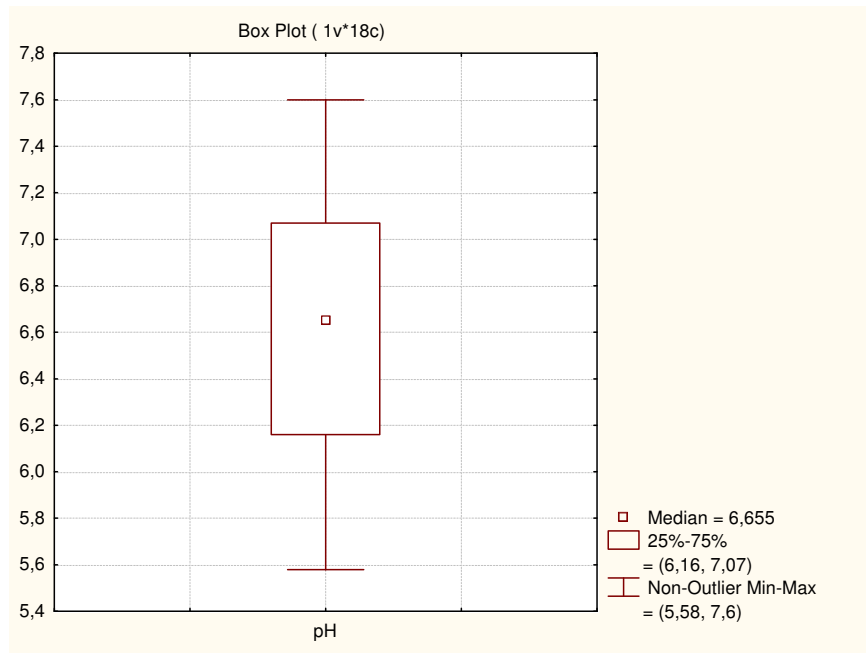
Así mismo, con el propósito de visualizar la distribución espacial de las especies químicas determinadas y los parámetros fisicoquímicos medidos en las aguas subterráneas en las cuencas ubicadas en el sector centro-sur del bloque Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco, fueron construidos mapas, usando para ello el programa computacional Golden Surfer 8, con el propósito de tratar de entender los fenómenos geoquímicos que imperan en el área

## **pH**

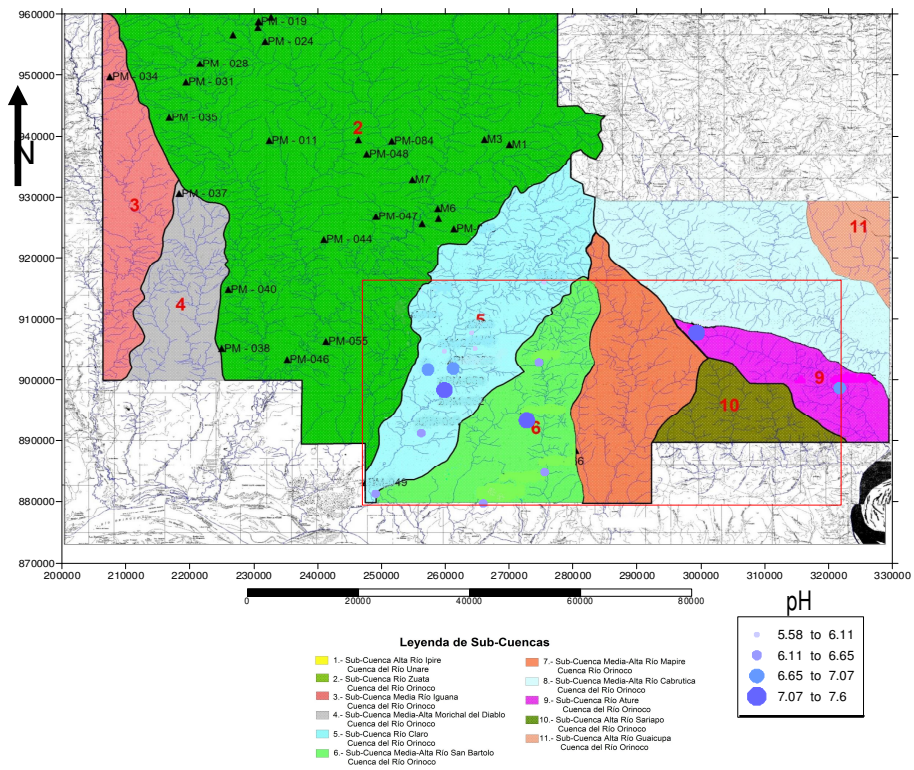
La caja gráfica construida para los valores de pH medidos (figura 8), muestra que el valor de fondo es de 6,65 unidades de pH, con valores máximos y mínimos de 5,58 y 7,6 unidades, respectivamente. Especialmente, se observa que los valores más altos de pH están distribuidos entre las sub- cuencas de los ríos San Bartolo, Alto y Claro, mientras que los valores más bajos de pH se distribuyen a lo largo de toda la zona (figura 9).

De acuerdo con los valores antes señalado, estos se encuentran dentro del intervalo establecido por diversos autores, para procesos de interacción del agua con minerales silicatados, como caolinita, feldespato y cuarzo, que está entre 6,4 y 7,1 unidades de pH.

Por su parte, Yanes (1997) establece la presencia de varios tipos de aguas basándose en niveles de pH, como: ligeramente ácidas (6,4 – 7,1), ligeramente alcalinas (7,1 – 7,6) y muy alcalinas (8,2 – 10,9). De acuerdo con ésta clasificación el 100% de las muestras analizadas en el presente estudios son del tipo ligeramente ácidas.



**Figura 8.** Caja de bigote para pH.

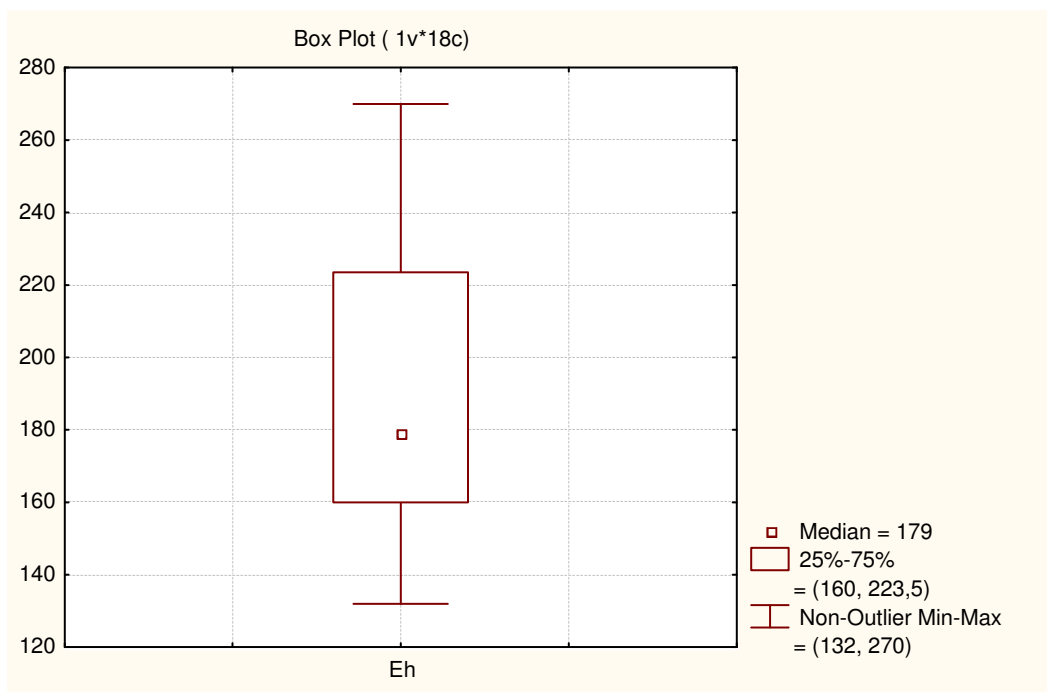


**Figura 9.** Distribución espacial de pH.

## Eh

En cuanto al Eh su caja gráfica muestra que éste parámetro tiene un valor de fondo de 179 mV y un intervalo que oscila entre 132 y 270 mV (figura 10). Es de hacer notar que no se tienen valores anómalos.

Por su parte, la distribución espacial de Eh en la zona de estudio (figura 11) indica que los mayores valores están ubicados en el sector centro-sur, correspondiente a la zona sur de la Sub - Cuenca Media – Alta San Bartola, Cuenca del río Orinoco. En general los valores de Eh medidos en éste estudio, son propios de ambientes oxidantes. Estos valores podrían estar indicando la presencia de acuíferos no confinados en la zona de estudio; éste tipo de acuífero facilita los procesos de intercambio catiónico, en presencia de minerales de arcillas (Panagopoulos *et al.*, 2004). Igualmente, puede señalarse que los valores altos de Eh, apuntan hacia la infiltración directa de agua hacia el subsuelo. Además esto podría estar indicando que se trate de aguas meteóricas.



**Figura 10.** Diagrama de bigote para Eh.



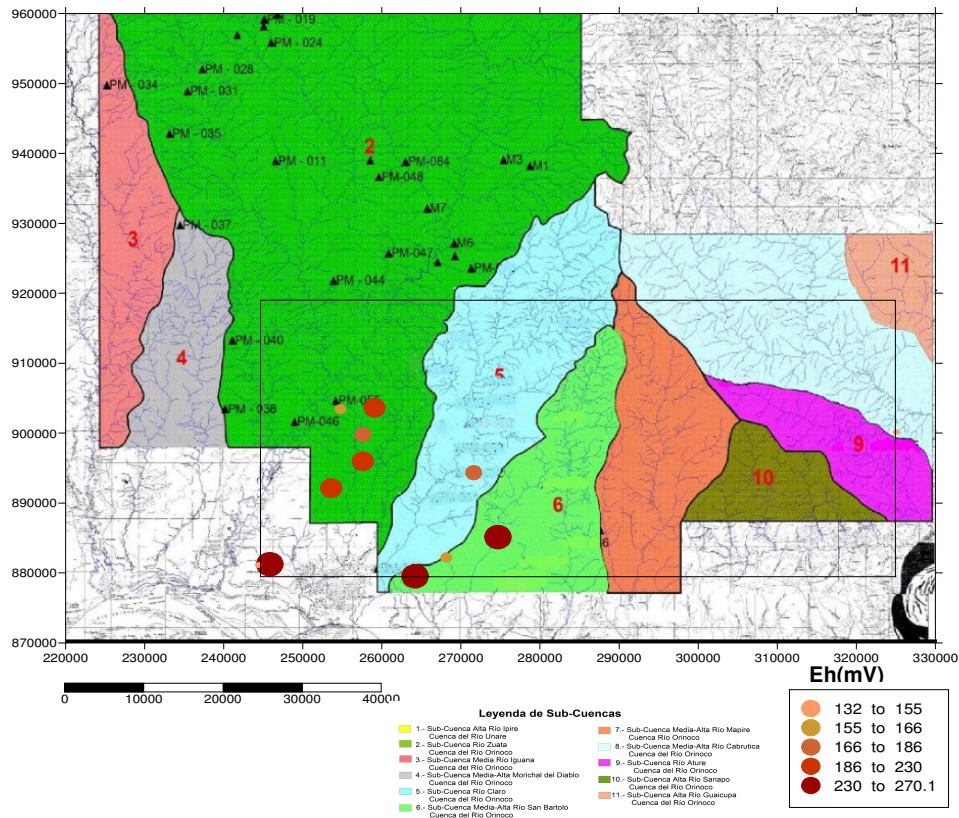


Figura 11. Distribución espacial de Eh.

## Sodio

El  $\text{Na}^+$  de acuerdo a la caja grafica mostrada en la figura 12, presenta un valor de fondo de 1,77 mg/L y un intervalo de concentración que varía entre 1,07 y 3,29 mg/L, mostrando dos valores extremos, de 3,57 y 6,03 mg/L, correspondientes a las muestras M-25 y M-20, respectivamente. Ambas muestras fueron captadas en sectores, geológicamente dominados por la Formación Mesa.

De acuerdo con la distribución espacial de las sub-concentraciones de  $\text{Na}^+$  mostrada en la figura 13, puede apreciarse que la zona en general está dominada por bajas concentraciones de esta especie; mientras que, son los valores anómalos, sin un patrón definido, están ubicadas entre si a distancias relativamente considerables, en sub-cuencas hidrográficas diferentes. En ese sentido la muestra M-25 está ubicada al noroeste de la sub- cuenca del río Ature, mientras que la muestra M-20 está ubicada al sur de la sub- cuenca del río Claro.

Según Guo y Wang (2004), existen diferentes causas para encontrar concentraciones relativamente elevadas de  $\text{Na}^+$ , como intercambio iónico, actividad industrial y agrícola, éstas últimas pueden afectar gravemente la calidad de las aguas subterráneas. Estos autores sugieren que en los sectores donde hay aumento de la concentración de  $\text{Na}^+$  y disminución de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , ocurre el intercambio de  $\text{Na}^+$  absorbido en la superficie de los minerales de arcilla del acuífero, contenidos en los sedimentos finos. No obstante los bajos valores predominantes en las aguas subterráneas estudiadas, indican que una de las fuentes de éste ión, parece también provenir del agua de lluvia.

### **Potasio**

A partir de la caja gráfica construida para el  $\text{K}^+$  (figura 14) se puede extraer que el valor de fondo es de 1,81 mg/L, con valores máximos y mínimos de 0,25 y 4,06 mg/L respectivamente. Así mismo los valores anómalos, identificados para ésta especie al igual que  $\text{Na}^+$ , corresponden a las muestras M-20 y M-25. Estos valores se encuentran bastante distantes de la mediana, de éste modo la muestra M-20 tiene una concentración de potasio de 75,5 mg/L; mientras que, la muestra M-25 es de 17,4 mg/L.

El mapa de la distribución espacial correspondiente a la concentración de  $\text{K}^+$  (figura 15), muestra que en el sector nor-central de la zona de estudio están ubicados los valores anómalos para ésta especie; mientras que las concentraciones más bajas se ubican al sur-oeste. Ambas ocupan las sub-cuencas del río Zuata, Media-Alta del río San Bartolo y río Claro. Por su parte, las concentraciones medianamente bajas se identificaron al nor-oeste del área de estudio, correspondiente a la zona central de la sub-cuenca del río Claro.

Nótese que el comportamiento espacial mostrado por el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{K}^+$  son similares, así como las anomalías detectadas en las mismas muestras. Estas anomalías podrían ser atribuidas al uso de fertilizantes, debido a que una de las actividades llevadas a cabo en el área es la agricultura. Así mismo el  $\text{K}^+$  presenta las concentraciones más bajas de todas las especies químicas estudiadas, ya que tiene una fuerte tendencia reincorporarse dentro de los productos sólidos de la meteorización, como minerales de arcillas (Hem, 1985).

Por otra parte, tanto el  $K^+$  como el  $Na^+$  pueden ser aportados a través de la formación de sales acumuladas en la superficie del terreno luego de algún evento pluviométrico, seguido del proceso de evapotranspiración. Posteriormente, estas sales pueden ser lavadas, lixiviadas e infiltradas hacia el subsuelo durante períodos de lluvia. Asimismo, no se descarta que en general al igual que el  $Na^+$ , el  $K^+$  este asociado a los eventos atmosféricos.

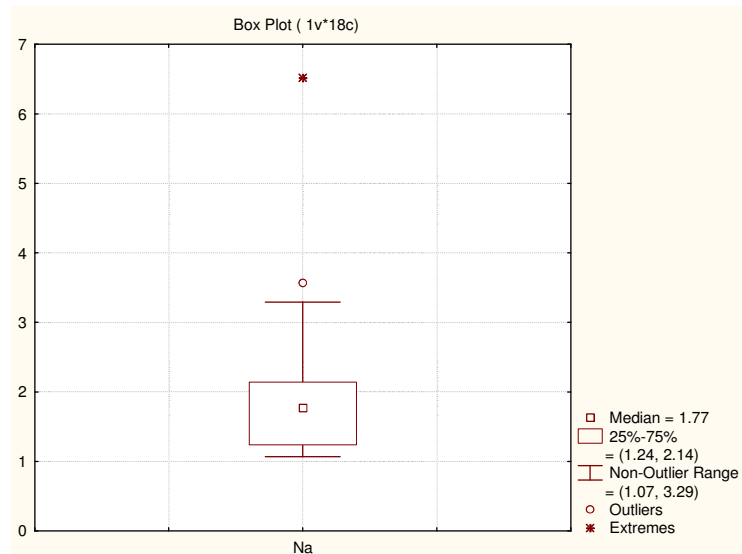


Figura 12. Caja de bigote para la concentración de  $Na^+$

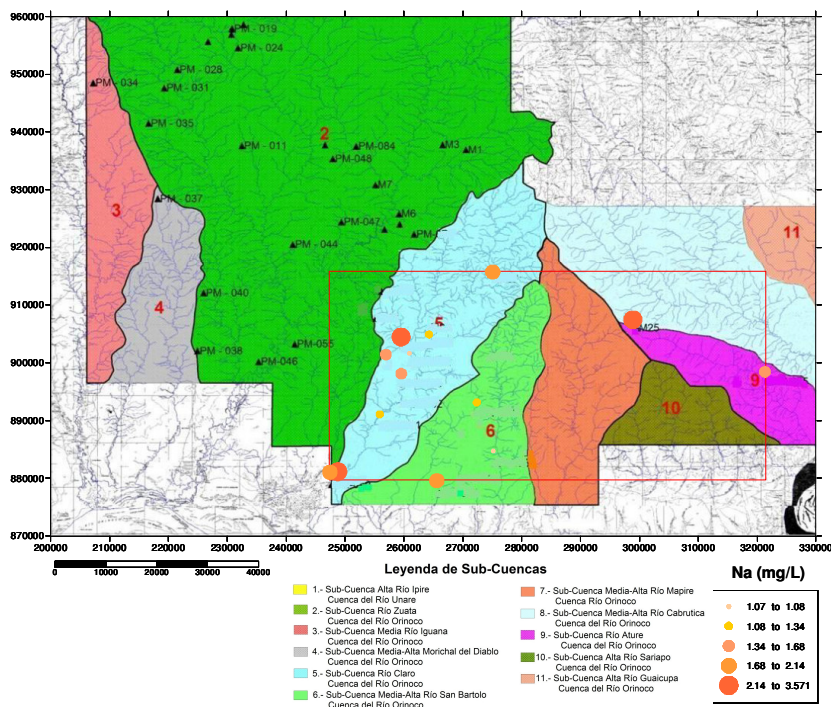
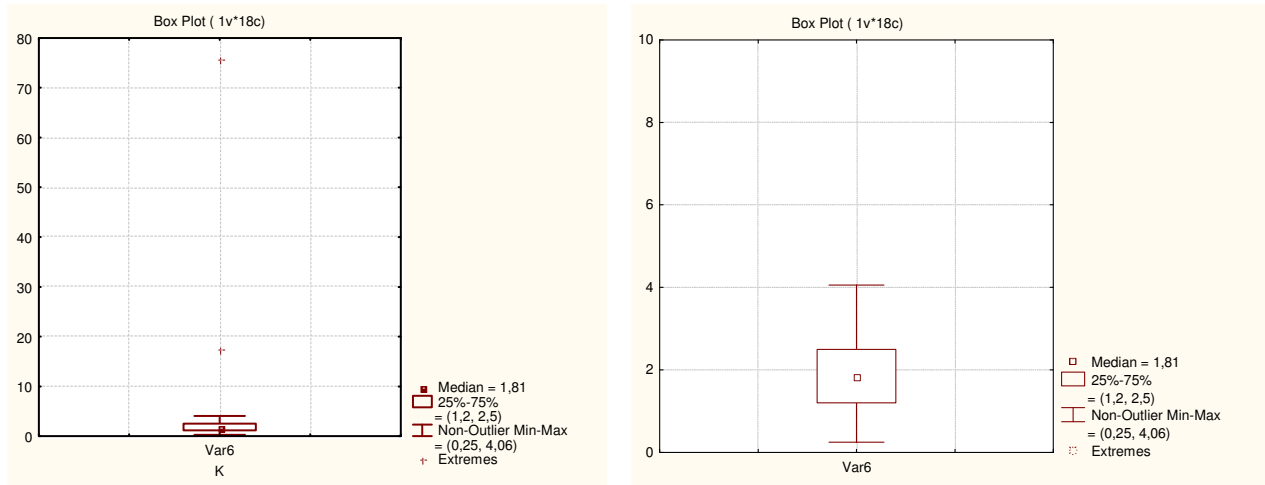
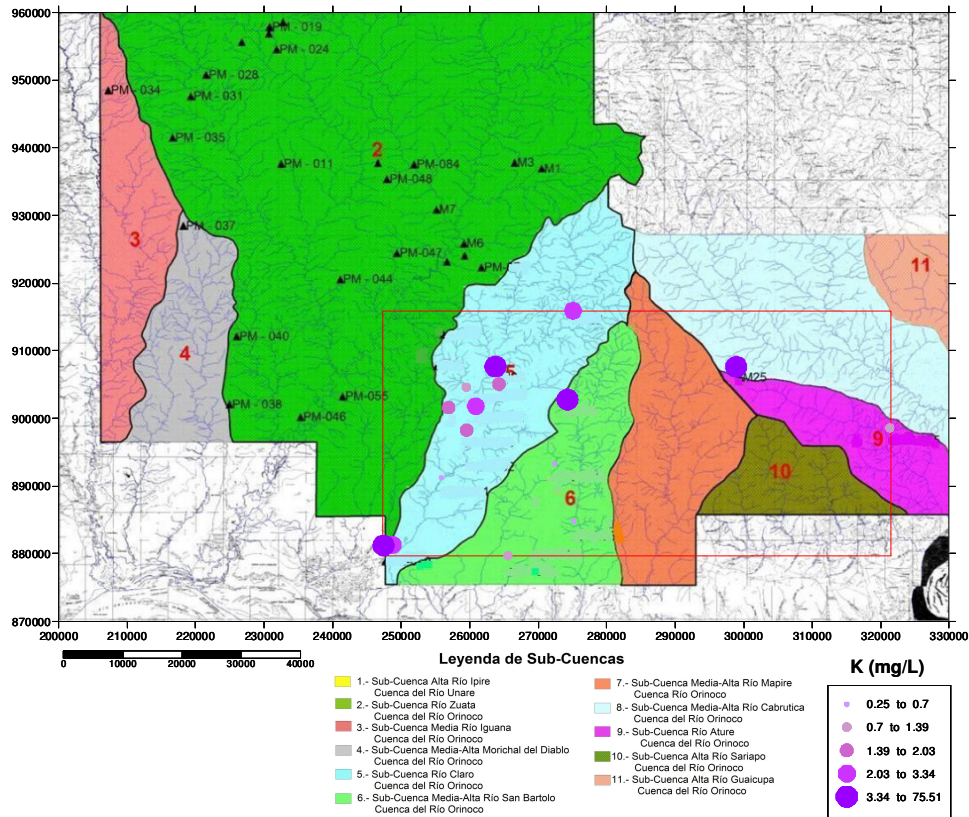


Figura 13. Distribución espacial de  $Na^+$ .



**Figura 14.** (a) Diagrama de bigote para la concentración de  $K^+$ ; (b) Diagrama de bigote para  $K^+$ , sin los valores anómalos



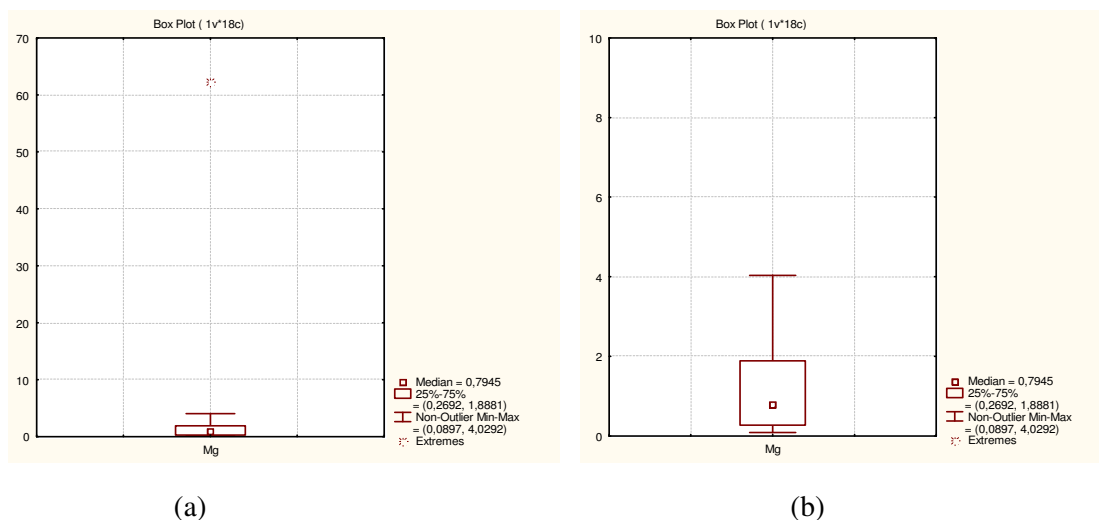
**Figura 15.** Distribución espacial de  $K^+$ .

## Magnesio

De acuerdo a la caja gráfica elaborada para  $Mg^{2+}$  mostrada en la figura 16.b, el valor de fondo en los aljibes del bloque Junin de la Faja petrolífera del Orinoco es de 0,80 mg/L con un intervalo de 0,09 a 4,03 mg/L. Igualmente se identificó un valor anómalo correspondiente a la muestra M-20 (figura 16.a) , al igual que en las especies anteriores, lo cual corrobora que esta muestra tiene un comportamiento diferente al resto de las muestras captadas en la zona de estudio, cabe destacar que dicha tiene un balance iónico bastante alto.

La figura 17 presenta la distribución espacial del ion  $Mg^{2+}$ , en la cual puede claramente notarse que en el área predominan las bajas concentraciones de esta especie, particularmente en el sector sur-oeste de la cuenca; mientras que en la parte norte está presente la muestra con valores anómalos. Las altas concentraciones de  $Mg^{2+}$  podrían atribuirse a la presencia al lavado de rocas evaporitas (Custodio y Llamas, 1976).

En este sentido, se aprecia que el comportamiento espacial de  $Mg^{2+}$  es diferente al de  $Ca^{2+}$ , donde existe enriquecimiento de  $Mg^{2+}$  empobrece el  $Ca^{2+}$ . Esto se puede explicar a través de la alta capacidad de intercambio iónico de ambas especies, con potenciales iónicos similares. También es posible que estén presentes otros factores como, el climatológico y el antropico, éste ultimo a través de fertilizantes enriquecidos en  $Mg^{2+}$ .



(a) Diagrama de bigote para la concentración de  $Mg^{2+}$ ;  
(b) Diagrama de bigote para la concentración de  $Mg^{2+}$ , sin los valores anómalos.

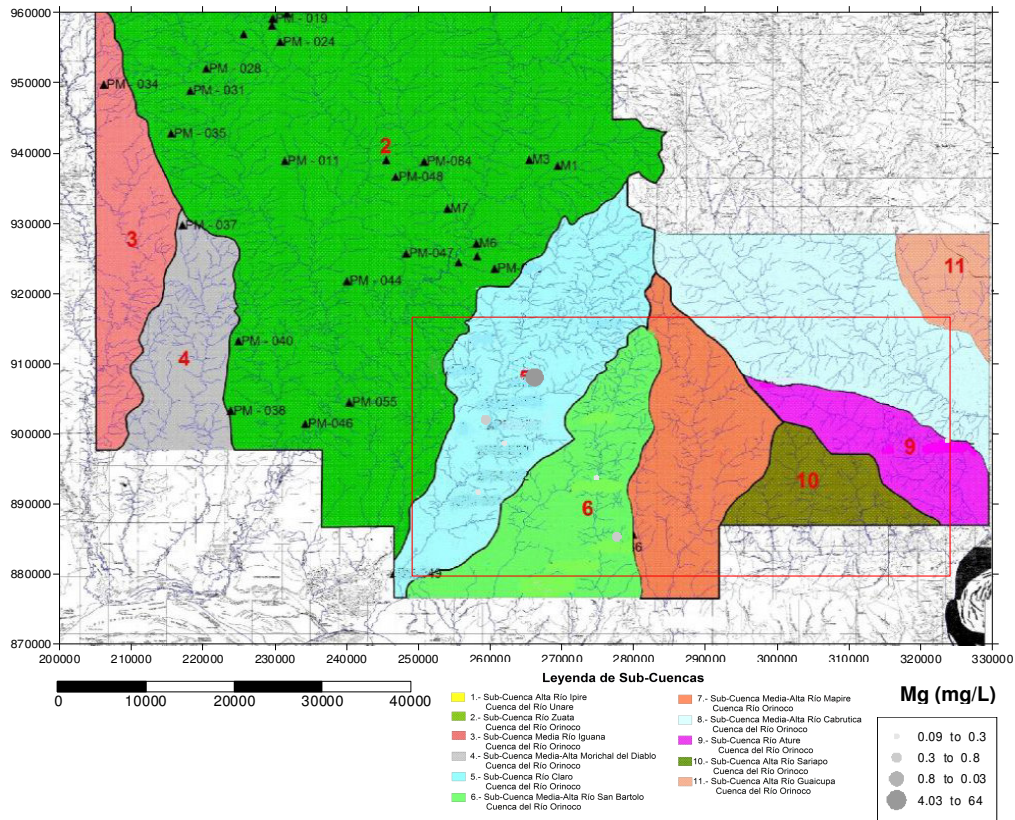


Figura 17. Distribución espacial de Mg<sup>2+</sup>

## Calcio

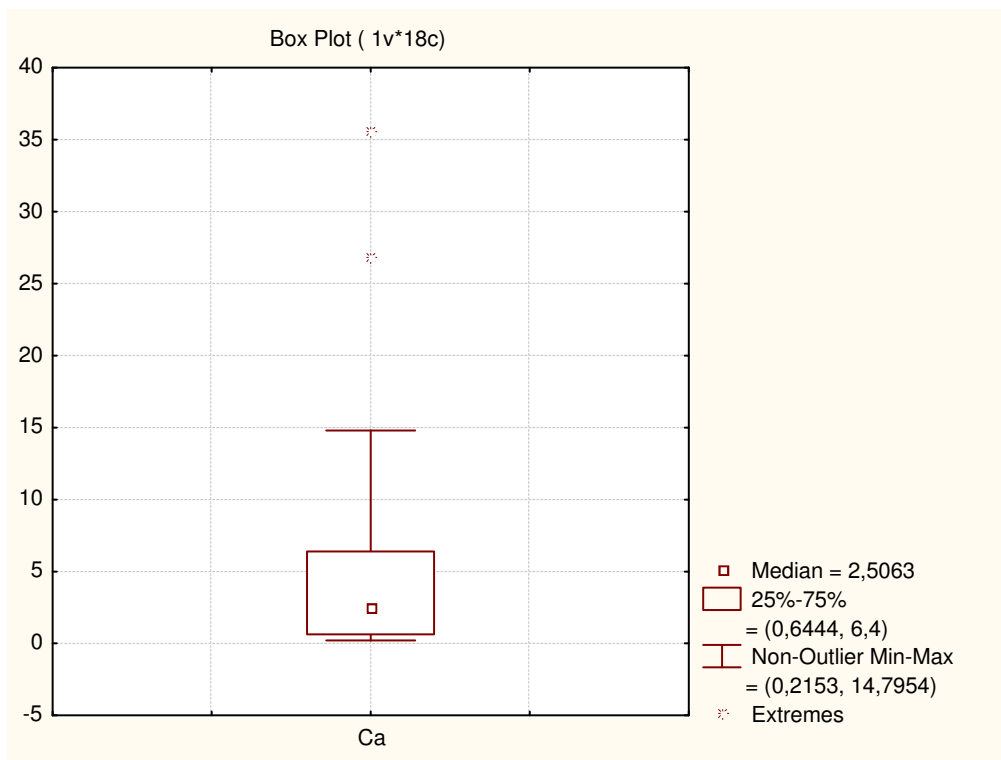
A partir de la caja gráfica construida para la concentración de Ca<sup>2+</sup> (figura 18) se puede extraer un valor de fondo de 2,51 mg/L, cuyos valores mínimos y máximos son 0,22 y 14,79 mg/L respectivamente. Es evidente que la diferencia entre éstos dos valores, parece indicar de la existencia de una amplia variabilidad, que puede ser atribuida a diferentes aportes de ésta especie al medio. Además son detectados valores anómalos, en las muestras que presentan esta misma tendencia en los casos anteriores: M-20 y M-25. Es importante destacar que de acuerdo a las concentraciones denominadas, el Ca<sup>2+</sup> es el catión que presenta las concentraciones más altas en toda la zona de estudio.

De acuerdo con la figura 19, que presenta el mapa de distribución espacial de Ca<sup>2+</sup> en la zona de estudio, se observa claramente que las altas concentraciones están ubicadas hacia el sector norte del área de estudio. Puede notarse como a medida que se avanza hacia el sur de la zona, disminuye la concentración de Ca<sup>2+</sup>; en ese sentido, se aprecian las concentraciones más baja al sur de las sub-cuencas en estudio,

indicando que posiblemente la fuente principal de ésta especie se encuentre en el sector norte.

Posiblemente este comportamiento este asociado al proceso de intercambio iónico, que involucra el aporte del  $\text{Ca}^{2+}$  presente en el agua hacia las arcillas y del  $\text{Na}^+$  sorbido sobre estas al agua, a medida que el agua fluye a través del sustrato poroso.

Por otro lado, es de notar que el comportamiento espacial del  $\text{Ca}^{2+}$  es similar a la distribución mostrada por  $\text{HCO}_3^-$ , lo cual sugiere un posible origen común para ambas especies; Custodio y Llamas (1976) indican que una posible fuente de  $\text{Ca}^{2+}$  a las aguas subterráneas está asociada con la disolución de cemento calcáreo y el aportado por el agua de lluvia; señalan además que está frecuentemente en estado de saturación cuya estabilidad en la solución dependen del equilibrio  $\text{CO}_2\text{-HCO}_3\text{-CO}_3^{2-}$ .



**Figura 18.** Diagrama de bigote para la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ .

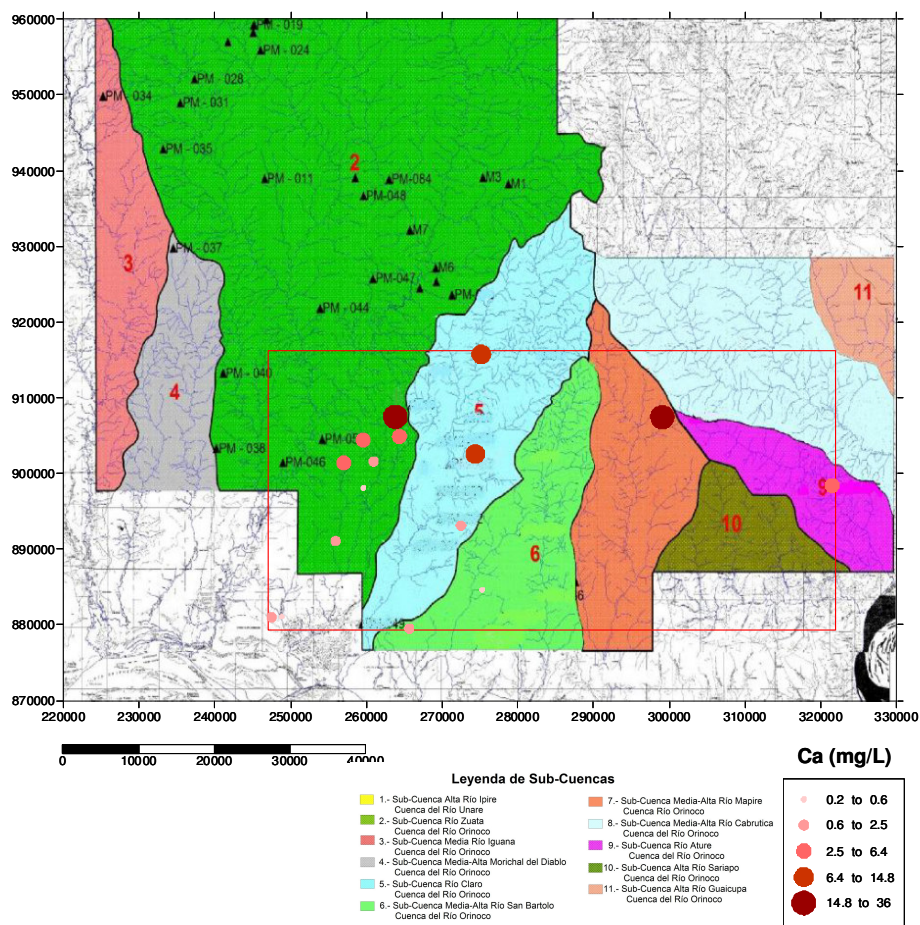


Figura 19. Distribución espacial de  $\text{Ca}^{2+}$ .

## Bicarbonato

La figura 20 muestra la caja gráfica correspondiente a las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$ . Nótese que tiene un valor de fondo de 13,99 mg/L y un intervalo de concentraciones que va desde 4,57 hasta 53,69 mg/L. Es evidente la amplia variabilidad de esta especie en el sistema, como consecuencia de diferentes fuentes de aportes. Por otro lado, al igual que en las otras especies, las muestras M-20 y M-25 presentan valores anómalos de 226,05 y 118,33 mg/L, respectivamente.

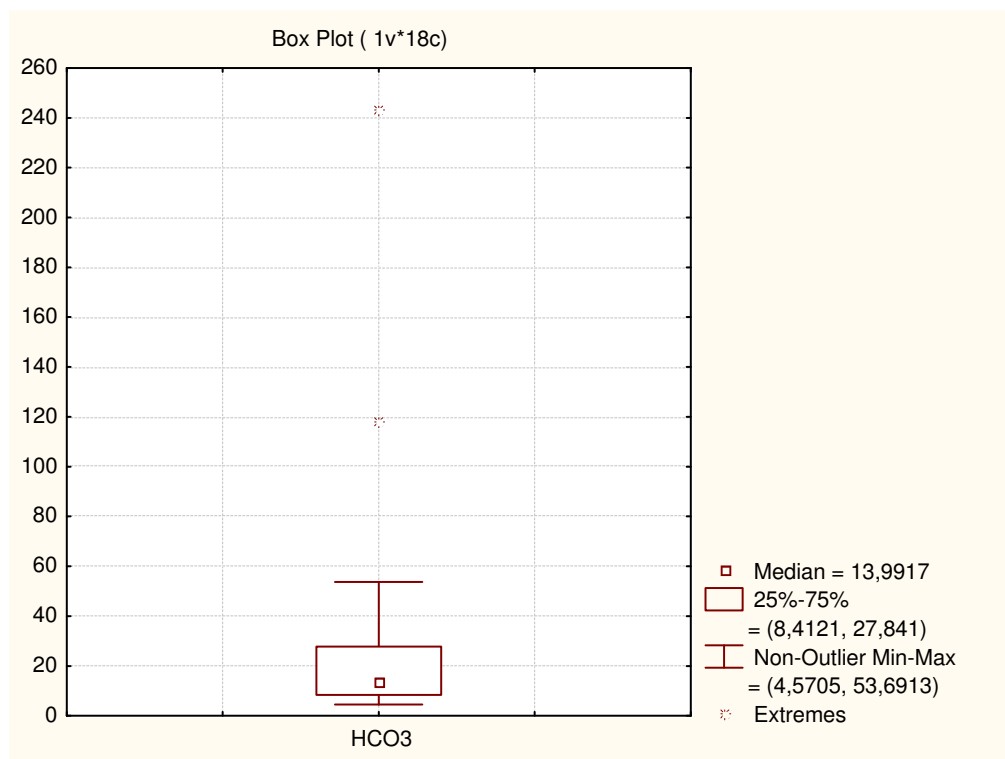
Observando la figura 21, se puede notar que la distribución espacial del  $\text{HCO}_3^-$  presenta las altas concentraciones en la parte norte de la zona de estudio, incluyendo las anomalías; mientras que en la parte sur se encuentran las bajas concentraciones, cuyo comportamiento es similar a la distribución resultante para  $\text{Ca}^{2+}$ . Se puede apreciar la distribución espacial que muestra el  $\text{HCO}_3^-$  es opuesto o no corresponde con el



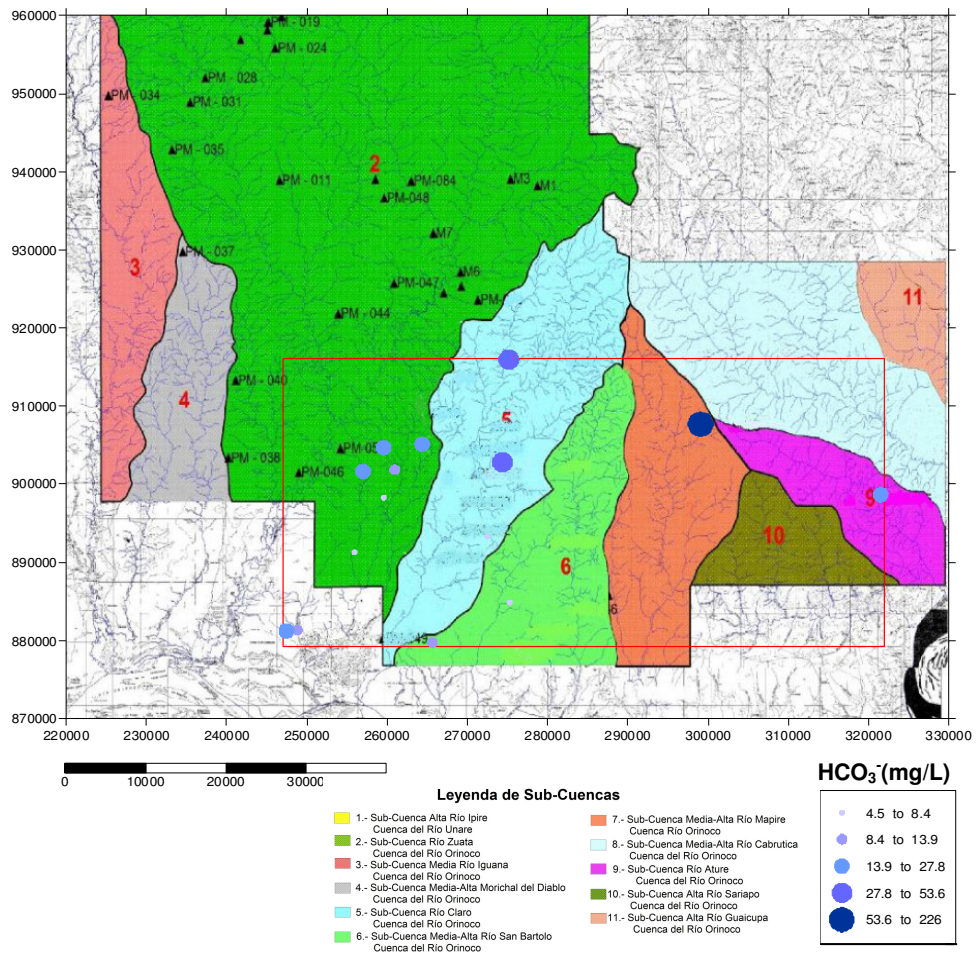
mostrado por el pH, a altas concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$ , bajos niveles de pH. Es posible que diversos procesos estén afectando dicho comportamiento, así como el clima, y las variaciones anuales y la disolución de  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ .

Custodio y Llama (1976) plantean diversos orígenes para el ión  $\text{HCO}_3^-$ , entre los que se encuentran la disolución de  $\text{CO}_2$  atmosférico o del suelo, disolución de calizas y dolomías e hidrólisis de silicatos catalizadas por el  $\text{CO}_2$ , atmosférico, no obstante, es posible que todos los procesos estén actuando al mismo tiempo.

Una de las formas de que ocurra el proceso es cuando el agua subterránea que percola a través de las fracturas de la roca migra hacia los acuíferos de la cuenca, se mezcla con el agua meteórica que contiene  $\text{CO}_2$  considerablemente, dicha infiltración introduce  $\text{HCO}_3^-$  a las aguas subterráneas (Guo y Wang, 2004).



**Figura 20.** Diagrama de bigote para la concentración de  $\text{HCO}_3^-$ .



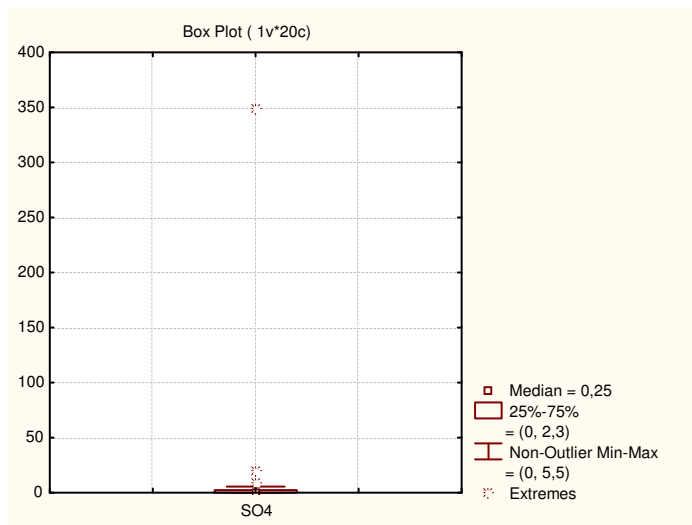
**Figura 21.** Distribución espacial de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

## Sulfato

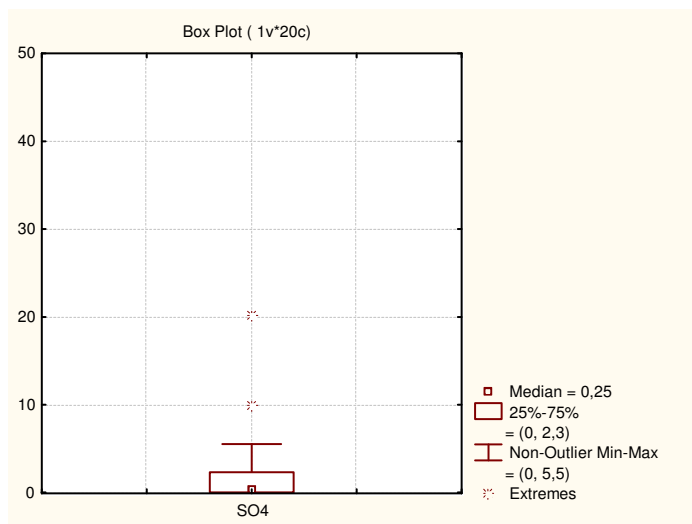
A partir de la caja gráfica construida para el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, mostrada en la figura 22.b, se puede extraer que el valor de fondo para este ión es de 0,25 mg/L, mientras que los valores correspondiente al máximo y al mínimo van desde no detectado y 5,5 mg/L respectivamente, mostrando dos valores extremos, los cuales coinciden con el resto de las especies. En general las concentraciones encontradas para ésta especie son bastante bajas.

La figura 23 muestra la distribución espacial de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, en la cual se puede apreciar que no existe un patrón definido; sin embargo, es de notar que en el sector centro-occidental de la zona de estudio se encuentran las concentraciones más bajas, mientras que el resto del área corresponde a concentraciones entre moderadas y altas. Existe cierta similitud entre la distribución espacial mostrada por el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  pueden atribuirse a la disolución de yeso y/o anhidrita y así como al agua de lluvia. Por otro lado, las muestras que presentan anomalías, tiene concentraciones que según Custodio y Llamas (1976) podrían deberse a actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas.



(a)



(b)

**Figura 22.** (a) Diagrama de bigote para la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ . (b) Diagrama de bigote para la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  ampliado.

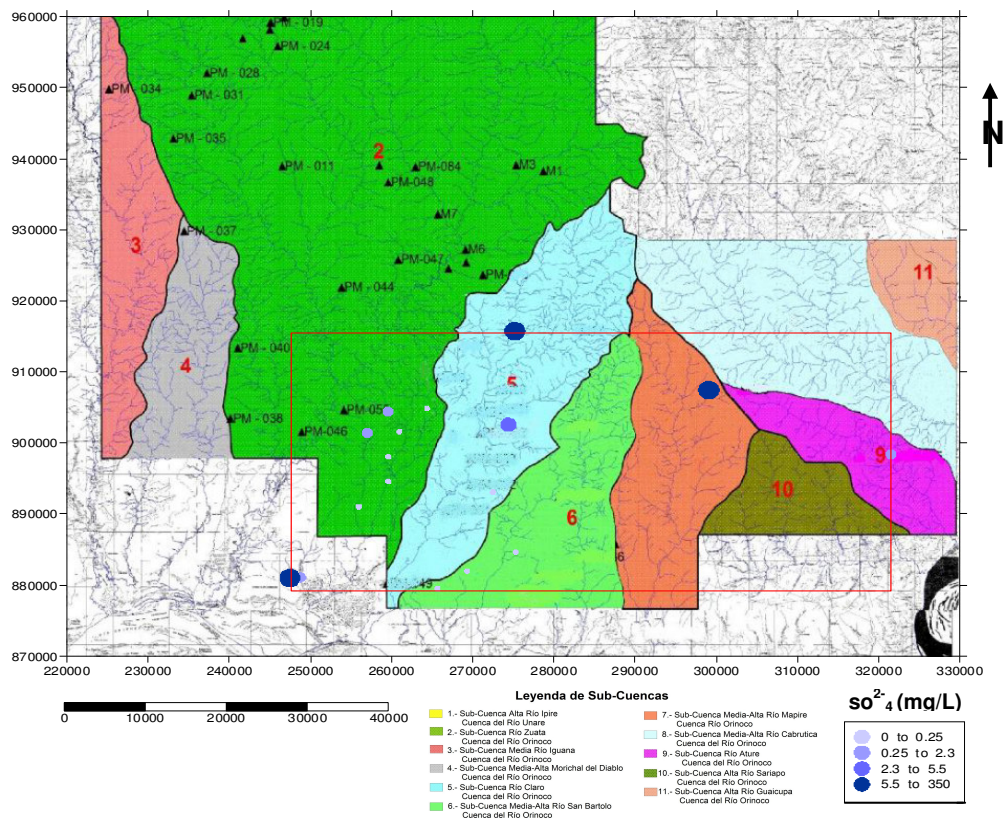


Figura 23. Distribucion espacial de  $SO_4^{2-}$ .

## Cloruro

La caja gráfica correspondiente a las concentraciones de  $Cl^-$ , es mostrada en la figura 24. Obsérvese que el valor de fondo para esta especie en la zona de estudio es de 2,45 mg/L, con un intervalo de concentración que va desde 0,8 hasta 4,0 mg/L, con valores anómalos que corresponden a las muestras PM-058 y M-20 de 9,4 y 34 mg/L, respectivamente. Es importante destacar que la muestra M-20 presenta el mismo comportamiento que para las otras especies.

En el mismo orden de ideas, al observar la figura 25 que muestra la distribución espacial de  $Cl^-$ , se aprecia que la zona está dominada por relativamente altas concentraciones, aunque no presenta ningún patrón definido; sin embargo, es evidente que en el sector centro-occidental predominan las bajas concentraciones, al igual que el caso del  $SO_4^{2-}$ .

Custodio y Llama (1976), señalan que el ión  $Cl^-$  es muy difícilmente alterado por cambio iónico u otro tipo de acción, y su posible origen está asociado al agua de lluvia y su concentración en el terreno, mientras que las muestras que presentan anomalías,

particularmente la PM-058, posiblemente se deba a vertidos industriales, éstos pueden aportar cantidades altas de ésta especie. Asimismo, en las áreas donde predominan altas relaciones de evapotranspiración, también pueden obtenerse aguas con valores considerables de Cl<sup>-</sup>.

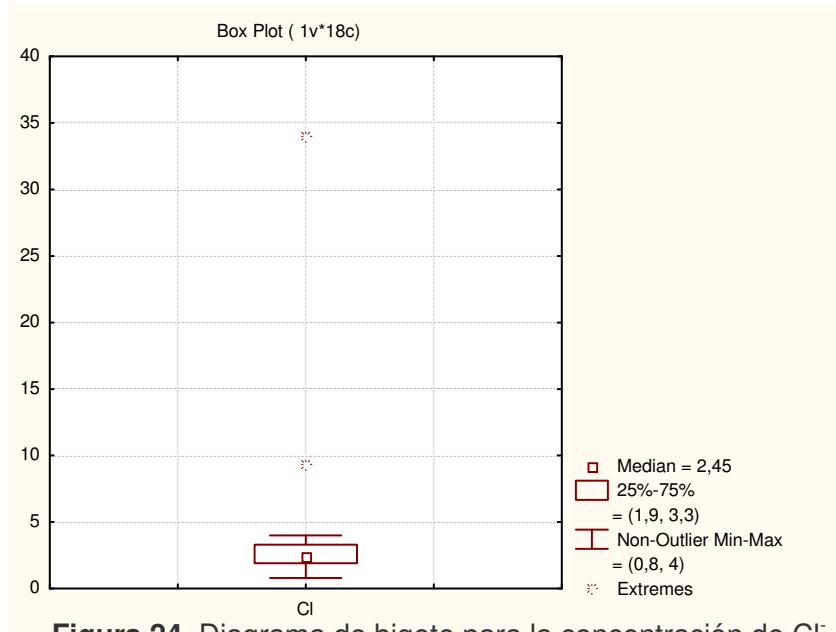


Figura 24. Diagrama de bigote para la concentración de Cl<sup>-</sup>.

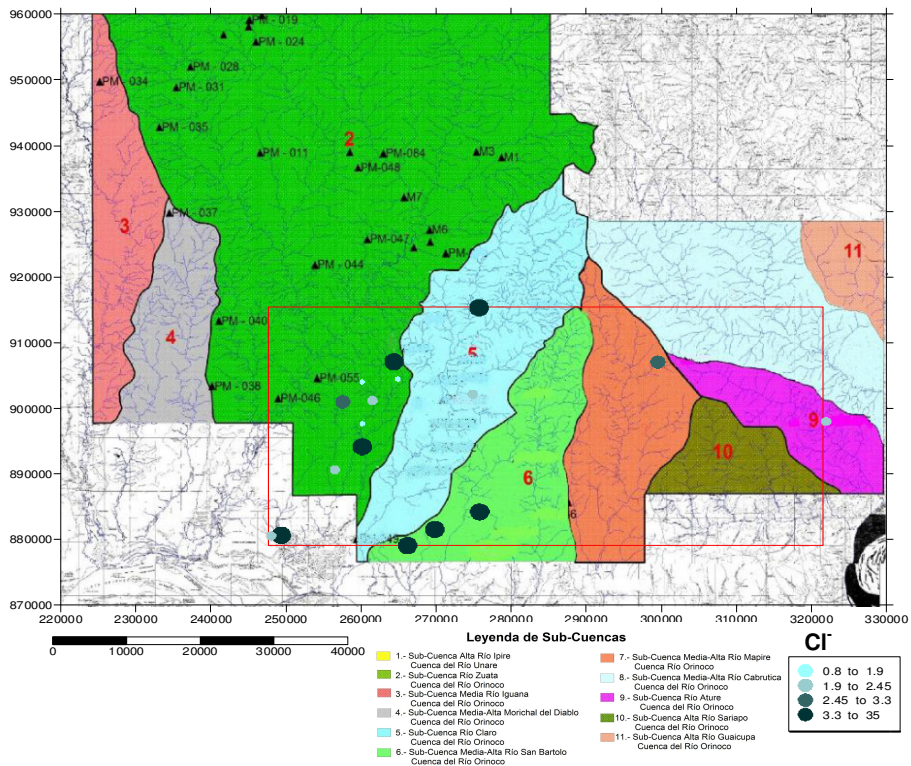


Figura 25. Distribución espacial de Cl<sup>-</sup>.

## Nitratos

La caja gráfica obtenida para el  $\text{NO}_3^-$  en la zona de estudio (figura 26) indica que éste tiene un valor de fondo de 1,7 mg/L, con valores mínimos y máximos que está entre no detectado y 4,5 mg/L respectivamente. Así mismo, están presente tres valores anómalos correspondientes a las muestras M-20 (12,0mg/L), especialmente ubicadas en la sub-cuenca de río Claro, PM-062 (14,1mg/L) y M-17 (16,0mg/L) en la sub-cuenca del río Zuata.

Por su parte, la figura 27 muestra la distribución espacial de la especie iónica  $\text{NO}_3^-$ . En ella puede observarse que este ión sigue un patrón irregular, sin embargo es de notar que tiene un comportamiento diferente al resto de las especies químicas analizadas. No obstante, en la parte centro-occidental de la zona de estudio se identifican las mayores concentraciones de dicha especie.

En ese sentido, es importante destacar que el sector con las concentraciones más altas de  $\text{NO}_3^-$  posiblemente esté siendo afectado por procesos de contaminación. Diversos autores señalan que en aguas subterráneas las concentraciones de ésta especie deben encontrarse por debajo de 10 mg/L, de lo contrario se estaría en presencia de aguas alteradas producto de las actividades del hombre. Es posible que para el resto del área de estudio el mecanismo que esté operando sea nitrificación natural o  $\text{NO}_3^-$  proveniente en pequeñas proporciones en el agua de lluvia.

Por su parte, Pacheco y Cabrera (2003), sugieren que una fuente natural importante de  $\text{NO}_3^-$  en las aguas subterráneas, son los óxidos de nitrógenos, éstos se oxidan pasando a  $\text{HNO}_3$ , siendo éste mucho más hidrosoluble y se absorbe más fácilmente en la superficie de la materia particulada en suspensión. A su vez los óxidos son inducidos a través de diferentes fuentes, siendo la más común la actividad bacteriana.

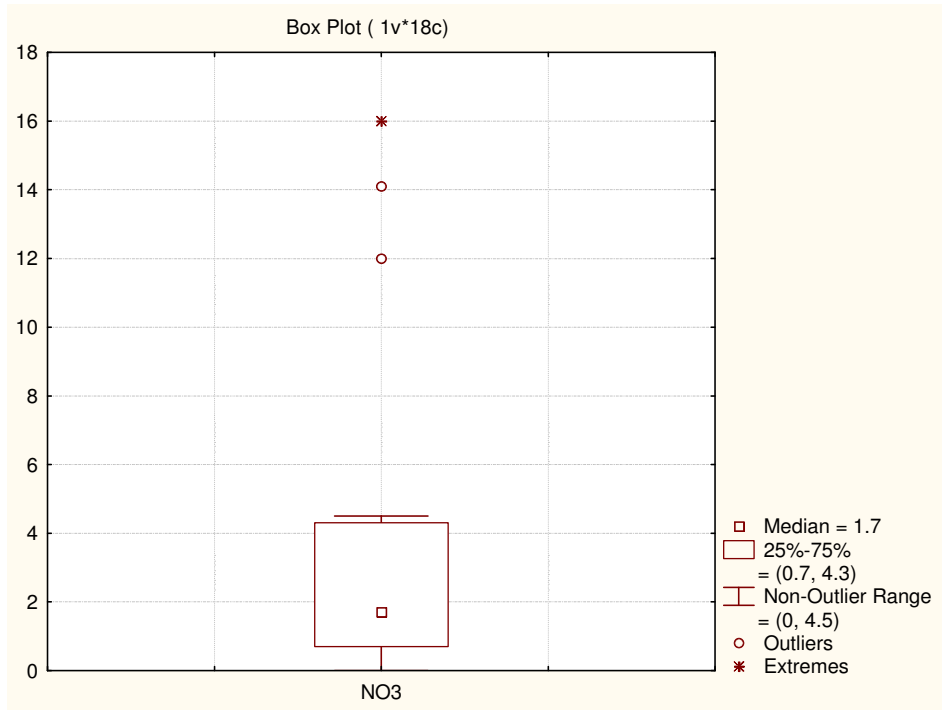


Figura 26. Diagrama de bigote para las concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

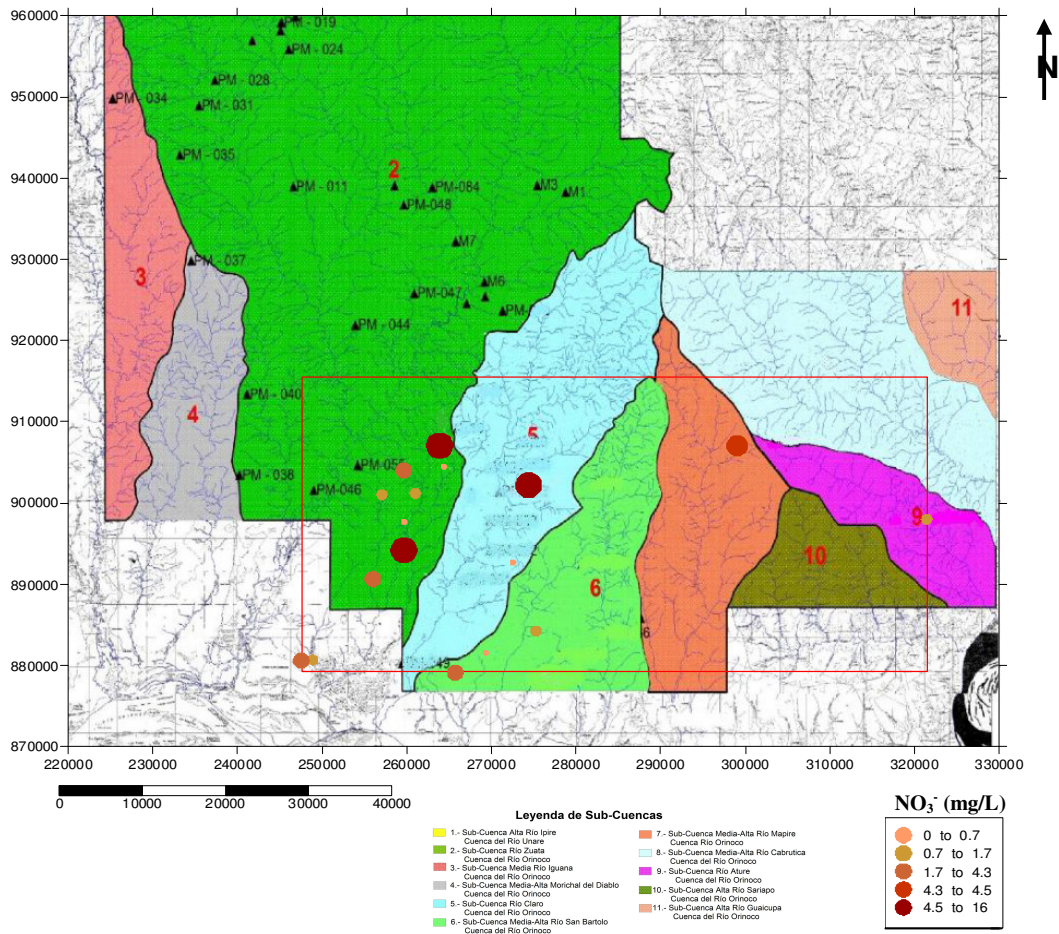
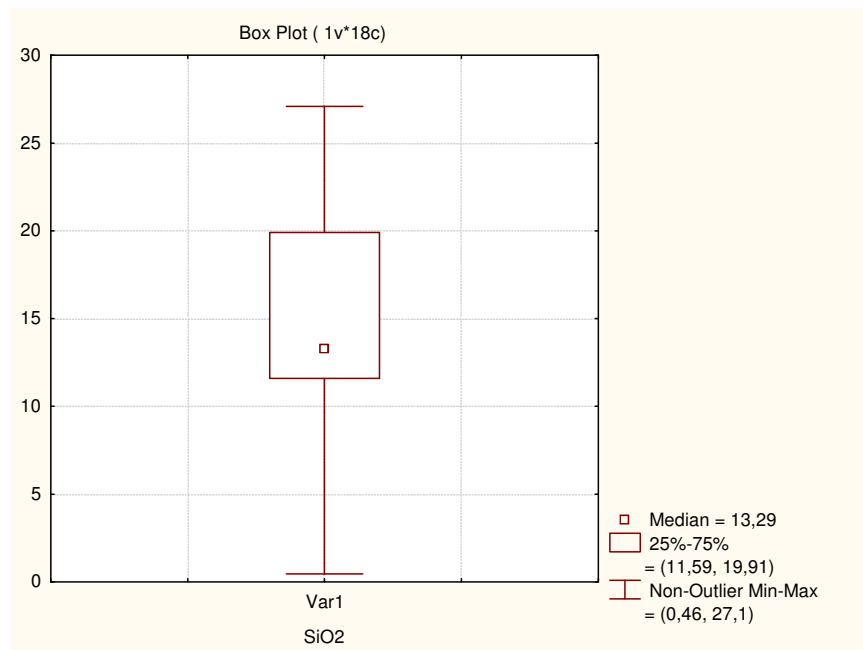


Figura 27. Distribución espacial de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

## SiO<sub>2</sub>

La caja grafica realizada para las concentraciones de SiO<sub>2</sub> (figura 28), muestra que el valor de fondo para ésta especie es de 13,29 mg/L, mientras que los valores máximos y mínimos son 0,46 y 27,10 mg/L, respectivamente, Custodio y Llamas (1976) reportan que la concentración maxima de esta especie en las aguas subterráneas, asociadas a rocas silisiclasticas es 40 mg/L, lo cual corresponde a las aguas subterráneas estudiadas. Sin embargo, puede señalarse que las bajas concentraciones observadas en algunos sectores, parecen estar asociadas con la presencia de sustratos rocosos más resistentes a los procesos de meteorización geoquímica.

Por otro lado, a pesar de no encontrarse valores anómalos, en la figura 29 se puede observar que al oeste del área de estudio se ubican las mayores concentraciones de SiO<sub>2</sub>, posiblemente éste sector, está compuesta de minerales más susceptibles, que aportan dicha especie las aguas subterráneas.



**Figura 28.** Caja de bigote para SiO<sub>2</sub>.



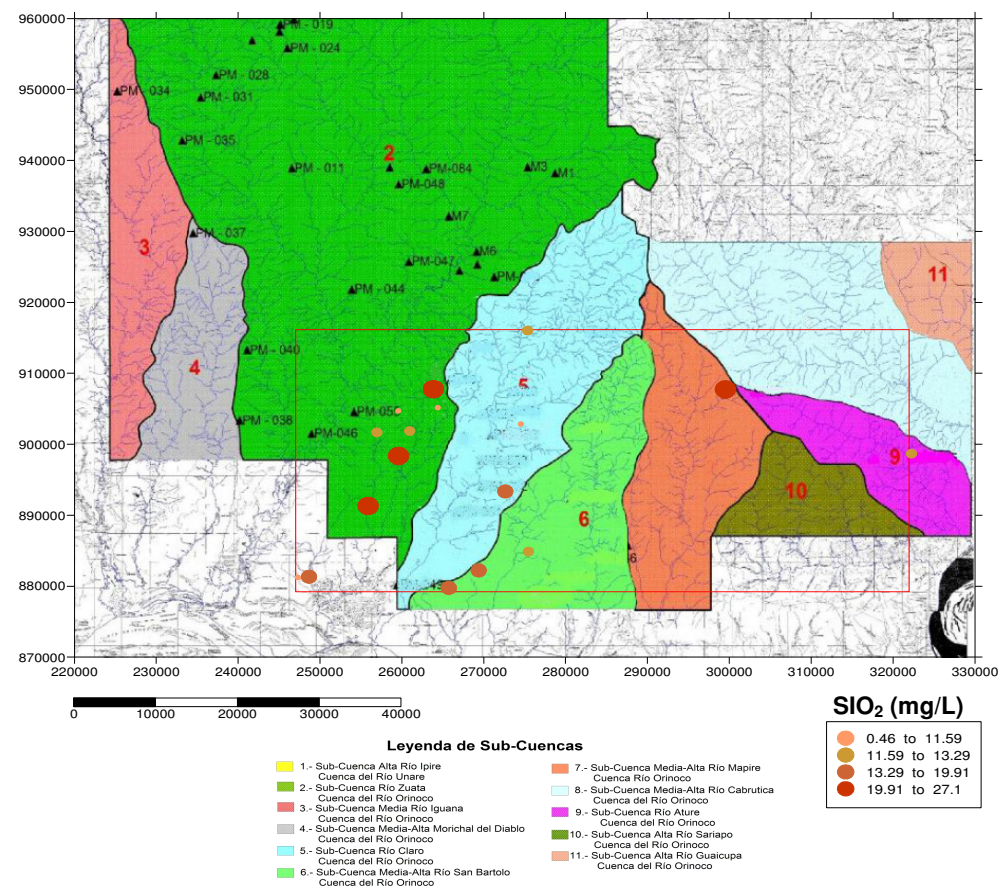


Figura 29. Distribución espacial de SiO<sub>2</sub>.

## CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

### Según sólidos disueltos totales (SDT)

Según Hem (1985) las aguas subterráneas pueden ser clasificadas de acuerdo a la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) como salmueras, con concentraciones superiores a 100.000 mg/L; saladas cuyas concentraciones están entre 10.000 y 100.000 mg/L; aguas salobres, que oscilan entre 1.000 y 10.000 mg/L; y finalmente, aguas dulces con valores de SDT menores a 1.000 mg/L. Para el caso particular de las muestras analizadas en el presente estudio, el 100% de las mismas son consideradas como aguas dulces, arrojando concentraciones menores a 100 mg/L (tabla 2).

Tipo de agua	Concentración de SDT (mg/L)
Salmuera	>100.000
Salada	10.000 -100.000
Salobre	1.000 – 10.000
dulce	<1000

**Tabla 1.** Clasificación de las aguas según la concentración de SDT.

Es importante destacar que en el estudio hidrogeoquímico realizado por Urrutia (2009) en la sub-cuenca del río Zuata de la Faja Petrolífera del Orinoco, el 93% de las muestras correspondían a aguas dulce y el resto a aguas salobres, lo cual indica que a medida que se desplaza hacia el sur del área Junín las aguas subterráneas van disminuyendo la concentración de SDT.

#### **Según su origen y tiempo de contacto**

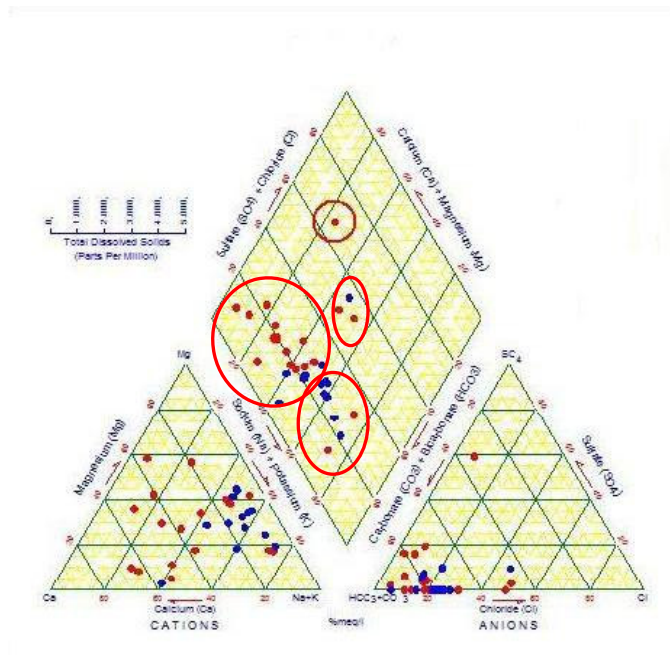
Atendiendo a lo discutido en la sección de caracterización geoquímica, puede apreciarse que las concentraciones determinadas para las especies estudiadas, están asociadas principalmente al proceso interacción agua-litología y al agua de lluvia. Nótese además, que estas aguas no presentan una alta salinidad, lo que puede estar indicando que tiene poco tiempo de contacto con el acuífero. Custodio y Llamas (1976) señalan que las aguas subterráneas con estas características pueden clasificarse como aguas subterráneas de origen meteórico.

#### **Según su composición química**

Para esta clasificación fue necesario el uso de gráficos, particularmente el diagrama de Piper (figura 30). Estos son útiles para determinar el tipo de agua presente en la zona bajo estudio. El diagrama de Piper fue realizado para muestras de aljibes y muestras de ríos, obteniéndose como resultados que un 78 % de las muestras de aljibes del sector sur-central del área Junin, de la Faja Petrolífera del Orinoco corresponden aguas del

tipo  $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ , mientras que un 11% se clasifican como  $\text{Na}^+ \text{-K}^+ \text{-HCO}_3^-$ , un 5,5% se clasifican como  $\text{Na}^+ \text{-SO}_4^{2-}$  y el 5,5% restante corresponden a aguas  $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ , éstas dos ultimas equivalen a una muestra cada una. No obstante, no se descarta la influencia del hombre, particularmente hacia el sector nor-central de la zona de estudio, donde fueron observados los valores anómalos para prácticamente todas las especies estudiadas.

Por otro lado, las aguas de ríos se pueden clasificar en tres grupos, el 54 % correspondiente a aguas  $\text{Na}^+ \text{-HCO}_3^-$ , el 38% a aguas  $\text{Ca}^{2+} \text{-HCO}_3^-$  y el porcentaje restante propio de una sola muestra se clasifica como  $\text{Ca}^{2+} \text{-SO}_4^{2-}$ .



**Figura 30.** Diagrama de Piper para aguas de aljibes y aguas de río

### De acuerdo a la calidad química de las aguas

La clasificación realizada sobre las aguas estudiadas es referida al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005), el cual establece los parámetros químicos, físicos y biológicos, para determinar un tipo de agua y su posible uso. Por tratarse de calidad química se realizan diversas clasificaciones con distintos atributos químicos. Cabe destacar que Gutierrez *et al*, 2009, establecen que es necesario realizar un monitoreo por lo menos anual de cada uno de estos parámetros para establecer cambios en la calidad de las aguas subterráneas. A continuación se presenta un cuadro comparativo de los diversos

tipos de aguas de acuerdo a su calidad y usando los parámetros químicos usados en el presente estudio.

Parámetro químico	Limite máximo			Aguas analizadas
	Tipo 1 ó excelente	Tipo 2 ó muy buena	Tipo 3 ó buena	
Na <sup>+</sup> (mg/L)	140	140	-	1,07-6,03
K <sup>+</sup> (mg/L)	-	20	20	0,25-75,5
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	200	200	200	0,22-35,56
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	70	70	70	0,09-62,29
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	300	250	250	0,8-34,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	340	340	340	ND-350,0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	10,0	10,0	10,0	ND-16,0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	-	370	370	4,57-226,1
Al (mg/L)	0,2	0,2	0,1	ND-0,14
Mn (mg/L)	0,1	0,2	0,2	ND-0,16
Fe (mg/L)	1,0	1,0	5,0	0,01-0,17
SDT (mg/L)	1300	1300	1300	17-1000
pH	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	5,58-7,56
C. Fecales unidades/100 mL	<75	<100	<100	0-112
C. Totales unidades/100 mL	<1000	<1000	<1000	17-1000

**Tabla 2.** Tabla comparativa entre los parámetros que determinan los diferentes tipos de agua de acuerdo a su calidad y los intervalos obtenidos como resultados en el presente estudio.

El Na<sup>+</sup> de acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005), es usado como parámetro químico para determinar el tipo de agua en función de la calidad química de las mismas. El límite máximo de Na establecido para clasificar un cuerpo de agua como clase 1 o excelente, es de 140 mg/L (tabla 3). En general, las aguas estudiadas tienen en su totalidad valores por debajo de éste límite, con una mediana de 1,77mg/L.

El citado decreto establece que el valor máximo para clasificar un cuerpo de agua como clase 2 o muy buena es de 20 mg/L (tabla 3). Por su parte, los valores de  $K^+$  determinados para las aguas estudiadas están alrededor de 1,81 mg/L.

Por otro lado, el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005) indica que el valor máximo de concentración establecido para el  $Mg^{2+}$ , para cuerpo de agua como clase 1 o excelente es de 70 mg/L (tabla 3). Las muestras de aguas estudiadas tienen una concentración de  $Mg^{2+}$  por debajo de éste límite (0,79 mg/L), lo cual permite clasificarlas como aguas aptas para cualquier uso.

En cuanto al  $Ca^{2+}$ , en el mencionado decreto se indica que la concentración máxima establecida para clasificar las aguas como excelente es de 200 mg/L (tabla 3). Para las muestras de aguas subterráneas estudiadas en el presente trabajo, el valor de fondo medido es de 2,5 mg/L, muy por debajo del establecido por el mencionado decreto. Esto señala que de acuerdo a éste parámetro las aguas subterráneas del sector sur-central del área Junín son de clase 1.

En cuanto al Al las muestras estudiadas presentan concentraciones que están entre no determinadas y 0,14 mg/L. De acuerdo al decreto al cual se ha hecho referencia, éste parámetro indica que corresponden a aguas con calidad químicas excelente, puesto que el límite de concentración máximo establecido por dicho decreto es de 0,2 mg/L (tabla 3). Así como se tomo en cuenta la concentración de Al para esta discusión también se hizo uso de las concentraciones de especies minoritarias como Fe y Mn totales. Para el caso del Fe, las concentraciones encontradas son bastante bajas (Apéndice C, tabla 10) incluso más bajas que el límite máximo establecido para la clasificación de aguas con calidad excelentes, lo cual las ubica dentro de este grupo. Para el caso del Mn, la mayoría presenta concentraciones por debajo de 0,1 mg/L, correspondientes a aguas de tipo 1, sin embargo las muestras M-12, M-16 y PM-075, tienen concentraciones de Mn total por encima de éste límite, correspondiendo a aguas con calidad muy buena.

El intervalo de concentración determinado para las aguas estudiadas está entre 0,1 y 0,17 mg/L. Según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005), la concentración

máxima establecida para que un agua sea clasificada como excelente es de 1,0 mg/L (tabla 3), por lo que haciendo referencia a esta especie, el conjunto de aguas subterráneas del sector sur-central del área Junín son clase 1 o con calidad excelente.

Así mismo, en dicho decreto se establece que el límite de concentración del  $\text{HCO}_3^-$  máximo para clasificar las aguas de calidad muy buena, es de 370 mg/L (tabla 3). Para las aguas estudiadas, este parámetro no está dentro de los de aguas con calidad excelente, en éste sentido la mayoría de la muestras analizadas corresponden a aguas con calidad muy buena, ya que los valores obtenidos para ésta especie son mucho menores que el límite establecido.

Las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ , obtenidas para las aguas captadas en el sector sur-central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco, son en general bajas. Los valores obtenidos arrojaron una mediana de 0,25 mg/L, muy por debajo del señalado en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005), cuya concentración máxima es de 340 mg/L (tabla 3), para clasificar las aguas como de calidad excelente. Esto señala que las aguas subterráneas estudiadas, exceptuando a la muestra M-20, que muestra una concentración ligeramente por debajo del límite, 350 mg/L, puede clasificarse como excelente.

La especie  $\text{NO}_3^-$  suele ser un parámetro químico muy usado para determinar si existe contaminación en un cuerpo de agua. De acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005) la concentración máxima permitida de ésta especie para clasificarla como muy buena o excelente, como se muestra en la tabla 3, es de 10 mg/L. La mayoría de las muestras estudiadas entran dentro de ésta clasificación; sin embargo, existen 3 muestras que se exceden del límite, la M-20, M-17 y PM-062 cuyos valores son 12, 16 y 14 mg/L, respectivamente (Apéndice C, tabla 10). Dichos valores parecen estar asociados con actividades antropicas como la ganadera y la agrícola. El uso de fertilizantes en las fincas agrícolas, así como los desechos orgánicos del ganado, constituyen más fuentes de  $\text{NO}_3^-$  a las aguas subterráneas.

La especie  $\text{Cl}^-$  es otro atributo químico determinante en la calidad química de las aguas subterráneas. Según el citado decreto, la concentración máxima para clasificar un cuerpo de agua con calidad muy buena es de 250 mg/L (tabla 3). En ese sentido, el

100% de las aguas estudiadas se encuentra muy por debajo de éste valor, donde la mediana encontrada es de 2,45 mg/L, por lo tanto podrían clasificarse de buenas a muy buenas, ya que no se encuentra una clasificación con un límite inferior, a pesar de que las concentraciones encontradas se encuentran muy por debajo del límite establecido.

La concentración de SDT encontrada para la muestras de aguas subterráneas analizadas en el presente estudio, en general son bajas, por debajo de 1000 mg/L, lo que permite clasificarlas como aguas dulces. Según el Decreto 883, la concentración máxima de SDT que debe tener un cuerpo de agua de 1300 mg/L; sin embargo éste valor se repite en tres tipos de agua, es decir excelente, muy buenas y buenas.

En el contexto de los parámetros fisicoquímicos medidos, el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005), indica que el intervalo de pH establecido es de 6,8 a 8,5 unidades; sin embargo, dicho intervalo es el mismo para tres tipos de aguas: excelente, muy buena y buena. El 100% de las muestras de aguas subterráneas correspondientes al sector sur-central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco, se encuentran dentro de éstos límites; no obstante, es pertinente relacionar varios parámetros para establecer una única clasificación.

Un parámetro biológico de importancia en estudios sobre calidad de aguas, que complementa la información química, es la referida a la presencia de coliformes totales y coliformes fecales. En cuanto a los coliformes totales, el Decreto 883 establece que el valor máximo para clasificar las aguas desde buena a excelente es de 1000 organismos por cada 100 mL; en tal sentido, las muestras estudiadas entran dentro de éste intervalo, a excepción de la muestra de agua M-25 que tiene 1000 organismos por 100 mL.

Por otro lado, el decreto indica que en el caso de los coliformes fecales, el límite máximo para aguas con calidad excelente es de 25 organismos/100mL. La mediana obtenida para las aguas estudiadas es de 0,5 organismos/100 mL, indicando que desde el punto de vista de este parámetro, estas aguas son clasificadas como excelente; sin embargo, las muestras M-25, PM-50, PM-052 y PM-068, poseen valores de coliformes fecales de 50, 51, 57 y 112 organismos/100mL, respectivamente. Nótese que estos valores son superiores al límite recomendado por el Decreto 883 (Gaceta Oficial n°

5021, 2005). En este orden de ideas, puede indicarse que las tres primeras muestras están dentro del tipo de agua clasificadas como muy buena, mientras que la última excede el límite de aguas con calidad buena o clase 3 (100 organismos/100 mL), es posible que se trate de un agua contaminada.

Para establecer una clasificación de las aguas en función de la calidad que presente las mismas, es necesario correlacionar todos los parámetros, estudiados. En ese sentido, puede concluirse, que la mayoría de los parámetros corresponden a aguas con calidad de muy buena a excelente, a excepción de las muestras M-20, M-25 y PM-068 que de acuerdo a algunos parámetros, no entran dentro de ésta clasificación. Las aguas con calidad muy buena o excelente pueden ser usadas para diversas actividades como fuente de abastecimiento previo acondicionamiento para uso doméstico, protección de las comunidades hidrobiológicas, riego de hortalizas y legumbres consumidas en crudo y frutas sin remoción de piel, riego de cultivos arbóreos, cereales y de forraje, abrevadero de animales e industrial.

## **RELACIONES IÓNICAS**

Fueron seleccionadas una serie de relaciones iónicas que permiten establecer y corroborar los posibles factores y procesos que controlan la composición química de las aguas subterráneas. Dichas relaciones son presentadas y descritas a continuación.

### **Diagramas de Gibbs**

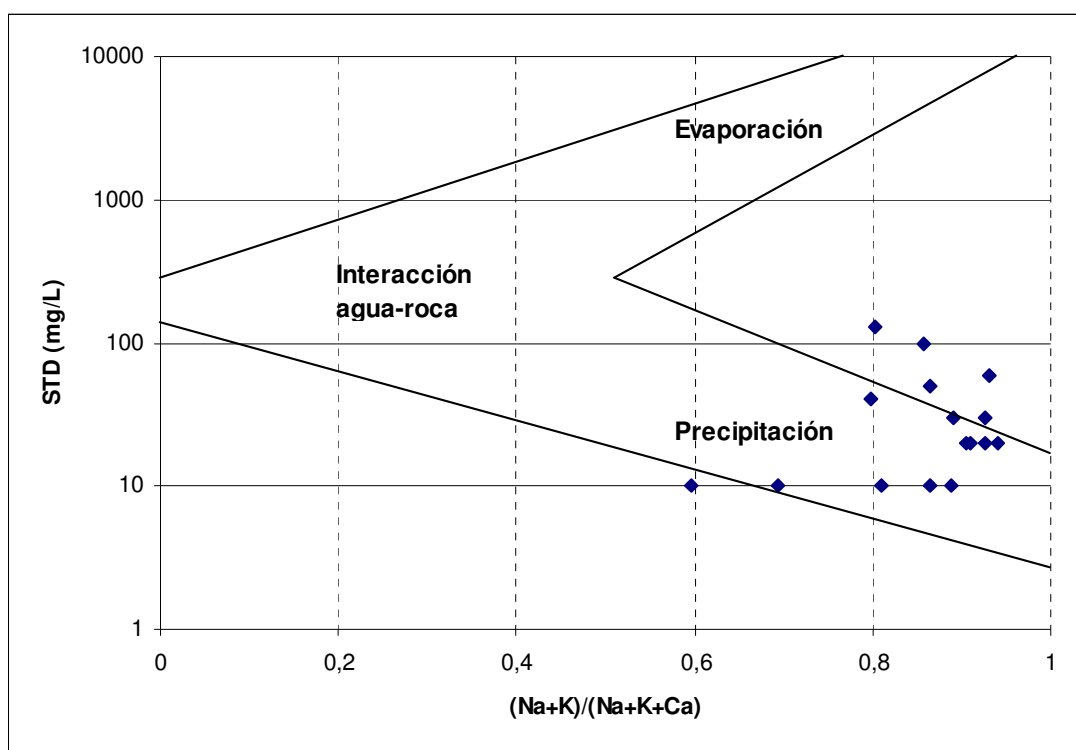
Con el propósito de determinar cuáles son los probables procesos que modifican la composición química de las aguas subterráneas del presente estudio, fueron usados los diagramas de Gibbs, basados en los usados en el estudio llevado a cabo por Rajmohan y Elango (2004). Estos gráficos son construidos en función de la concentración de los sólidos disueltos totales (SDT) frente a las relaciones iónicas  $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$  y  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ . Este diagrama permite visualizar tres zonas, dentro de un bumerang, correspondientes a los posibles procesos controladores modificadores de la composición química, a saber: precipitación, interacción agua-roca y evaporación.

En la figura 30, se muestra el diagrama de Gibbs, para todas las muestras en estudio, en el cual se puede observar que la mayoría de las muestras se ubican dentro del bumerang, en el sector inferior derecho. Esto permite establecer que uno de los

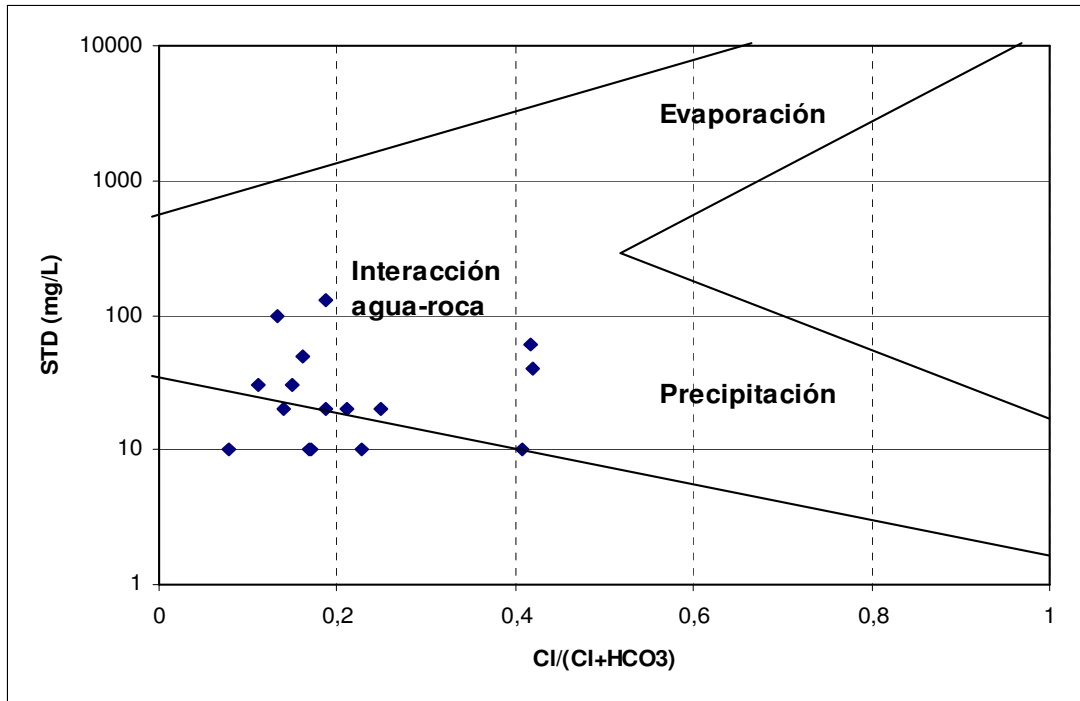


procesos controladores de la composición química de las aguas subterráneas es la precipitación.

Por otro lado, la figura 31, muestra la relación de los SDT contra  $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ . Nótese que la mayoría de los datos se salen del bumerang; sin embargo, claramente se puede observar que ciertas muestras ubicadas dentro de los límites, están controladas por el proceso de interacción agua- roca. Esta figura indica que en la zona de estudio, probablemente están imperando una serie de procesos y factores combinados, entre los que se destacan el proceso de precipitación y la interacción agua - sustrato rocoso. Este último a través del intercambio iónico, donde las principales especies involucradas son  $Ca^{2+}$  y  $Na^+$ , mientras que el proceso de precipitación está controlado por las variaciones climáticas en las épocas del año.



**Figura 31.** Diagrama de Gibbs, Relación  $SDT / (Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ .



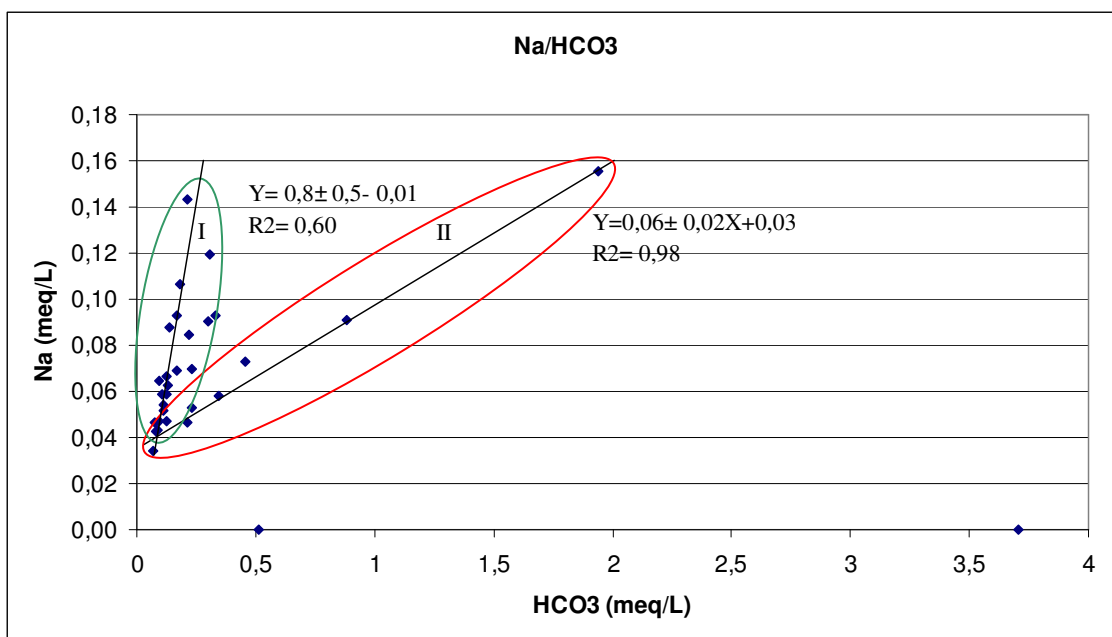
**Figura 32.** Diagrama de Gibbs. Relación  $STD/ Cl^- / (Cl^-+HCO_3^-)$ .

### Relación $Na^+/HCO_3^-$

En la figura 32 se puede observar la relación  $Na^+/HCO_3^-$ , la cual arroja como resultado dos poblaciones de datos, con comportamientos diferentes, indicando que la presencia tanto de  $Na^+$  como de  $HCO_3^-$ , esté asociada a distintas fuentes de aportes o a que estén operando varios procesos y factores químicos. En el caso del grupo de datos I, muestran mayor dispersión ( $R^2=0,60$ ) en comparación al grupo de II, que muestra una buena correlación, arrojando un  $R^2=0,98$ , lo cual indica que existe una proporcionalidad entre la concentración de  $Na^+$  y  $HCO_3^-$ . Posiblemente este comportamiento este asociado al intercambio iónico, donde el  $Na^+$  que se encuentra en las arcillas es reemplazado por el  $Ca^{2+}$ , quedando disponible en las aguas subterráneas, teniendo buena correlación con el  $HCO_3^-$  que es el anión predominante en la zona de estudio.

Por otro lado, los datos identificados con el número I, corresponden a muestras, ubicadas en sectores donde están actuando factores diferentes, donde la concentración de  $Na^+$  aumenta a mayor proporción que el  $HCO_3^-$ , posiblemente correspondan a

sectores donde predominan la actividad agrícola e industrial, exista la presencia de minerales evaporitas o el proceso de intercambio iónico sea más efectivo.



**Figura 33.** Correlación  $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$  (meq/L).

### Correlación $\text{HCO}_3^-$ / sumatoria de cationes

La figura 33 muestra la relación existente entre el  $\text{HCO}_3^-$  y la sumatoria de cationes resultante de los análisis realizados en el presente estudio. De acuerdo con el trabajo realizado por Faublack (2008) dicha relación puede ser usada para la determinar si el proceso imperante es la disolución de silicatos y aluminosilicatos. Existe un solo grupo de datos y muestran una buena correlación ( $r^2=0,94$ ), y una pendiente de  $0,8 \pm 0,1$ , similar a la reportada por Faublack (2008), de 0,76, quien sugiere que efectivamente el proceso de disolución de silicatos y aluminosilicatos, parece ser uno de los procesos controladores de la composición química de las aguas estudiadas. Este proceso ocurre cuando el agua entra en contacto con la roca con altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  en solución, produciendo la disolución de los minerales (Ferreira, 2007).

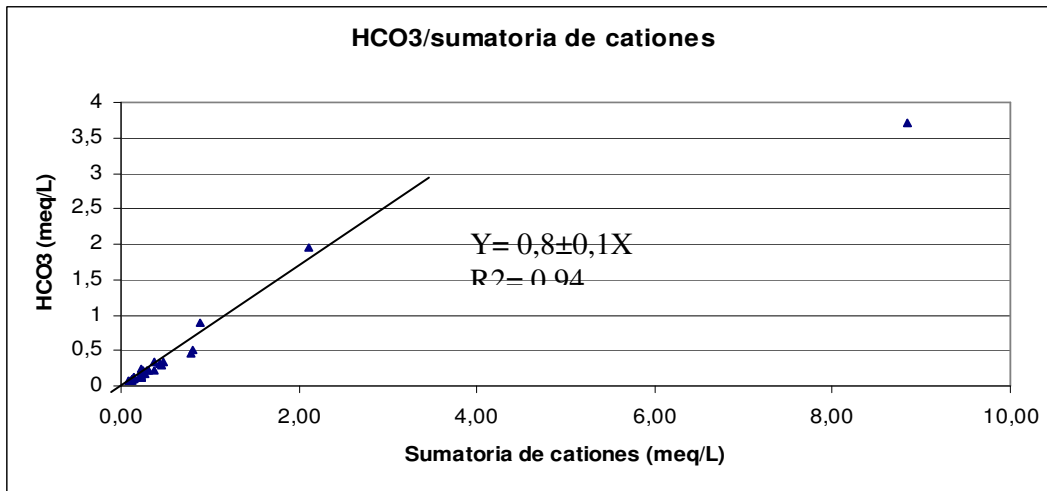


Figura 34. Relación entre  $\text{HCO}_3^-$  y sumatoria de cationes.

### Relación $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$

En la figura 34 puede observarse el grafico que muestra la relación iónica entre  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{HCO}_3^-$ , la cual tiene una correlación bastante buena ( $r^2 = 0,9861$ ) lo cual indica que estas dos especies tienen un comportamiento similar. Los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  son las especies controladoras de la composición química de las aguas subterráneas estudiadas. A diferencia de la relación  $\text{Na}^+$  contra  $\text{HCO}_3^-$ , se tiene una sola población, probablemente esté predominando un solo factor, asociado a la interacción agua-roca. La literatura establece que una pendiente aproximadamente de 0,50 es propia de disolución de calcita, en éste caso la pendiente es de  $0,36 \pm 0,14$ , teniendo en cuenta el error asociado a la misma, es probable que este presente la disolución de calcita, aunque no sea el único proceso que se esté desarrollando.

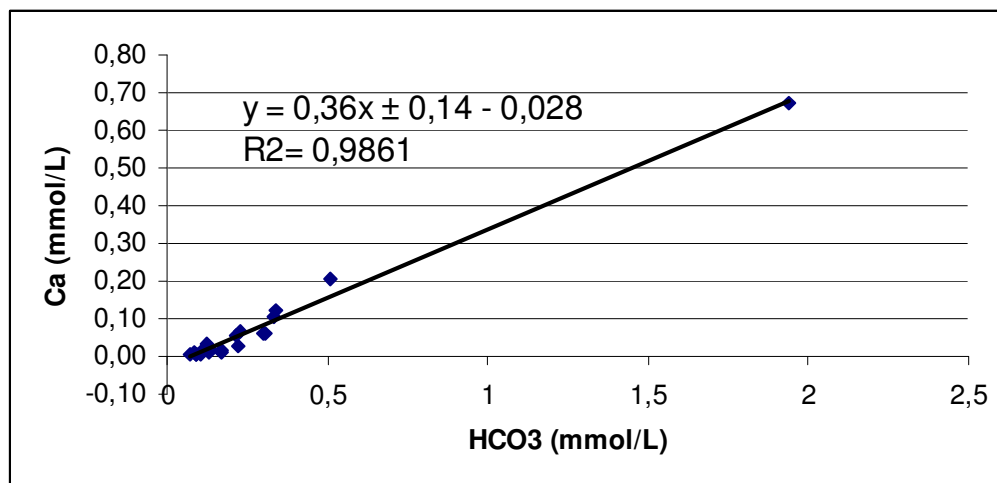


Figura 35. Correlación  $\text{Ca}^{2+}$  contra  $\text{HCO}_3^-$

## Relación de intercambio iónico

Jalali (2005) sugiere que la evidencia para determinar si los procesos que se están llevando a cabo en el sistema son disolución de silicatos e intercambio iónico, viene dada por la relación  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$  en función de  $\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$ . Estas últimas especies representan los iones relativamente liberados durante la disolución de sales, mientras que  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$  representan el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  proveniente de la disolución de aluminosilicatos, calcita o dolomita.

En la figura 35 se muestra la relación descrita anteriormente, correspondiente a las muestras analizadas en el presente estudio. Los resultados obtenidos, presentan una correlación ajustada a una pendiente de -1,5867, bastante por encima del valor indicado por Jalali (2005), de -1 para indicar que el proceso imperante es el intercambio iónico; sin embargo, los datos se ajustan a un índice de correlación  $r^2 = 0,8786$ , que es relativamente alto, y se podría establecer que uno de los procesos controladores de la composición química de las aguas subterráneas de la zona en estudio, es el intercambio iónico. Se tiene presente que pueden existir diferentes procesos actuando al mismo tiempo en el sistema.

La disolución de minerales, el intercambio iónico y en algunas ocasiones la actividad agrícola e industrial son los procesos hidrogeoquímicos más importantes en los acuíferos poco profundos del cuaternario (Guo y Wang 2004), como se presume que es el sistema en estudio.

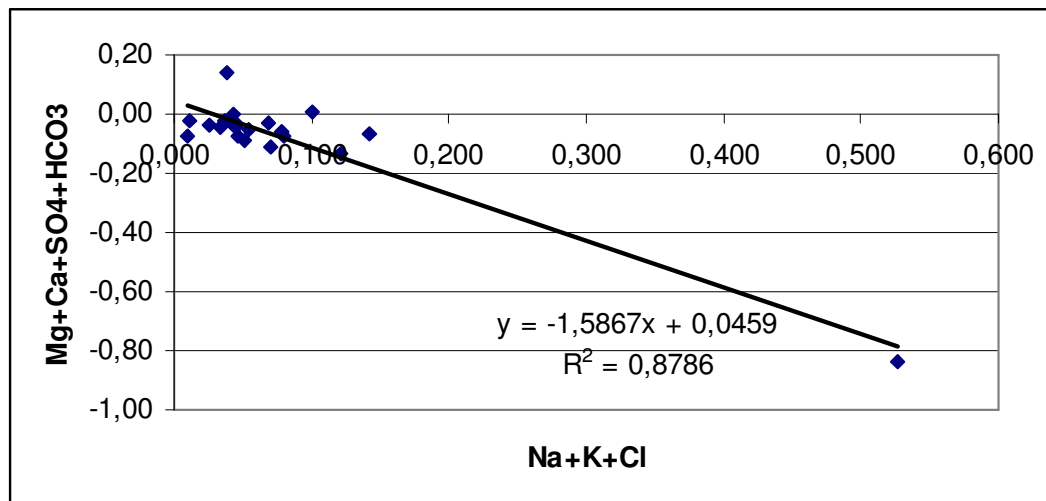


Figura 36. Diagrama de correlación para la determinación de intercambio iónico.

## **CONCLUSIONES**

- El 100% de las muestras de aguas subterráneas correspondientes al sector centro-sur del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco, se clasifican como aguas ligeramente acidas.
- La distribución espacial de los diferentes parámetros fisicoquímicos, así como de las especies químicas determinadas, presenta una ligera tendencia, de altas concentraciones hacia el norte, sin embargo, son las especies  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , las que presentan un patrón similar entre si.
- Las muestras M-20 y M-25, tienen un comportamiento anómalo, en comparación al resto de las muestras.
- Atendiendo a la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) el 100% de las aguas subterráneas estudiadas, se clasifican como aguas dulces.
- De acuerdo a las características químicas mostradas por las aguas subterráneas en estudio, es probable que se trate de aguas subterráneas de origen meteorico y de poco tiempo de residencia.
- En la zona de estudio se identificaron los siguientes tipos de aguas: 78% corresponden a aguas  $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ , un 11% a aguas  $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-HCO}_3^-$  y el resto fueron clasificadas como  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ , en porcentajes iguales.
- Las aguas subterráneas del sector en estudio, pueden ser clasificadas según la calidad química como aguas con calidad de muy buena a excelente, a excepción de las muestras M-20, M-25 y PM-068, que en ciertos parámetros de clasificación no se ajustan a los límites establecidos; así como las muestras M-17 y PM-062, donde posiblemente este imperando el factor antropico, debido a las altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ .
- La composición química de las aguas subterráneas del área de estudio están controladas por diversos factores, litología, precipitación atmosférica o factor climático y posiblemente las diversas actividades llevadas a cabo por el hombre en éste sector.

- Es posible que los procesos que se estén desarrollando en la zona de estudio sean, intercambio iónico, disolución de calcita, disolución de aluminosilicatos y probablemente en menor proporción precipitación de sales.

## ***RECOMENDACIONES***

- Estudiar en las área restantes de la Faja Petrolíferas del Orinoco, con el propósito de de determinar la calidad química y los factores y procesos que la controlan.
- Realizar la determinación de especies orgánicas que permitan definir de manera más específica la calidad de las aguas subterráneas del sector sur-central de la Faja Petrolífera del Orinoco y de esa forma discriminar entre factor antropico y el resto de los factores.
- Realizar una campaña de monitoreo de las muestras M-20 y M-25, para determinar si existen variaciones en las concentraciones de las especies, en función de la época del año en que se encuentre.
- Realizar un estudio geofísico del área que permita establecer el tipo de acuífero presente en la zona y establecer el sistema de flujo imperante en el área.



## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Anshumali, A., Ramanathan E., 2007. *Seasonal variation in the major ion chemistry of Pandoh Lake, Mandi District, Himachal Pradesh, India*. Applied Geochemistry 22, 1736–1747.
- Ayala, L., 2006. *Estudio de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Santa Ana, península de Paraguana, edo. Falcón*. Trabajo especial de grado. Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 127p.
- Código estratigráfico de las cuencas petrolíferas de Venezuela, (CECPV), 2007 PDVSA Intevep ©, (2007), disponible en: [www.pdvsa/lexico/correlac/oriente1.htm](http://www.pdvsa/lexico/correlac/oriente1.htm). Fecha de consulta: 15/12/2007.
- Custodio, E., y Llamas M., 1976. *Hidrología subterránea*. Edición Omega, S.A. Casanova, Barcelona, España. Tomo I, capítulos 10 y 11, 2359p.
- Devis, S., De Wiest R., 1971. *Hidrogeología*. Editorial Ariel, Barcelona, España, 563 p.
- 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, 109p.
- Ferrera, L., 2007. *Caracterización geoquímica de las aguas subterráneas del sector Mote 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, 98p.
- Figueras, J., 2007. *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas del sector Chigüichigüi y del sector sur del sistema d riego del río Guarico, estado Guárico*. Trabajo especial de grado. Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 123p.
- Gaceta Oficial N° 5021, Decreto Presidencial 883, 2005. *Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua, Sub- Comisión de Aguas, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales*.

Gil, J., 2000. *Recursos hidrogeológicos. Conceptos básicos*, Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, España, p. 4-14.

González de Juana, C., Iturralde J., y Picard C., 1980. *Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*, Ed. FONINVES, Caracas, Venezuela, 1001p.

Guo, H., and Wang Y. 2004. *Hydrogeochemical processes in shallow quaternary aquifers from the northern part of the Datong basin, China*. Applied geochemistry, 19, 19-27.

Gutiérrez, M., Azcuntar, O. y Páez, I., 2009. *Red de pozos de monitoreo de calidad del agua subterránea en el departamento del valle del Cauca*. Grupo Recursos Hídricos, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://bt.unal.edu.co/lddonadog/Home/cch-2009/articulos/hidrogeoquimica>. Fecha de consulta: 27/10/2009

Hem, J., 1985. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. USGS- supply paper 2254, p. 66-151.

Jalali, M., 2005. *Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran*. Geology environment, 47,763-772.

Keith, D., 1973. *Hidrología (Agua subterránea)*, Editorial Paraninfo, Madrid, España, 371p.

Montero, R., Martínez, M., Meléndez, G., Garbán, G. y Ramos F., 2002. *Estudio hidrogeoquímico de algunas manifestaciones termales presentes en Falcón Noroccidental, Venezuela*. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos, 27, 1, 10-23.

Morantes, J., 1997. *Estudio hidrogeoquímico en la cuenca del Cuyuní, estado Bolívar, Venezuela*. Trabajo especial de grado. Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 138p.

Pacheco J.; Cabrera A. 2003. *Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas*. Ingeniería, 1-2, 47-54.

Panagopoulos, G.; Lambrakis, N.; Tslis-Katagas, P.; Papoulis, D. (2004). *Cation exchange processes and human activities in unconfined aquifers*. *Environment geology*, 46, 542-552.

PDVSA, 2005. *Planes estratégicos. Vicepresidencia de exploración y producción de petróleo de Venezuela*. Ministerio de Energía y Petróleo. Disponible en: [www.pdvsa.com/planes\\_estrategicos/default.htm](http://www.pdvsa.com/planes_estrategicos/default.htm), fecha de consulta: 23/01/2009.

Paris, M. 2009. *Aguas subterráneas, gestión integrada y sustentabilidad ambiental*. II Congreso internacional del agua y el ambiente. Disponible en: [http://www.udistrital.edu.co/comunidad/eventos/1ciaya/memorias\\_1/s1\\_aguas\\_subt\\_gestion\\_integrada\\_y\\_sustentabilidad\\_amb.pdf](http://www.udistrital.edu.co/comunidad/eventos/1ciaya/memorias_1/s1_aguas_subt_gestion_integrada_y_sustentabilidad_amb.pdf) . Fecha de consulta: 28/10/2009.

Piper, A., 1944. *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*. *American geophysical union*, 25, 914-923.

Rajmohan, N.; y Elango, L., 2004. *Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Chevvyar River Basins, Southern India*. *Environmental Geology*, 46,47–61.

Reiman, C.; Filmoser, P. and Garret, R., 2005. *Background and threshold: critical comparison of methods of determination*. *Science of the total environment*, 346, 1-16.

Saavedra, I., 2002. *Modelos de flujos de aguas subterráneas*. Guía de hidrogeología. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 12 p.

Sánchez, J., 2004. *Conceptos básicos. Ciclo hidrológico*. Departamento de geología, Universidad de Salamanca, España, 9p. Disponible en: <http://web.usal.es/javisan/hidro>, fecha de consulta: 10/01/2009.

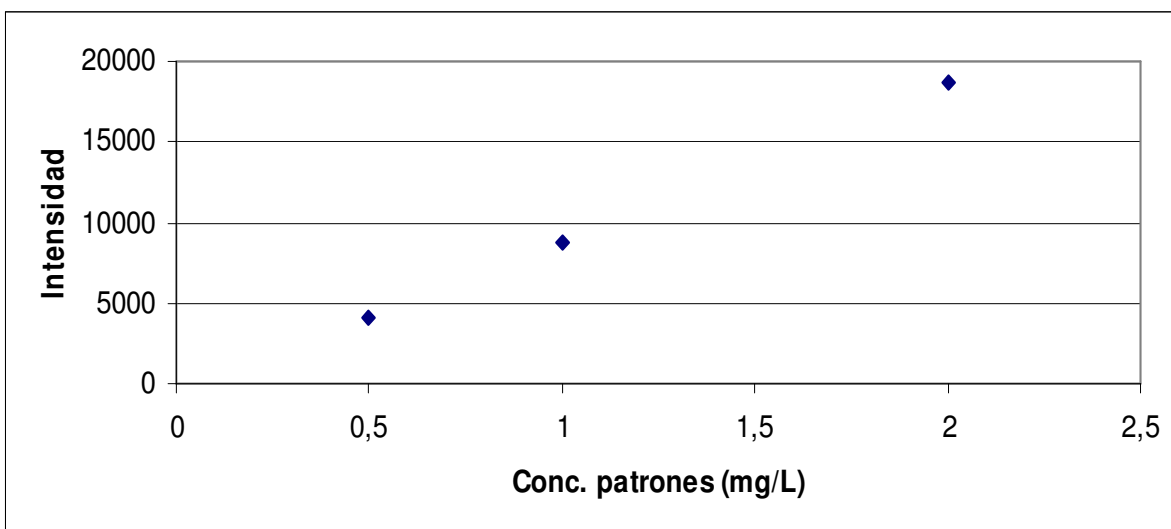
Tesoriero, A., Spruilla T., and Eimers J., 2004. *Geochemistry of shallow ground water in coastal plain environments in the southeastern United States: implications for aquifer susceptibility*. *Applied Geochemistry*, 19, 1471–1482.

Urrutia, E., 2009. *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la zona este del río Zuata del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco*. Trabajo especial de grado. Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, 120p.

Yanes, C. 1997. *Estudio geoquímico regional de los ríos del Escudo de Guayana*. Trabajo Doctoral. Instituto de Ciencias de la Tierra, Escuela de Geología y Minas, Facultad de Ciencias, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

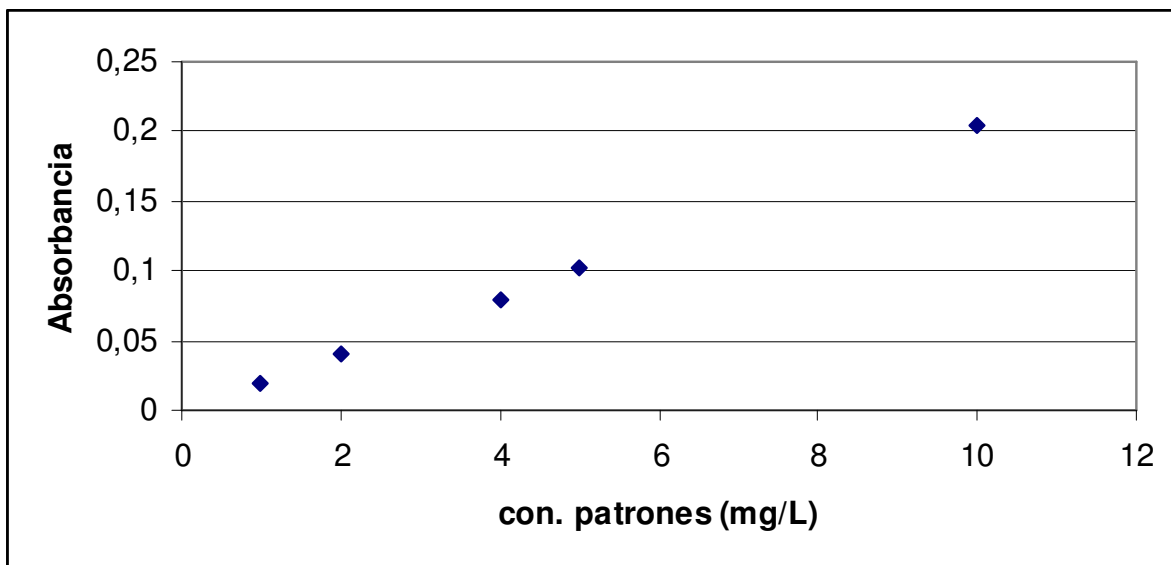
## APENDICE A

**Figura 37.** Curva de calibración de  $\text{Na}^+$ , para bajas concentraciones.



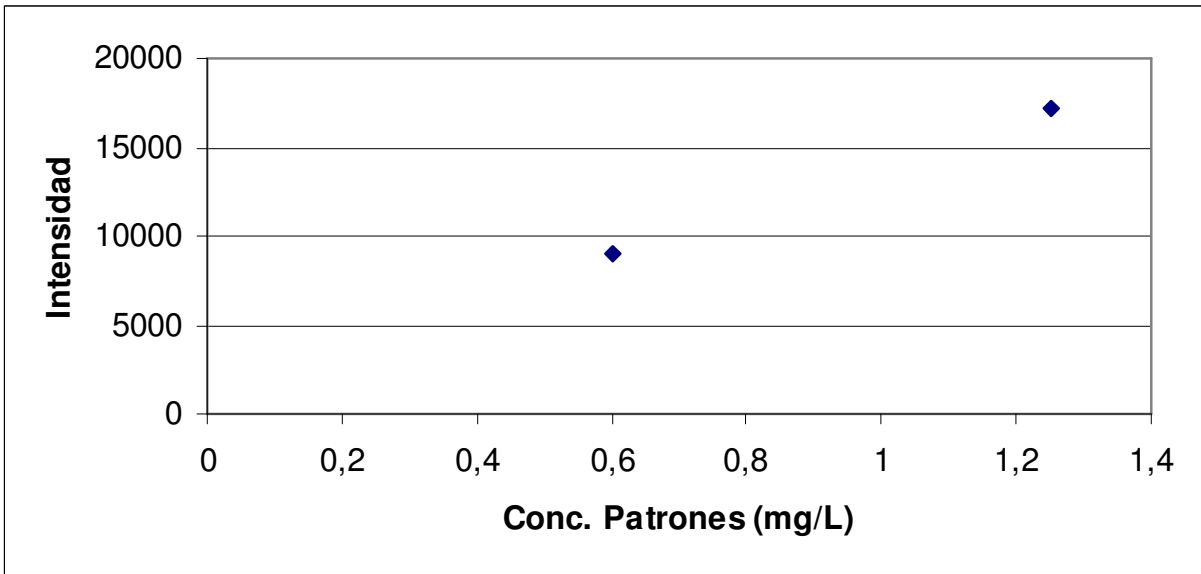
Coeficiente de correlación: 0,99992; Intersección: -824; Pendiente: 97733

**Figura 38.** Curva de calibración de  $\text{Na}^+$  para altas concentraciones.



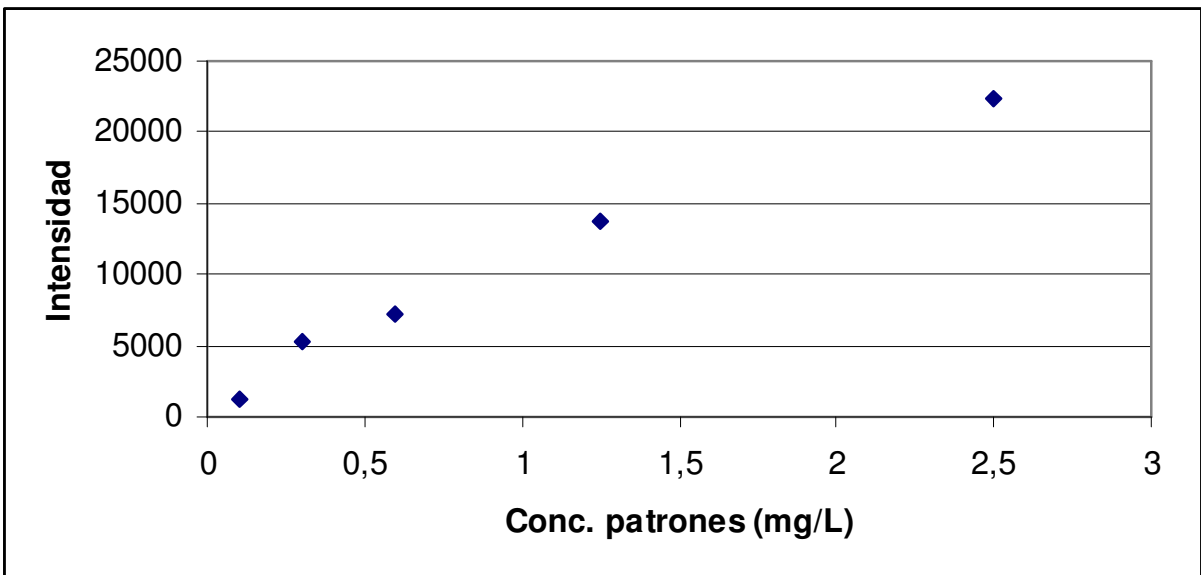
Coeficiente de correlación: 0,9990; Intersección: 0,0012; Pendiente: 0,0206

**Figura 39.** Curva de calibración para  $Mg^{+2}$ .



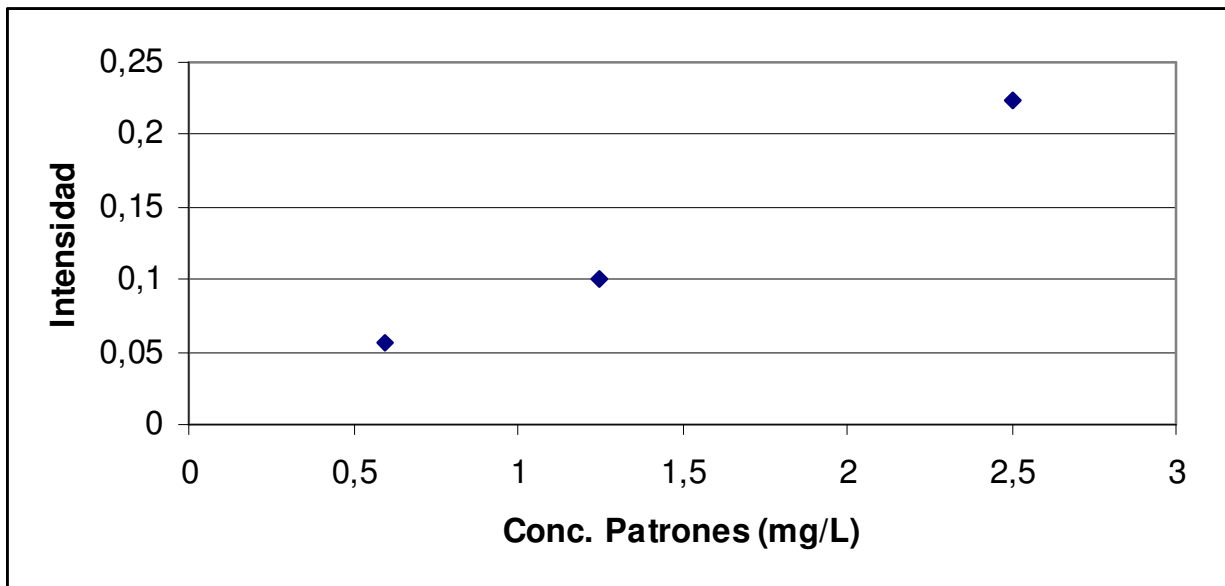
Coefficiente de correlación: 1; Intersección: 1295; Pendiente: 12748

**Figura 40.** Curva de calibración para  $K^{+}$ .



Coefficiente de correlación: 0,99998; Intersección: -432; Pendiente: 1039

**Figura 41.** Curva de calibración para  $\text{Ca}^{2+}$ .



Coefficiente de correlación: 0,9926; Intersección: -0,0032; Pendiente: 0,0893

## APENDICE B

**Tabla 3.** Datos obtenidos en campo para muestras de aljibes.

Muestra	Localidad	Este	Norte	T (°C)	pH	OD (mg/L)	S.D.T. (mg/L)	Profundida d (m)	Color aparente	C. Total UFC/100mL	C. Fecal UFC/100mL
M-12	Hato Paso Ancho	259574	904392	30,0	5,86	-	20	5	transparente	200	0
M-16	Hato La Vigía	274341	902545	32,6	6,16	5,5	50	3	transparente	120	3
M-17	La Bombita	275155	915688	31,6	5,73	7,2	10	4	transparente	200	0
M-20	La Muchacha	263820	907440	30,0	5,84	5,2	-	9	transparente	140	0
M-21	El Caruto	264337	904843	30,3	5,58	4,1	10	4	transparente	17	0
M-25	Hato Zamurito	298987	907406	28,5	7,56	3,9	130	-	transparente	1000	50
PM-049	Hato Trujillo	247488	880956	28,7	7,60	3,9	30	5	transparente	21	0
PM-050	Los Monos	259611	898037	30,3	7,07	11,9	10	5	transparente	545	51
PM-052	Laguna Amarilla	260959	901553	29,8	6,73	8,7	20	5	transparente	650	57
PM-053	La Bomba	257013	901362	29,3	6,83	8,7	30	5	transparente	780	0
PM-058	Hato Río Claro	248829	881046	31,1	6,20	9,5	60	6	transparente	400	1
PM-061	Las Babas	255944	891009	30,4	6,58	3,6	10	10	amarillenta	100	0
PM-062	La Flor	259607	894542	29,6	6,77	4,3	30	9	transparente	145	0
PM-063	Pekin	269277	881938	31,7	7,20	4,5	100	11	transparente	200	0
PM-064	Caserío Pekin	265661	879471	29,8	6,39	5,4	20	8	transparente	108	25
PM-066	Oripopa	275257	884598	30,6	6,20	4,1	20	4,5	transparente	73	18
PM-068	Hato Santa Sofía	272458	893047	30,5	7,32	6,8	10	15	transparente	318	112
PM-075	Hato las Praderas	321394	898365	33,1	6,99	3,9	40	12	transparente	140	2



**Tabla 4.** Datos obtenidos en campo para muestras de río

Muestra	Localidad	Este	Norte	T (°C)	pH	OD (mg/L)	S.D.T. (mg/L)	Profundidad (m)	Color aparente	C. Total UFC/100mL	C. Fecal UFC/100mL
M-15	La Aguadita	271014	907140	29	5,24	8,7	0	0,5	amarillenta	138	0
M-26	Río Quebradón	294154	920457	27,4	6,26	6,3	10	-	marrón	3100	45
M-27	Río Negro	276400	920490	26,8	6,47	6,8	10	-	amarillenta	2200	6
M-9	Río Claro	263278	910110	26,6	5,64	5,4	0	5	amarillenta	3300	45
PM-051	Río Claro	260066	897907	28,4	7,57	6,2	10	5	amarillenta	1800	109
PM-059	Río Claro	248380	880764	29,1	6,87	9,0	10	6	amarillenta	178	3
PM-060	Morichal Veladero	264222	884468	27,6	4,43	10,6	10	4	transparente	152	0
PM-067	Río San Bartolo	275364	879443	29,1	6,65	5,7	10	1,3	marrón	29	8
PM-070	Mapire	286078	873574	32,1	7,03	7,1	10	3	marrón	49	3
PM-071	Río Cachicamo	281096	887322	28,1	6,32	7,5	10	1,5	Amarillenta	500	100
PM-073	Mapire 2	285679	913059	27,7	6,42	6,8	10	1	amarillenta	280	44
PM-074	Río Cabrutica	326550	902849	26,6	7,18	6,7	20	2,5	Marrón	6300	11

**Tabla 5.** Datos obtenidos en campo para muestra de morichal

Muestra	Localidad	Este	Norte	T (°C)	pH	OD (mg/L)	S.D.T. (mg/L)	Profundidad (m)	Color aparente	C. Total UFC/100mL	C. Fecal UFC/100mL
M-18	Salitral	279791	901137	26,6	5,45	6,5	-	-	amarillenta	960	2

## APENDICE C

**Tabla 6.** Concentración de los cationes y su respectiva desviación estándar para muestras de aljibes.

Muestra	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SD	K <sup>+</sup> (mg/L)	SD	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	SD	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	SD
M12	2,14	0,01	1,20	0,00	1,70	0,01	4,15	0,02
M16			4,06	0,04	3,50	0,03	8,18	0,03
M17	1,68	0,05	2,51	0,03	4,30	0,02	6,40	0,02
M20	6,03		7,55	0,05	62,29	0,06	35,56	0,04
M21	1,21	0,01	1,63	0,01	0,09	0,00	2,72	0,01
M25	3,57	0,02	17,4	0,04	2,17	0,01	26,84	0,04
FM049	2,08	0,01	3,34	0,01	1,89	0,01	2,47	0,01
FM050	1,35	0,02	1,39	0,01	0,27	0,01	0,22	0,00
FM052	1,07	0,01	2,18	0,01	0,98	0,02	2,23	0,01
FM053	1,34	0,01	1,45	0,02	0,46	0,01	4,95	0,01
FM058	3,29	0,01	0,25	0,01	1,88	0,02	0,40	0,01
FM061	1,24	0,01	0,25	0,00	0,29	0,00	1,01	0,01
FM062	2,45	0,02	2,11	0,03	0,48	0,01	0,45	0,00
FM063	2,09	0,02	1,99	0,01	0,20	0,00	14,80	0,01
FM064	2,02	0,01	0,70	0,00	1,03	0,00	0,64	0,00
FM066	1,07	0,02	0,39	0,00	0,61	0,00	0,37	0,00
FM068	1,08	0,01	0,30	0,00	0,19	0,00	1,37	0,01
FM075	1,60	0,01	1,27	0,01	0,15	0,00	2,54	0,01

**Tabla 7.** Concentración de cationes y su respectiva desviación estándar para muestras de río

Muestra	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SD	K <sup>+</sup> (mg/L)	SD	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	SD	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	SD
M15	1,53	0,01	1,56	0,01	1,25	0,01	0,39	0,00
M26	2,13	0,02	2,09	0,02	1,09	0,01	0,50	0,01
M27	2,74	0,01	2,70	0,01	1,51	0,01	2,40	0,02
M9	1,44	0,00	1,92	0,01	1,26	0,01	0,41	0,00
FM1051	1,08	0,01	1,42	0,01	0,37	0,00	0,20	0,00
FM1059	1,35	0,02	1,70	0,02	1,09	0,01	0,51	0,01
FM1060	0,79	0,01	1,20	0,01	0,21	0,00	0,12	0,00
FM1067	1,59	0,02	2,65	0,01	0,80	0,01	0,66	0,01
FM1070	1,00	0,01	1,12	0,01	0,52	0,00	0,33	0,00
FM1071	0,98	0,01	0,75	0,00	0,23	0,00	0,45	0,01
FM1073	1,48	0,01	0,68	0,00	0,61	0,01	0,22	0,00
FM1074	1,94	0,01	2,94	0,02	1,13	0,01	1,20	0,02

**Tabla 8.** Concentración de cationes y su respectiva desviación estándar para muestra de morichal

Muestra	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SD	K <sup>+</sup> (mg/L)	SD	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	SD	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	SD
M-18	1,18	0,01	1,22	0,01	1,30	0,01	0,56	0,01

**Tabla 9.** Concentración de especies aniónicas y otras especies en muestras de aljibes

Muestra	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Si (mg/L)
M-12	0,5	0,8	2,9	ND	0,02	0,16	7,75
M-16	2,3	2,3	4,5	0,02	0,03	0,16	9,48
M-17	9,9	3,3	16,0	ND	0,08	ND	11,87
M-20	350,0	34,0	12,0	0,08	0,01	0,41	9,72
M-21	ND	1,5	ND	0,01	0,02	ND	6,81
M-25	20,2	2,6	4,3	0,01	0,17	0,10	12,90
PM-049	5,5	1,9	3,5	ND	0,02	0,06	12,60
PM-050	ND	1,7	ND	0,03	0,02	0,04	6,44
PM-052	ND	2,3	1,3	0,01	0,04	ND	5,00
PM-053	ND	3,0	1,1	0,05	0,05	0,04	6,83
PM-058	0,8	9,4	1,2	0,14	0,04	0,04	5,52
PM-061	ND	2,0	2,1	ND	0,06	0,04	5,59
PM-062	ND	3,7	14,1	0,01	0,04	0,05	5,78
PM-063	ND	4,0	ND	0,01	0,02	0,04	6,70
PM-064	ND	3,3	3,0	ND	0,01	0,05	3,10
PM-066	ND	3,3	0,7	0,02	0,02	0,05	4,92
PM-068	ND	1,0	ND	ND	0,11	0,09	6,22
PM-075	0,6	1,9	1,1	ND	0,03	0,12	0,22

\*ND: No detectado.

**Tabla 10.** Concentración de especies aniónicas y otras especies en muestras de río

Muestra	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Si (mg/L)
M-15	1,5	5,3	0,6	2,02	0,86	ND	10,55
M-26	ND	24	ND	0,28	0,34	0,06	7,59
M-27	ND	1,6	10,7	0,98	0,66	0,14	8,89
M-9	0,5	1,0	0,5	0,36	0,36	0,08	5,06
PM-051	ND	1,0	ND	0,03	0,13	0,04	2,74
PM-059	0,8	1,2	1,5	0,12	0,37	0,04	3,72
PM-060	ND	0,7	ND	0,02	0,12	0,07	5,16
PM-067	ND	2,0	ND	0,39	0,96	0,06	6,94
PM-070	ND	1,1	ND	0,07	0,34	0,06	4,67
PM-071	ND	1,1	ND	0,09	0,30	ND	5,85
PM-073	ND	1,3	ND	0,07	0,53	0,02	7,53
PM-074	2,0	3,1	2,3	2,15	1,07	0,08	9,08

\*ND: No detectado.

**Tabla 11.** Concentración de especies aniónicas y otras especies en muestra de morichal

Muestra	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Si (mg/L)
M-18	1,1	1,4	ND	0,05	0,25	ND	6,14

\*ND: No detectado.